

2. FOTOGRAMETRÍA

I. Otero; A. Ezquerro; R. Rodríguez-Solano; L. Martín; I. Bachiller

2.1. Introducción

Como ya se ha comentado en el Capítulo I de este texto, la fotogrametría es un sistema de captura de información a distancia cuyos principios y particularidades se desarrollarán en los apartados siguientes; actualmente las técnicas de la fotogrametría se consideran integradas con las técnicas de percepción remota y las de fotointerpretación, tres técnicas que se complementan entre sí, no obstante se puede afirmar que la fotogrametría se concreta en la interpretación cuantitativa de fotografías aéreas y otros materiales aerofotográficos con el objetivo primordial de obtener mapas.

Dentro siempre de esta idea se han dado distintas definiciones de fotogrametría, entre las que cabe destacar las siguientes:

“ arte, ciencia y tecnología orientada a obtener información relevante de diversos objetos físicos de la corteza terrestre y de su medio ambiente, a través de procesos de medición e interpretación de imágenes fotográficas y de patrones de energía electromagnética radiante” (Herrera, 1987)

“ Técnica cuyo objeto es estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías de ese objeto” (Clavo, 1982).

2.1.1. Ventajas de la Fotogrametría

Como ventajas básicas de la fotogrametría sobre otros sistemas de captura de información se pueden señalar los siguientes:

- Se obtienen representaciones completas de los objetos (información objetiva).
- El registro es instantáneo.
- Se utilizan materiales relativamente económicos y de fácil manipulación y conservación.
- Existe la posibilidad de tratar objetos en movimiento.
- El proceso de captura de la información y el posterior de medida no perturba el objeto a estudiar.
- Proporciona grandes rendimientos.

En definitiva, hay que esperar de la fotogrametría respecto a la topografía clásica, que tiene evidentemente campos de aplicación donde no es sustituible, mayor comodidad y economía, más facilidad y más rapidez.

2.1.2. Divisiones de la Fotogrametría

Frecuentemente la fotogrametría se divide en dos especialidades de acuerdo con el tipo de fotografía utilizada (Herrera, 1987).

- **Fotogrametría terrestre.** La fotografía es usada en una posición tal que el eje de la cámara fotográfica resulta horizontal y paralelo al terreno o corteza terrestre.
- **Fotogrametría aérea.** Fotografías obtenidas desde vehículos aéreos; el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.

El texto que nos ocupa se centra en esta última especialidad sin pretender profundizar en la complejidad de las técnicas fotogramétricas, sino que se referirá a aquellos principios elementales necesarios para la manipulación técnica del material aerofotográfico y cartográfico que hace posible el desarrollo y aplicación de las mismas.

Por último señalar que dependiendo del método empleado, se pueden distinguir tres tipos diferentes de fotogrametría:

- **Fotogrametría analógica.** Si se entiende por fotogrametría, como se ha comentado, la determinación precisa de un objeto en el espacio, mediante la utilización de fotografías aéreas, la fotogrametría analógica lo consigue mediante la utilización directa de dichas fotografías (formando modelos estereoscópicos), reconstruyendo el modelo espacial con sistemas ópticos o mecánicos.
- **Fotogrametría analítica.** En este caso el modelo espacial se reconstruye exclusivamente mediante programas informáticos que simulan dicha geometría.
- **Fotogrametría digital.** Fotogrametría que utiliza como dato de entrada las fotografías aéreas previamente transformadas a formato digital, reconstruyendo así mismo el modelo espacial de forma numérica o digital; en este caso los conceptos relativos a tratamiento digital de imágenes cobran gran importancia.

2.2. Fotografías y cámaras

El sistema empleado en fotografía para la captación de imágenes consta de tres elementos: sensor, filtro y película.

La recepción de radiaciones electromagnéticas en el espacio se caracteriza porque el emisor y el receptor no están en contacto. El receptor recibe el nombre de sensor remoto, que puede ser activo cuando lleva incorporada su propia fuente de radiación (caso del radar), o bien pasivo (caso de la cámara fotográfica) cuando capta radiaciones no emitidas por él.

El filtro tiene como función disminuir la influencia de la niebla atmosférica y limitar el paso de radiaciones luminosas de una determinada longitud de onda. Los filtros obligan a aumentar el tiempo de exposición en función del factor del filtro.

La película está constituida por un soporte de gran estabilidad dimensional y por una emulsión. Las emulsiones, sensibles a ciertas regiones del espectro electromagnético, forman una imagen del terreno en la cual sus aspectos fisiográficos, iluminados directamente por el sol y por la luz que reflejan las nubes, aparecen diferenciados por los factores tono, textura y forma (López-Cuervo, 1980).

2.2.1. Fotografías

Una exposición fotográfica supone la incidencia de la luz sobre la emulsión durante un espacio de tiempo muy breve, lo cual produce un cambio en la emulsión, formándose una imagen latente a partir de la cual se obtiene la fotografía mediante el revelado.

2.2.1.1. Tipos de fotografías aéreas

Las fotografías aéreas se pueden clasificar de varias maneras en función del criterio empleado. Como tal puede tomarse el ángulo de exposición, las especificaciones o la forma en que se usan. A continuación se exponen estas clasificaciones.

2.2.1.1.1. Por el ángulo de la fotografía

- **Fotografías verticales:** son aquellas tomadas con la cámara colocada de tal manera que el eje óptico de la lente, en el momento de la exposición, está paralelo a la línea zénit-nadir, es decir, vertical.
- **Fotografías oblicuas:** son fotografías obtenidas en condiciones de desviación angular deliberada del eje óptico respecto a la vertical. De acuerdo con ello, puede ocurrir que el horizonte sea visible en la fotografía o que no lo sea. Si es visible, se puede calcular el ángulo de inclinación.

En el pasado se usaron mucho las fotografías oblicuas, ya que un número pequeño de ellas cubre un área extensa, y en consecuencia son más baratas. También

presentan una imagen del terreno más natural. Hoy día, sin embargo, se usan casi exclusivamente las fotografías verticales, debido a las desventajas que presentan las oblicuas y que son las siguientes:

- La escala varía mucho en una fotografía en función de la proximidad del punto a la cámara.
- La dificultad para construir mapas con ellas es máxima.
- Solamente son útiles en áreas llanas, ya que la perspectiva impide la visión de ciertos puntos ocultos tras las elevaciones del terreno.

2.2.1.1.2. Por las especificaciones

- **Según la escala.** Las fotografías pueden clasificarse por su escala. Las escalas de empleo más habitual en fotografía aérea están comprendidas entre 1:20.000 y 1:40.000. En el campo forestal y en la fotointerpretación y cartografía de otros recursos naturales se emplean usualmente escalas comprendidas entre 1:10 000 y 1:20 000, mientras que las escalas comprendidas entre 1:5 000 y 1:10 000 se usan con frecuencia para fotointerpretación detallada y para mapas de escala muy grande.



Aquí se presentan tres aspectos de fotografías de distinta escala de la ciudad de Reus (Tarragona). De izquierda a derecha, 1:3.500, 1:32.000 y 1:60.000

- **Según la lente y la cámara usada.** Las distintas cámaras utilizadas en los vuelos fotogramétricos proporcionan fotografías de especificaciones bien distintas. Se puede encontrar una descripción de todas ellas más adelante en este capítulo, en el correspondiente apartado.

- **Según la estación del año.** La estación en la que se toman las fotos afecta en gran medida a su valor. La época más adecuada de vuelo depende en parte de las condiciones climáticas locales y en parte del uso que se desee dar a las fotografías. Para la fotointerpretación, la estación tiene una importancia capital en regiones donde los árboles son de hoja caduca (bien por la existencia de una estación fría, o bien de una estación seca). La fotointerpretación en la época de falta de hojas, la fotointerpretación de la superficie del suelo y la elaboración de cartografía es más fácil, suponiendo que no esté cubierta de nieve o hielo y que los niveles de las aguas superficiales sean adecuados para los propósitos de la fotointerpretación. De todos modos, al mismo tiempo, la interpretación de la cubierta arbórea está muy limitada en esta época porque los árboles de tamaño medio no tienen elementos de tamaño suficiente como para ser resueltos en las fotografías de escala media. Por este motivo, en el campo forestal y botánico, normalmente se requieren fotos tomadas en épocas de pleno vigor vegetativo. Aun así, existe la posibilidad de distinguir entre diferentes tipos de vegetación en aquellas épocas en las que el follaje está naciendo, cambiando de color o cayendo. Aunque se pueden obtener excelentes resultados a partir de vuelos cuidadosamente planeados en estas épocas, la variabilidad en las fotos es excesiva y las probabilidades de fracaso son similares las de éxito.

- **Según la emulsión de la película.**

- Emulsiones fotográficas en blanco y negro.
- Emulsiones fotográficas en color.

Dentro de cada uno de los tipos anteriores encontramos emulsiones sensibles a longitudes de onda pertenecientes a la región visible o bien a la región infrarroja del espectro electromagnético, aunque ciertas emulsiones infrarrojas son también sensibles a determinadas longitudes de onda del espectro visible. Para seleccionar las longitudes de onda que alcanzan la emulsión en función del propósito buscado, se emplean diferentes tipos de filtro.

Las emulsiones infrarrojas se usan preferentemente para distinguir entre tipos de vegetación, tipos de suelo y condiciones de humedad, que aparecen con tonos de fuerte contraste.

De entre las emulsiones en blanco y negro, las más utilizadas han sido las pancromáticas, que reproducen una imagen similar a la que sería percibida por el ojo humano.

Sin embargo, para la interpretación de características de la vegetación que tengan que ver con el color del follaje son preferibles las emulsiones de color, ya que la percepción de tonos por parte del ojo humano se multiplica, y muy especialmente las emulsiones infrarrojas de falso color, con grandes aplicaciones en la detección de enfermedades forestales (no detectables en el espectro visible), hidrología, vegetación y estudios ambientales.

2.2.1.1.3. Por la forma en que se usan las fotografías

Las fotografías aéreas normalmente se imprimen sobre papel o transparente. Actualmente tiene una gran importancia el soporte digital, que paulatinamente va desplazando a los anteriores. Las impresiones pueden ser:

- **No corregidas.** Son las más baratas, y fiel imagen del negativo. Son adecuadas para la mayoría de los usos y tienen un tamaño muy conveniente para su manejo en el campo y para su estudio con estereoscopio de bolsillo. Las impresiones pueden efectuarse sobre papel o material transparente. En este último caso, el nivel de detalle y la definición son superiores a las obtenidas sobre papel.
- **Compensadas (“ratioed”).** En las cuales las variaciones de escala entre fotografías han sido eliminadas. A causa de las variaciones en la altura de vuelo del avión y de la elevación del suelo, la escala de las fotografías puede variar considerablemente incluso dentro de una misma pasada.
- **Rectificadas.** en las cuales se ha eliminado el balanceo (“tilt”). Normalmente las fotografías se toman con el eje de la cámara inclinado levemente respecto a la vertical, puesto que es casi imposible lograr su verticalidad en un aeroplano que se mueve y vibra. No existe ningún mecanismo que posibilite la obtención de fotografías perfectamente verticales. Sin embargo, si se conoce la magnitud y la dirección del balanceo, se pueden preparar impresiones rectificadas reproduciendo un balanceo apropiado entre el negativo y el papel de impresión. Las fotografías rectificadas son, pues, fotografías corregidas a un plano horizontal de referencia.
- **Ampliadas.** Las fotografías ampliadas se pueden usar como parte de los archivos de gabinete. En ellas se puede identificar con facilidad límites de propiedades, zonas quemadas, zonas de corta, carreteras y líneas de teléfono. Las ampliaciones también se pueden usar como base para la elaboración de mapas de gran nivel de detalle. Sin embargo, también tienen desventajas: son demasiado grandes para su empleo en el campo y para su estudio con estereoscopio. Además, no contienen ninguna información que no pueda obtenerse mediante la observación bajo aumento de la fotografía original.
- **Mosaicos.** Cuando una serie de fotografías se ha reunido en una única fotografía compuesta. Cuando se prepara un mosaico grosero, con el fin de proporcionar un índice de las fotografías individuales, se le denomina “mosaico índice”. La imagen de cada fotografía en un mosaico índice está claramente etiquetada, de tal modo que el observador pueda determinar rápidamente qué fotografía cubre un área determinada. Los mosaicos preparados con más cuidado se pueden utilizar para el control de trabajos en áreas en las que no hay disponible una base cartográfica adecuada. Su ventaja es que suponen una representación continua del territorio, conveniente para su archivo y consulta. Sus desventajas son su coste y el

hecho de que no pueden estudiarse estereoscópicamente, aunque existen también los estereomosaicos.

- **Impresiones tridimensionales.** Cuando un par de fotos se ha combinado para reproducir su visión estereoscópica.

2.2.2. Cámaras

Las cámaras fotográficas, como se ha indicado anteriormente, son sensores remotos pasivos, y una clasificación sencilla de las mismas puede ser la siguiente:

- **Panorámicas:** se caracterizan por cubrir superficies muy extensas en una sola exposición, barriendo el terreno de lado a lado en dirección perpendicular a la dirección de vuelo. Su poder de resolución es grande, pero sin embargo no tienen aplicaciones métricas por la dificultad de determinar con precisión las deformaciones geométricas que producen y de calibrar su orientación interna.
- **Multibanda:** están constituidas por un conjunto de cámaras cuyos disparos están sincronizados, obteniendo cada una de ellas una imagen del mismo territorio, aunque con distintas características puesto que la combinación de filtro y película es distinta en cada una de ellas.
- **Convencionales o aerofotogramétricas:** son cámaras cuyo empleo está indicado tanto con fines métricos como con fines de interpretación del significado de la información contenida en la fotografía. Hoy día son consideradas como las cámaras más versátiles, habiendo sido concebidas para su empleo en fotogrametría. Sus objetivos pueden prepararse para respuestas espectrales en la zona infrarroja, por lo que resultan muy útiles en el campo de la fotointerpretación. Estas cámaras, que son las de empleo más generalizado en fotogrametría aérea, las podemos clasificar a su vez:
 - Según el material negativo:
 - **Placa:** la emulsión se dispone sobre un cristal.
 - **Película:** la emulsión se encuentra sobre una película, siendo en la actualidad el material fotográfico de empleo generalizado. Presenta sobre las anteriores la ventaja de permitir una autonomía mayor al vuelo fotogramétrico.
 - Según la distancia focal:
 - **Objetivos normales:** se consideran como tales aquellos que tienen una distancia focal aproximadamente igual a la diagonal del cliché que impresionan, en el caso de las cámaras aéreas en torno a 305 ó 310 mm. Estos objetivos proporcionan imágenes similares a las que

ve el ojo humano. Su ángulo de campo es inferior al de los granangulares.

- **Objetivos granangular:** la distancia focal es menor que la diagonal del cliché. La más frecuentemente adoptada es la de 152 mm (6 pulgadas) y la de 210 mm. Siendo su ángulo de campo mayor que el de los objetivos normales, hace parecer menores los objetos situados a distancia y presenta perspectivas exageradas.
- **Objetivos supergranangular:** son las cámaras aerofotogramétricas de menor distancia focal, usualmente de 88 mm, e incluso de 85 mm. Las cámaras dotadas con estos objetivos cubren más terreno que las anteriores, con el ahorro que esto supone. Por este motivo su empleo es aconsejable en aquellos casos en los que se precisen escalas grandes y equidistancias cortas. Sin embargo, su precisión métrica es inferior.
- **Teleobjetivos:** al contrario que los dos tipos anteriores, estos objetivos tienen distancias focales mayores que las de los objetivos normales, llegando a los 610 mm.

Cámara	Marca	Objetivo	Distancia focal (mm)	Ángulo de campo	Formato
RMK 83/23	Zeiss Oberkochen	S-Pleogon f.4	85	125°	23 X 23
RC9	Wild	Infragon f.5'6	88	120°	23 X 23
RC8	Wild	Aviogon f. 5'6	152	90°	23 X 23
RMK 15/23	Zeiss Oberkochen	Plegon f. 5'6	153	94,5°	23 X 23
MRB 15/1818	Zeiss Jena	Pinatar f. 4	210	55,8°	18 X 18
RMK 30/23	Zeiss Oberkochen	Topar f. 5'6	305	56,7°	23 X 23
RMK A 6/23	Zeiss Oberkochen	Telikon f. 6'3	610	29,7°	23 X 23

En esta tabla se presentan algunos ejemplos de los distintos tipos de objetivos mencionados con anterioridad.

	Superficie cubierta por un fotograma a distintas alturas de vuelo			
Tipo de objetivo	h = 1.000 m	h = 2.000 m	h = 3.000 m	h = 4.000 m
Granangular f = 150 mm	235 ha	940 ha	2.166 ha	3.762 ha
Supergranangular f = 88 mm	683 ha	2.732 ha	6.148 ha	10.930 ha

Superficie cubierta por un fotograma en función de la altura de vuelo y el tipo de lente, en fotografías de 23X23 cm.

- Según el filtro:
 - **Filtrado de longitudes de onda del espectro visible**
 - o **Filtro verde:** aclara los tonos verdes y oscurece los rojos. Estos filtros se emplean por el hecho de que los colores rojo y verde, aun siendo muy distintos para la visión normal, causan un efecto parecido sobre las emulsiones.
 - o **Filtro rojo:** su efecto es inverso al de los filtros verdes.
 - o **Filtro amarillo:** eliminan el efecto de neblina que siempre acusan las fotografías tomadas a distancias grandes debido a la turbidez del aire.
 - o **Filtros anaranjados y rojos:** son filtros muy absorbentes, que se emplean con objetivos muy luminosos y emulsiones muy rápidas con tiempos de exposición breves. Contrarrestan el efecto de falta de transparencia de la atmósfera causado por la neblina.
 - **Filtrado de radiación ultravioleta:** este tipo de filtros debe emplearse en alta montaña, donde el efecto de los rayos UV es más acusado. Son los únicos filtros que pueden usarse con película de color. Se trata de filtros que no causan efectos especiales, limitándose su acción a eliminar la perturbación causada por la radiación U.V. Por este motivo reciben el nombre de filtros “correctores”.
 - **Filtrado de radiación infrarroja:** estos filtros son de color rojo oscuro. Solamente dejan pasar este tipo de radiación. Los filtros amarillos y los rojos también son transparentes a este tipo de

radiación pero, a diferencia de aquéllos, dejan pasar radiación de otras regiones espectrales.

- **Filtros polarizantes:** también son filtros correctores. Su función es eliminar reflejos.

2.3. Geometría del vuelo y de la foto

2.3.1. Diferencia entre fotografía aérea y mapa

Aunque a primera vista puedan parecer similares, entre la fotografía aérea vertical y un mapa, existen importantes diferencias, siendo las más destacables las siguientes:

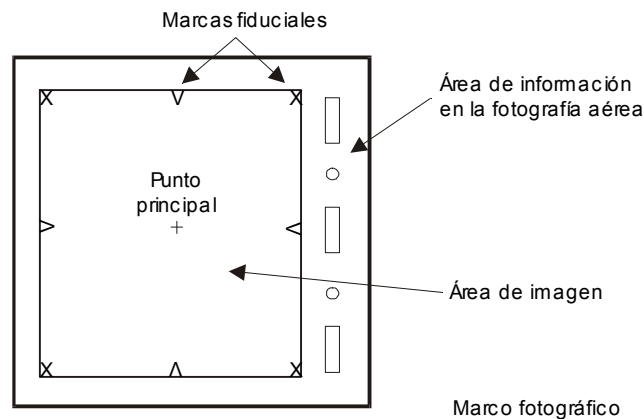
- **Distinto tipo de proyección:** las fotografías tienen una proyección perspectiva lo que supone que los objetos ocupen una situación distinta de la que ocuparían en el terreno, se encuentran desplazados de su posición original. Sin embargo, los mapas tienen una proyección ortogonal, por lo que los elementos aparecen en la verdadera posición que ocupan en el terreno.
- **Distinta escala:** las fotografías aéreas representan el terreno con todas las variaciones de escala, debido a los distintos desniveles. El mapa fija, por convenio, un plano de referencia en donde se establece la escala uniforme y absoluta en todos los puntos con proyección ortogonal.
- **Distinto contenido y representación:** un mapa es una representación abstracta en la que la leyenda es indispensable para entender su contenido. En cambio, una fotografía aérea es una representación real, donde la leyenda tiene menor valor.
- **Distinta orientación:** una fotografía aérea no tiene ningún carácter cartográfico, por lo que inicialmente no tiene posibilidad de ser ubicada y orientada geométricamente. Por el contrario, un mapa posee los caracteres necesarios para su orientación.

2.3.2. Definición de los elementos básicos

El **punto principal** es el punto de intersección sobre la fotografía de un eje perpendicular al plano del terreno. Es el único punto ortogonal dentro de la fotografía.

Es un elemento muy importante, ya que, a partir de él, se empieza la proyección central en la fotografía aérea, y, consecuentemente, el desplazamiento de las imágenes fotográficas. Este desplazamiento de los objetos será mayor, cuanto mayor sea la distancia al punto principal.

Las fotografías cuentan con unas señales impresas (marcas fiduciales) cuya intersección define el punto principal.



La **distancia principal** es una característica de la cámara aérea que se define como la distancia entre el objetivo y el plano del negativo de la fotografía.

La distancia principal determina la magnitud de los desplazamientos en las fotografías, así como la exageración vertical de los objetos sobre el modelo estereoscópico.

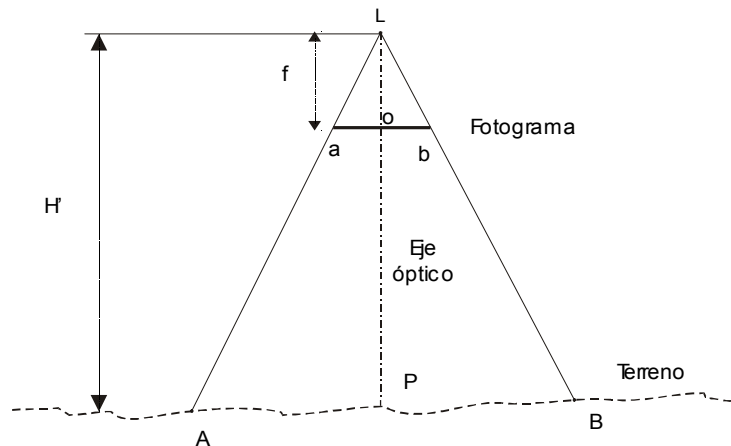
La relación con la altura de vuelo condiciona la escala fotográfica, el área de cobertura y la magnitud de los desplazamientos. Estas relaciones se establecen en los puntos siguientes:

- a) La distancia principal es inversamente proporcional al desplazamiento de las imágenes fotográficas.
- b) A una misma altura de vuelo, la distancia principal es directamente proporcional a la escala fotográfica.
- c) Para obtener una misma escala fotográfica, la distancia principal varía en forma directamente proporcional a la altura de vuelo.” (Herrera, 1987).

2.3.3. Escala de la fotografía

La escala de la fotografía es la relación entre una distancia en la fotografía y la misma distancia sobre el terreno. En una fotografía aérea, la escala varía con las diferentes elevaciones del terreno. Por tanto, la escala sólo será uniforme con respecto a un plano horizontal de referencia, a partir del cual se define dicha escala.

2.3.3.1. Escala de la fotografía aérea sobre terreno llano



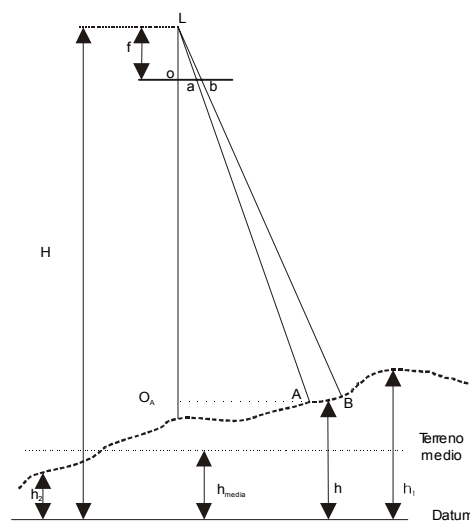
La escala de la fotografía es directamente proporcional a la distancia focal de la cámara e inversamente proporcional a la altura de vuelo sobre el terreno.

$$\frac{ab}{AB} = \frac{f}{H} = \frac{1}{E} = \text{Escala de la fotografía}$$

Siendo E, el módulo de la escala.

2.3.3.2. Escala de la fotografía aérea sobre terreno variable

Cuando varía la elevación del terreno, varía la altura de vuelo sobre el mismo e igualmente varía la escala de la fotografía. Si aumenta la elevación del terreno, disminuye la altura de vuelo y, por tanto, aumenta la escala. Si, por el contrario, disminuye la elevación del terreno, disminuye la escala de la fotografía.



Para una imagen a una altura h:

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

Se puede afirmar que cada punto de la fotografía tiene una escala. Para generalizar el concepto de “escala de la fotografía” se recurre a la escala media.

2.3.3.3. Escala media

Es conveniente definir una escala media de una fotografía tomada sobre un terreno variable. Una escala media es la escala de un terreno, considerando una elevación media, h_m .

A partir de la figura del apartado anterior, se puede expresar:

$$\frac{1}{E_m} = \frac{f}{H - h_m} \quad h_m = \frac{h_1 + h_2}{2}$$

2.3.3.4. Otros métodos de determinación de la escala de la fotografía

Se puede medir, sobre el terreno, la distancia entre varios puntos identificables en la fotografía, para comparar, a continuación, esa distancia sobre la fotografía.

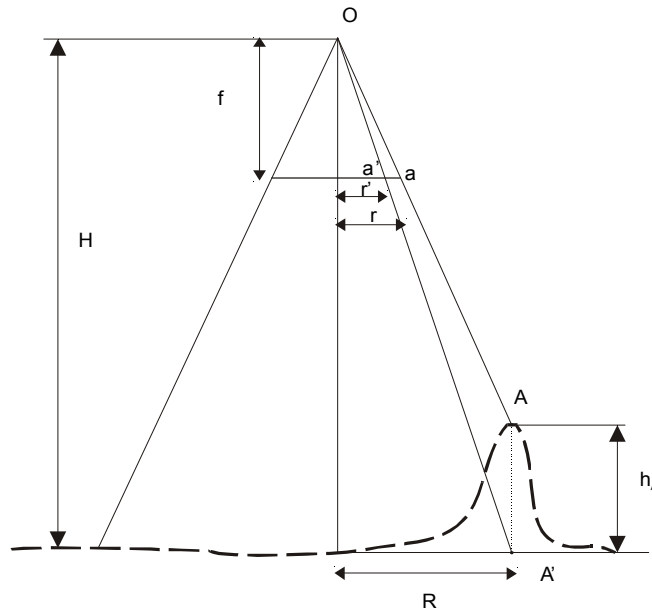
Si existe una cartografía de la zona donde se ha realizado la fotografía, se mide la distancia de dos puntos bien definidos sobre el mapa y sobre la fotografía, de forma que la escala de la fotografía se puede expresar:

$$\frac{1}{E} = \frac{\text{distancia sobre la foto}}{\text{distancia sobre el mapa}} * \text{escala del mapa}$$

También pueden determinarse la escala de la fotografía, tomando como longitudes conocidas que aparezcan sobre la fotografía: campos de fútbol, señales kilométricas,.... Estableciendo una relación entre la distancia real y la distancia sobre el terreno, es posible obtener la escala de la fotografía.

2.3.4. Desplazamiento debido al relieve

La escala de la fotografía es variable en todos los puntos debido a los cambios de relieve. Como consecuencia de esto la altura de un objeto sobre el datum o plano de referencia provoca un cambio en la posición de ese objeto en la fotografía.



La figura representa una fotografía tomada a una altura de vuelo H sobre el datum o plano de referencia, mediante una cámara cuya distancia focal es f . Se ha fotografiado un punto A , cuya altura es h_A , que se sitúa en la fotografía en a . El punto imaginario A' , situado sobre el plano de referencia, es la proyección perpendicular del punto sobre dicho plano que tiene una imagen en la fotografía en el punto a' .

La ecuación del desplazamiento de la imagen es:

$$\left. \begin{aligned} \frac{r}{R} &= \frac{f}{H - h_A} \\ \frac{r'}{R} &= \frac{f}{H} \end{aligned} \right\} \quad \frac{r}{r'} = \frac{H}{H - h_A}$$

$$\frac{r}{r - r'} = \frac{H}{H - H + h_A} = \frac{H}{h_A} \quad \Delta d = r - r'$$

$$\Delta d = \frac{r}{H} \cdot h_A$$

Δd : desplazamiento debido al relieve.

r: distancia desde el punto principal de la fotografía al punto a.

2.3.5. Geometría del vuelo

2.3.5.1. Altura de vuelo de una foto vertical

Como se ha explicado en los apartados anteriores, la altura de vuelo sobre el plano de referencia es un dato importante y necesario para resolver las ecuaciones fotogramétricas básicas.

Para cálculos groseros y a modo de aproximación, la altura de vuelo puede obtenerse directamente de la lectura del altímetro del avión.

Otro método de conocer la altura de vuelo es mediante las ecuaciones de la escala de la fotografía:

$$\frac{l}{E} = \frac{f}{H} = \frac{l}{L} \quad \text{Terreno llano}$$

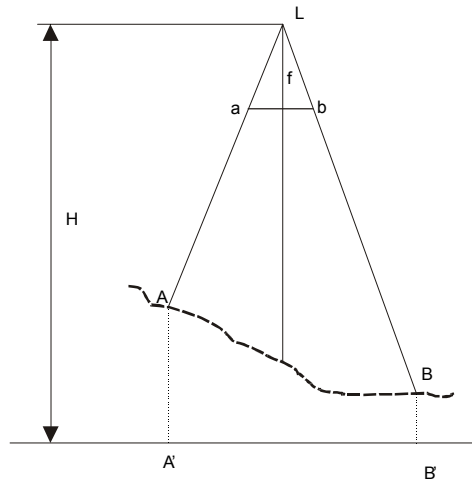
$$\frac{l}{E} = \frac{f}{H-h} = \frac{l}{L} \quad \text{Terreno variable}$$

Para ello es necesario conocer la longitud de una línea sobre la fotografía (l) y la longitud real (L).

De esta manera se consigue obtener alturas exactas en fotografías verticales, siempre que los puntos extremos de la línea escogida se encuentren a la misma altura. Es necesario conocer que cuanto mayor diferencia de altura exista entre los puntos extremos, mayor será el error con que se calculará la altura de vuelo H .

En el caso de que los puntos extremos difieran en su altura, se puede obtener un valor exacto de la altura de vuelo, si dichos puntos se encontraran en una posición equidistante del punto principal y sobre una línea que pasara sobre este punto principal.

El procedimiento más fiable para la determinación de la altura de vuelo es a partir de las altitudes de dos puntos y sus coordenadas (X,Y) sobre el terreno.



En la figura, la línea sobre el suelo AB, tiene como imagen en la fotografía la línea ab. La longitud AB puede expresarse por el Teorema de Pitágoras como:

$$(AB)^2 = (X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2$$

Sabiendo que:

$$X_P = x_p * \frac{(H - h_p)}{f} \qquad Y_P = y_p * \frac{(H - h_p)}{f}$$

Se sustituye:

$$AB^2 = \left(\frac{x_b}{f} * (H - h_B) - \frac{x_a}{f} * (H - h_A) \right)^2 + \left(\frac{y_b}{f} * (H - h_B) - \frac{y_a}{f} * (H - h_A) \right)^2$$

En esta ecuación son conocidos todos los valores salvo H, de modo que se puede reducir a una ecuación de 2º grado en H, de la forma: $aH^2 + bH + c = 0$, y obtener así el valor de H.

También es posible resolver la ecuación anterior por tanteos, a partir de:

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

Se obtiene un valor H_1 , que introducido en la ecuación principal da un valor AB_1 . Este valor se compara con la longitud real AB , si no concuerdan se calcula un nuevo valor H_2 , de la forma:

$$H_2 = \frac{AB}{AB_1} * (H_1 - h_{AB}) + h_{AB}$$

A partir de aquí se vuelve a repetir el proceso, hasta encontrar un valor suficientemente aproximado de AB . Se estima esa aproximación en 30 cm.

2.3.5.2. Solapes o recubrimientos

En cada pasada que se realiza en el vuelo fotogramétrico, la cámara hace fotografías del terreno con un tiempo entre ellas, tal que, la distancia entre los puntos principales de dos fotografías consecutivas, permite la existencia de un solape o recubrimiento longitudinal fijado de antemano.

Además, entre las pasadas adyacentes, normalmente con sentido contrarios, también se debe buscar un recubrimiento transversal, igualmente fijado de antemano.

La finalidad de estos recubrimientos es la posibilidad de aplicar la visión estereoscópica y obtener, de este modo, un modelo estereoscópico en la parte solapada de dos fotografías consecutivas, pudiendo enlazarse este modelo tanto en sentido longitudinal como transversal.

Como valores orientativos, los organismos estatales han adoptado los siguientes:

Tipo de terreno	Recubrimiento %	
	<u>Longitudinal</u>	<u>Transversal</u>
Llano	60	25
Ondulado	65-70	25-30
Montañoso	70-80	30-35

Pliegos de Prescripciones Técnicas para la ejecución de trabajos fotogramétricos. Dirección General de Obras Hidráulicas. Ministerio de Fomento.

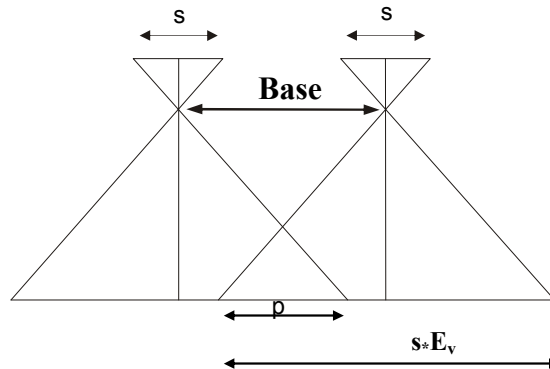
De todos modos, según el tipo de vuelo fotogramétrico y el documento que se quiera obtener a partir de él, se especifican unos valores particulares de los recubrimientos, que vienen recogidos en el Pliego de Condiciones que acompaña al proyecto de vuelo.

2.3.5.3. Otras definiciones

Base aérea: es la distancia en el aire, entre dos fotografías consecutivas.

$$s * (1 - p\%)E_v$$

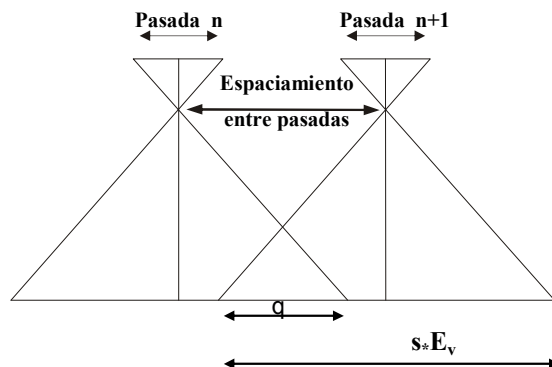
s: lado del fotograma
E: escala del fotograma
p: recubrimiento longitudinal



Espaciamiento entre pasadas: es la distancia entre las líneas de vuelo de dos pasadas adyacentes.

$$s * (1 - q\%)E_v$$

q: recubrimiento transversal



Tiempo entre dos fotografías consecutivas: $t = \frac{B}{v}$

v: velocidad del avión

Arrastre de la imagen: es una pérdida de nitidez de la fotografía

$$m = v * t' * E \qquad t': \text{ tiempo de exposición}$$

Debe ser inferior a 0,03 mm, aunque en casos donde se requiera aumentar el tiempo de exposición o para escalas mayores de 1:5000 se puede llegar hasta 0,09 mm.

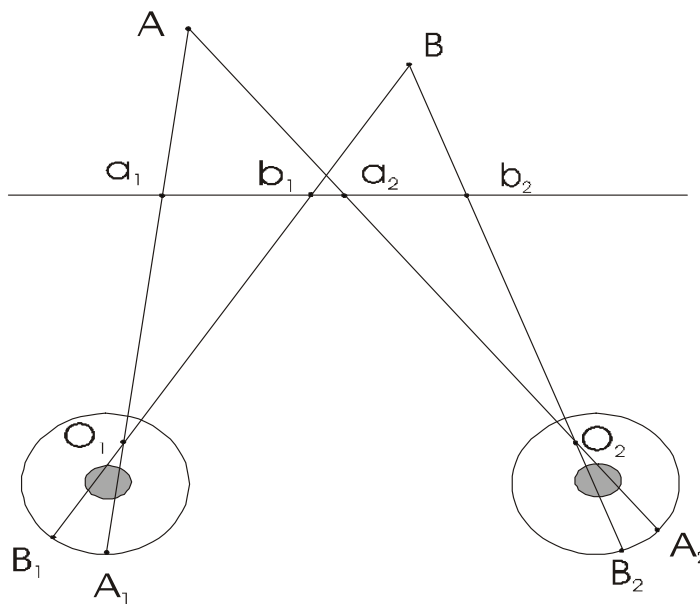
2.4. Visión Estereoscópica. Paralaje

2.4.1. Definición

Estereoscopia es la ciencia que trata con modelos tridimensionales y los métodos por los cuales este efecto se produce.

La visión estereoscópica se obtiene mediante la observación de dos imágenes de la misma escena, fotografiada desde dos puntos de vista diferentes, bajo unas ciertas condiciones, consiguiendo así una visión en 3 dimensiones.

Para obtener una visión estereoscópica correcta, cada ojo debe visualizar únicamente la imagen que le corresponde, además los rayos ópticos de los puntos homólogos deben intersectarse.



Las imágenes tridimensionales de los puntos homólogos aparecen en los puntos de intersección de los rayos respectivos.

Con la visión estereoscópica se busca un efecto de relieve y otro de apreciación de distancias, de forma que, a partir de dos fotogramas, sea posible reconstruir un modelo donde poder realizar mediciones en altimetría y planimetría.

2.4.2. Procedimiento de obtención del modelo estereoscópico

Para obtener un modelo estereoscópico de una escena, es necesario disponer de un par de fotografías aéreas de la escena, tomadas desde dos puntos distintos. Este par de fotografías habrá sido tomado a una altura de vuelo H y a una distancia entre disparos B (base aérea).

Si se disponen las fotografías en una mesa y se observan en las condiciones expuestas anteriormente, aparece una impresión tridimensional de la escena.

Se llama ángulo paraláctico al ángulo formado por los rayos homólogos; se define como par estereoscópico al par de fotografías superpuestas de la misma escena.

Es usual que la mayoría de las fotografías se tomen de forma que cada una cubra al menos el 60% de la superficie cubierta por la fotografía anterior. El efecto estereoscópico se podrá conseguir en la zona común a las fotografías (zona de recubrimiento). La profundidad del efecto estereoscópico aumenta con la distancia entre disparos de las fotografías, es decir, con la base aérea.

2.4.2.1. Factores que influyen en el modelo

Existen factores que hacen más difícil la obtención de una visión estereoscópica; esos factores pueden originarse durante el vuelo o pueden aparecer si se cometen errores mientras se orienta el modelo.

Los factores originados durante el vuelo son:

- **Fotografías con escalas diferentes:** se produce cuando la altura de vuelo, considerada sobre el terreno, no se mantiene constante.
- **Fotografías de zonas muy inclinadas:** provocan que los ejes ópticos de la cámara no se mantengan en el mismo plano.
- **Fotografías con una deriva excesiva entre ellas.**

Los errores originados en el proceso de orientación del modelo se pueden minimizar mejorando la manipulación de los instrumentos de orientación.

Existen otros factores que inciden en la exageración de la escala vertical del modelo estereoscópico, dicha escala vertical es mayor que la escala horizontal.

Estos factores son:

- Base aérea (B): cuanto mayor sea la distancia entre disparos, mayor será la sensación de profundidad en el modelo estereoscópico.
- Distancia focal del estereoscopio (d): cuanto mayor sea la distancia focal, mayor será la exageración de la escala vertical.
- Altura de vuelo (H): el efecto estereoscópico será menor, cuanto mayor sea la altura de vuelo.

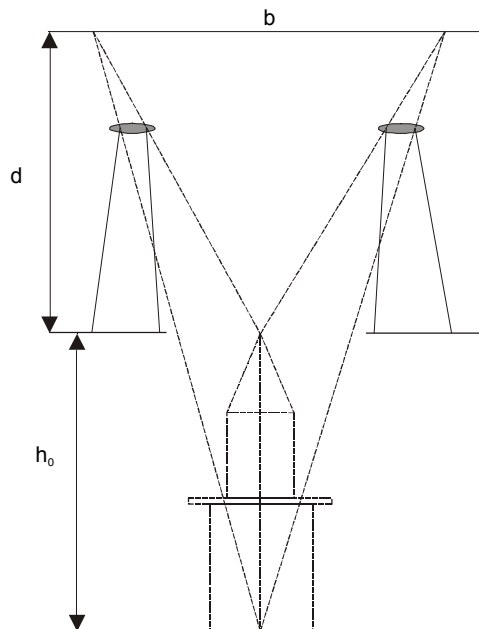
- Base del modelo (b) o distancia interpupilar del observador: aunque pueda parecer extraño, las personas con los ojos más juntos obtienen una mejor visión estereoscópica que aquellos con los ojos más separados.

Si se define la exageración de la escala vertical como V:

$$V = \frac{B}{H} \frac{d}{b}$$

Para eliminar la exageración vertical y obtener así una visión ortoestereoscópica, se tiene que cumplir:

$$\frac{B}{H} = \frac{d}{b}$$



“Para fotografías granangulares, formato 23x23 cm. y recubrimiento longitudinal del 60 por 100, la razón B/H es aproximadamente de 0,6. El valor medio de b es de 65 mm, y el de d, por numerosos test realizados, se estima en 430 mm, con lo

cual la razón b/d toma el valor medio de 0,15. Luego la exageración del relieve para las condiciones de vuelo anteriormente enunciadas, es del orden de $V=4$, aproximadamente” (López- Cuervo,1980).

2.4.2.2. Tipos de estereoscopios

Existen dos tipos principales de estereoscopio:

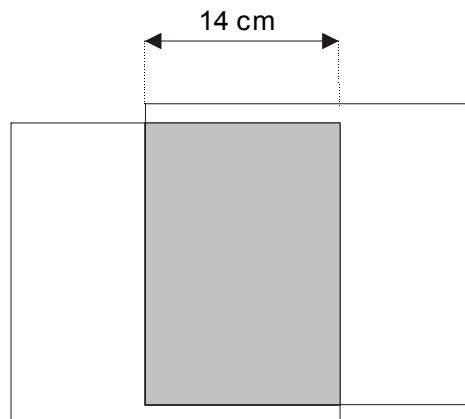
- Estereoscopios de refracción, de lentes o de bolsillo.
- Estereoscopios de reflexión o de espejos.

Los estereoscopios de refracción están formados por dos lentes convexas, con una misma distancia focal, cuya separación entre ellas puede estar fija en los 65mm, o puede ser variable entre 55 – 75 mm, para adaptarse a distintas distancias interpupilares.

Estas lentes están sujetas por una montura que lleva unas patas desmontables. Forman un conjunto fácilmente transportable, incluso en trabajos de campo.

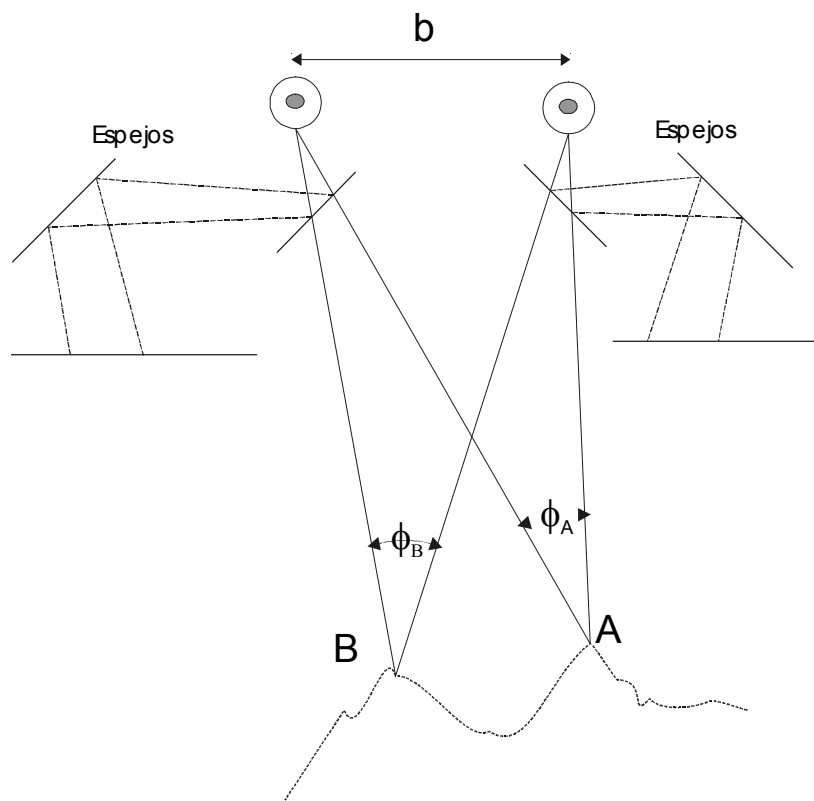
La observación de las fotografías es directa, de forma que la distancia de visión es ligeramente menor que la distancia focal de las lentes. De este modo, se provoca que los rayos de puntos homólogos converjan cuando pasan por las lentes, provocándose así un esfuerzo de convergencia. Por tanto, para que la visión estereoscópica sea más cómoda. se recomienda que la distancia entre puntos homólogos sea menor que la distancia interpupilar.

El principal inconveniente de estos estereoscopios es que con el formato usual de las fotografías aéreas de 23x23 cm , el solapamiento habitual de 14 cm (60%) no puede verse de una vez, y aparece una zona oscura, como se muestra en la figura.



Para solucionar estos problemas aparecen los estereoscopios de espejos de reflexión.

Los estereoscopios de reflexión o de espejos tratan de subsanar los problemas planteados en los estereoscopios de refracción. Para ello se acoplan unos espejos orientados a 45°, que aumentan la distancia interpupilar, lo que posibilita que se vea todo el modelo estereoscópico simultáneamente.



La distancia focal de las lentes es ligeramente superior a la longitud del rayo reflejado desde la fotografía hasta el ojo.

Existe una mejora de este tipo de estereoscopios, en la cual al estereoscopio de reflexión se le adapta otro juego de lentes, con varias posibilidades de aumento. Tiene como desventaja que, al usar aumentos, se produce una concavidad en la imagen y una deformación en el plano de observación ya que no se mantiene paralelo al plano de las fotografías.

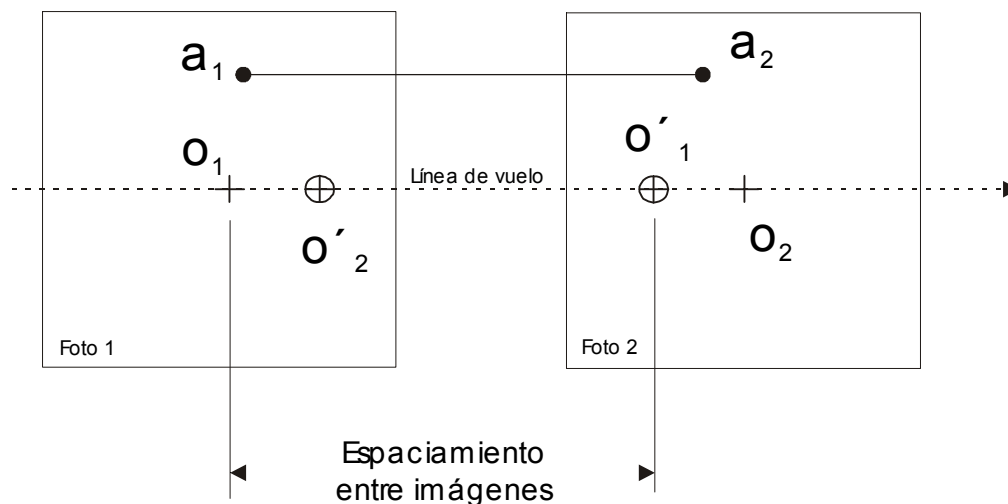


2.4.2.3. Uso del estereoscopio

En el proceso de obtención de un modelo estereoscópico, se debe ser cuidadoso tanto en el manejo de las fotografías como del estereoscopio, ya que cualquier imprecisión puede dificultar la visión estereoscópica.

Es importante situar bien las fotografías de forma que cada ojo vea la fotografía que la corresponde: la fotografía izquierda se ve con el ojo izquierdo y la fotografía derecha se ve con el ojo derecho. Si las imágenes se observaran cambiadas, se obtendría una visión pseudoscópica, en la que las montañas aparecerían hundidas y los valles elevados.

También se requiere que la línea definida por las pupilas de los ojos, la línea que une los centros de las lentes del estereoscopio y la línea de vuelo sean paralelas. La línea de vuelo es la línea que une los puntos principales de cada fotografía, es decir, une los centros de las fotografías. Los puntos principales se localizan uniendo las marcas fiduciales de los lados de la fotografía.



Se llaman puntos principales conjugados a la localización de los puntos principales de una fotografía en la siguiente.

Para orientar las fotografías, se coloca primero la fotografía izquierda y luego se orienta la fotografía derecha de forma que las líneas de vuelo de ambas fotografías formen una línea recta. Después, la fotografía derecha se debe mover según esa línea recta, hasta obtener una visión estereoscópica correcta.

2.4.3. Paralaje

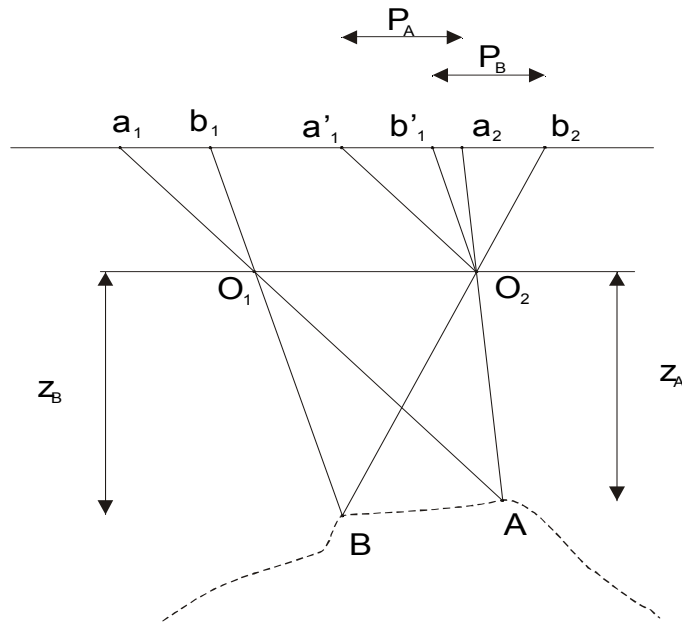
2.4.3.1. Definición y medida

La paralaje es el desplazamiento de la posición de un objeto en dos fotografías consecutivas, causado por un cambio en la posición de la cámara al realizar los disparos.

Se puede dividir en dos componentes:

- Paralaje vertical (P_Y): se anula al orientar correctamente el par estereoscópico.
- Paralaje horizontal (P_X): directamente relacionada con la elevación de los objetos.

Las variaciones de paralaje debidas a la elevación, permiten determinar la altura de los objetos mediante las fórmulas de la paralaje.



A mayor proximidad al objetivo, mayor paralaje.

$$P = \frac{B \cdot f}{Z} = \frac{B \cdot f}{H - h}$$

Si se considera la paralaje para dos puntos A y B y en ambas expresiones se despeja h, se obtiene la expresión que proporciona el desnivel entre los dos puntos:

$$h_A = H - \frac{B \cdot f}{P_A} \qquad h_B = H - \frac{B \cdot f}{P_B}$$

$$h_{BA} = h_B - h_A = \left(H - \frac{B \cdot f}{P_A} \right) - \left(H - \frac{B \cdot f}{P_B} \right) = \frac{B \cdot f}{P_A} - \frac{B \cdot f}{P_B} =$$

$$= B \cdot f \left(\frac{P_A - P_B}{P_{AB}} \right)$$

$$P_{AB} = P_B - P_A$$

$$P_B = P_{AB} + P_A$$

$$h_{BA} = B \cdot f \frac{P_{BA}}{P_A \cdot (P_{BA} + P_A)}$$

$$P_A = \frac{B \cdot f}{H - h_A} \rightarrow B \cdot f = P_A \cdot (H - h_A)$$

$h_{BA} = \frac{H - h_A}{P_{BA} + P_A} \cdot P_{BA}$
--

2.4.3.2. Ecuaciones de la paralaje

Conociendo la situación de un punto del terreno sobre dos fotografías consecutivas, se pueden obtener sus coordenadas X, Y, Z.

Por triángulos semejantes:

$$\frac{Z}{f} = \frac{B}{P} \longrightarrow Z = \frac{B \cdot f}{P}$$

$$\frac{X}{x_1} = \frac{Z}{f} \longrightarrow X = x_1 \cdot \frac{Z}{f}$$

$$\frac{Y}{y_1} = \frac{Z}{f} \longrightarrow Y = y_1 \cdot \frac{Z}{f}$$

Siendo:

P: paralaje
 B: base aérea
 x_1, y_1 : coordenadas en la fotografía
 f: distancia focal

2.4.3.3. Causas de error en la paralaje y su corrección

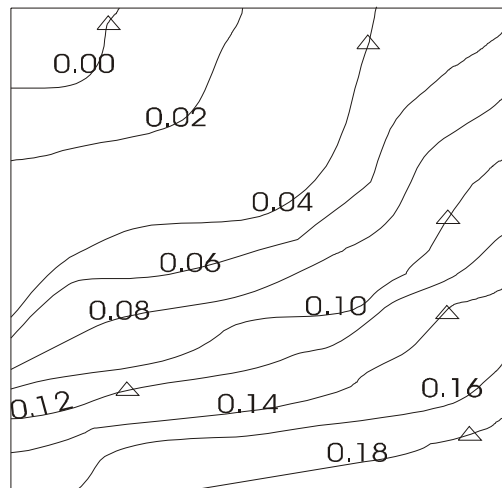
En todos los procesos descritos en este capítulo, se pueden producir, inevitablemente, errores. Es importante ser consciente de ellos y reducir al máximo su magnitud.

Algunas de las fuentes de error son (López Cuervo, 1980):

- Localización y marcado de las líneas de vuelo en las fotografías.
- Incorrecta orientación del modelo: existe una paralaje en Y.
- Medida de la paralaje.
- Medidas de las coordenadas en la fotografía.
- Reducción o exageración de las fotografías.
- Distintas alturas de vuelo en las fotografías del par estereoscópico.
- Inclinación de las fotografías.
- Otros errores de menor importancia: distorsiones en las lentes o en el papel fotográfico.

Los errores en altura que aparecen debido a deformaciones en el modelo, pueden subsanarse con el siguiente proceso:

- Se mide, sobre la fotografía, de la paralaje correspondiente a los puntos de cota conocida.
- Se calculan estas paralajes por medio de ecuaciones.
- Se establecen las diferencias de paralaje $\delta_p = P_{\text{calculado}} - P_{\text{medido}}$
- Se construye, en papel transparente, un mapa con las diferencias de paralaje (δ_p) de los puntos de apoyo y se interpolan unas curvas de igual corrección de paralaje.

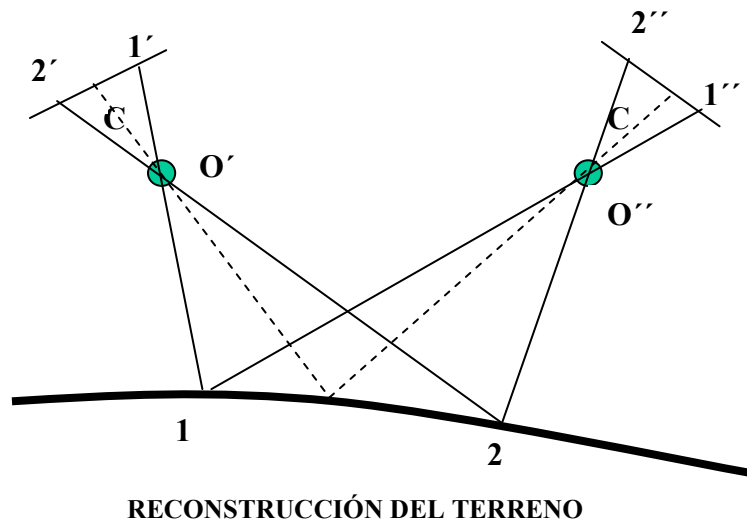


Para no cometer errores en la extrapolación, los puntos de apoyo altimétrico deben estar distribuidos lo más uniformemente posible en el modelo.

2.5. El método general de la fotogrametría

2.5.1. Introducción

Como ya es sabido mediante los procedimientos propios de la Fotogrametría aérea se pretende extraer datos e información precisa a partir de pares de fotografías aéreas verticales, “reconstruyendo el terreno”.



Los resultados de esta metodología, que incluyen la transformación de la proyección cónica del terreno (la fotografía) en una ortogonal, permiten la determinación cuantitativa, según los objetivos y métodos empleados, de magnitudes geométricas como pueden ser coordenadas, longitudes, superficies, determinación de modelos digitales del terreno (MDT), volúmenes, elaborar planos y levantamientos topográficos de una parte de la superficie terrestre.

Este planteamiento de partida presupone conocer conceptos propios de la geometría descriptiva, y nociones matemáticas. Por ello se van a repasar a continuación algunos que se encuentran directamente vinculados a posteriores análisis de este tema.

Analizando la figura 1, tenemos:

- P: punto de vista.
- S: superficie o área analizada.
- A_i : puntos sobre la superficie del terreno.
- PA_i : rayo perspectivo, cada una de las semirrectas definidas. Al conjunto finito o infinito de semirrectas se denomina haz perspectivo.

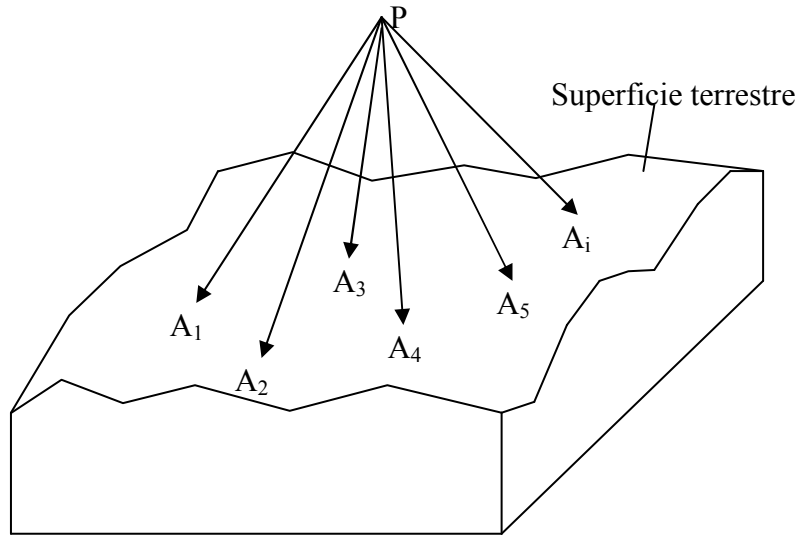


Fig. 1.-

Con este sencillo planteamiento el haz perspectivo queda determinado si se conoce el punto de vista y la superficie, sin embargo el conocimiento del haz y del punto P no permite definir por sí mismos la superficie S.

Con el fin de resolver esta circunstancia problemática se va a considerar la intersección de dos haces perspectivos, respecto de dos puntos perspectivos $P_1 (X_1, Y_1, Z_1)$ y $P_2 (X_2, Y_2, Z_2)$. A cada punto A_i le corresponderán dos rayos, desde P_1 y P_2 únicos denominados rayos homólogos (véase figura 2).

Si OXYZ es un sistema de referencia ortogonal, podemos referir a éste los puntos del terreno y los puntos de vista P_1 y P_2 . Además los haces perspectivos que definen los puntos de vista y los distintos puntos considerados sobre el terreno, se pueden calcular fácilmente como las rectas que pasan por estos puntos.

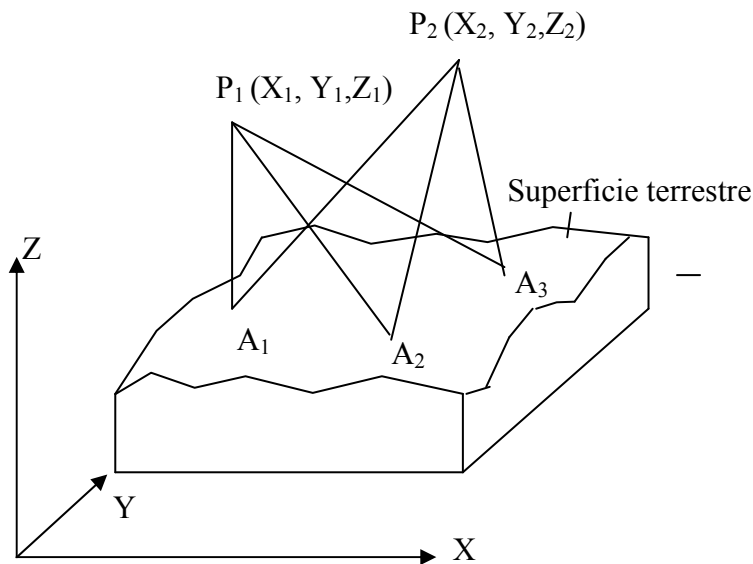


Fig. 2.- Haces perspectivos con dos puntos de vista.

Sin embargo lo que realmente interesa es a partir de los haces perspectivas definir la superficie como el conjunto de intersecciones de rayos homólogos, para lo cual será preciso tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Cada haz perspectivo tiene una configuración propia, es decir la posición relativa de los diferentes rayos que pueden ser definidos por “datos externos”, no dependen de consideraciones externas ni del sistema de referencia adoptado.
- En el caso de definir un sistema convencional de referencia, la posición de cada haz se podrá referir a este, como el sistema elegido es ajeno al propio haz, a estos datos se les denomina “externos”.
- Los rayos homólogos se han de definir sin ambigüedad, de hecho como se verá más adelante, en la orientación relativa, estos rayos son además coplanarios.

Para la resolución de estos tres problemas:

- Determinación de datos internos.
- Determinación de datos externos.
- Identificación de rayos homólogos.

Se dice que se ha aplicado el **Método General de la Fotogrametría** y la determinación de los elementos que intervienen en la proyección se reduce básicamente a un problema geométrico de intersecciones de rayos homólogos.

Existen diferentes metodologías asociadas a los diferentes procedimientos empleados, así como a los instrumentos utilizados, los más comunes son analógicos (gráficos y mecánicos), analíticos (matemáticos) y modernamente los digitales.

Los procedimientos de reconstrucción de los haces perspectivas, que han impresionado los fotogramas, y la determinación de la intersección de los rayos homólogos se denomina Restitución, que es por tanto la operación inversa a la perspectiva. A los instrumentos empleados en estas operaciones se denominan restituidores, equipos sometidos a una constante renovación tecnológica.

2.5.2. Entrando en materia

Tras analizar algunas nociones básicas de perspectiva y el planteamiento general del problema, resulta conveniente revisar algunos conceptos propios de la fotografía aérea para definir el haz perspectivo a partir de sus datos internos.

En primer lugar el objetivo fotográfico de la cámara no actúa como un punto de vista adimensional, por ello al atravesar este dispositivo se produce una modificación del haz perspectivo entrante que da lugar a otro saliente (figura 3).

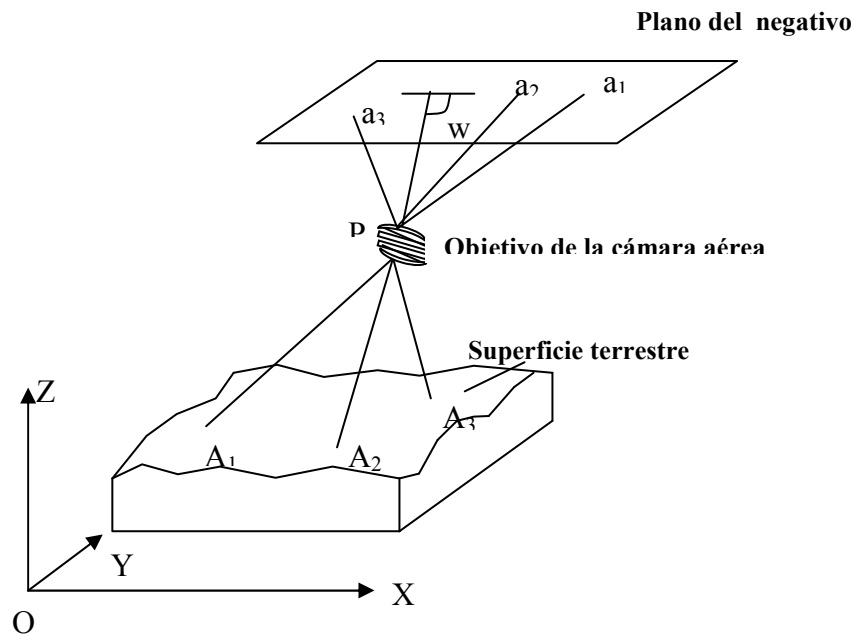


Fig. 3.- El objetivo fotográfico provoca la mmmmmm del haz perspectivo.

En la figura:

- Eje principal. Definido por la recta perpendicular desde P al plano del cuadro.
- Punto principal (w): intersección del eje principal y el plano.
- A cada rayo PA_i entrante le corresponde otro Pa_i saliente.
- Distancia principal (f): determinada por la longitud del segmento Pw (eje principal).
- En el objetivo se producen distorsiones por lo que los ángulos A_1PA_2 no coinciden con a_1Pa_2 .

El haz perspectivo saliente se define en función de los elementos internos: punto principal w y el punto de vista. El haz perspectivo entrante se reconstruye a partir del saliente si se conoce la función de distorsión, obtenido a partir del ángulo de salida.

Los elementos internos son por tanto:

- La distancia principal.
- La posición del punto principal.
- La función de distorsión.

La determinación rigurosa de estos elementos o parámetros internos constituye, en definitiva, el primer objetivo de la Restitución Fotogramétrica.

Para resolver el problema de reconstruir un objeto a partir de la fotografía del terreno (pares estereoscópicos) es preciso recurrir a un proceso combinado de restitución que contemple las operaciones correlativas siguientes, según los siguientes métodos:

- Método 1: orientación interna + orientación relativa + orientación absoluta.

- Método 2: orientación interna + orientación exterior.

En el análisis de aproximaciones sucesivas del método general de la Fotogrametría resulta preciso señalar la existencia de tres sistemas de referencia empleados habitualmente, como son:

- Sistema de coordenadas de la fotografía.
- Sistema de coordenadas del modelo estereoscópico.
- Sistema de coordenadas del terreno.

En el caso de emplear un fotograma aislado en el que las marcas fiduciales permiten definir un punto origen o de referencia (punto principal) y un sistema rectangular bidimensional de referencia sobre este punto (figura 4),

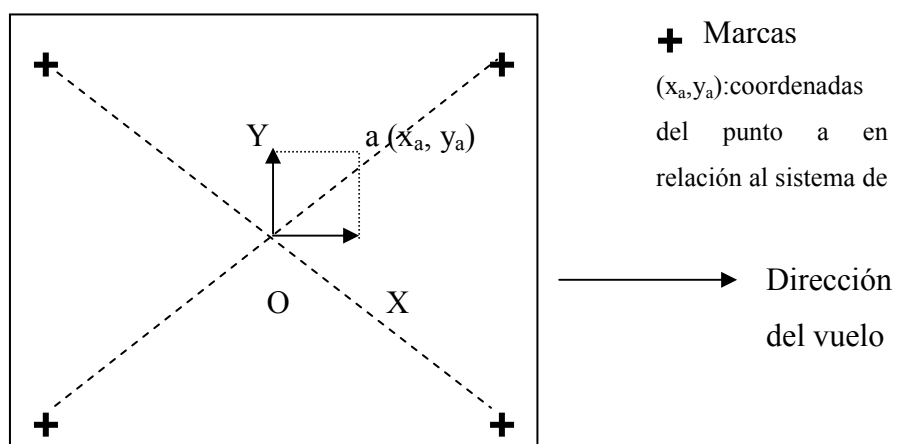


Fig. 4. - Sistema de coordenadas de la fotografía.

Si a este sistema de referencia se le añade un tercer eje perpendicular al plano definido por los anteriores y con idéntico origen (O) quedará definido el sistema de referencia tridimensional cuyos ejes se denominan ejes de la imagen o de la fotografía.

En la figura adjunta (Figura 5) se han representado los sistemas de referencia en los planos de la imagen en el negativo y en el positivo (una vez revelado).

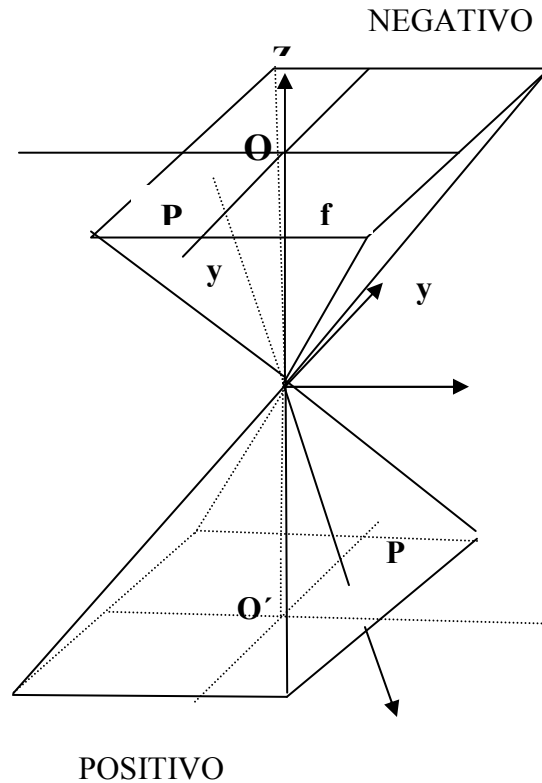


Fig. 5- . Sistemas de coordenadas del negativo y positivo (revelado).

- O (x_0, y_0, z_0) es el centro de proyección.
- O' El punto principal ($x_0, y_0, -f$).
- Coordenadas de un punto P en la imagen (positivo): ($x, y, -f$).
- f: distancia principal.

Respecto a este sistema de referencia tridimensional se han de plantear las tres rotaciones angulares ω , φ , κ alrededor, respectivamente, de los ejes fijos x, y, z, conocidos como:

- ω : rotación primaria (sobre x).
- φ : rotación secundaria (sobre y).
- κ : rotación terciaria (sobre z).

Donde x', y', z' , definen los ejes en el sistema rotado (figura 6).

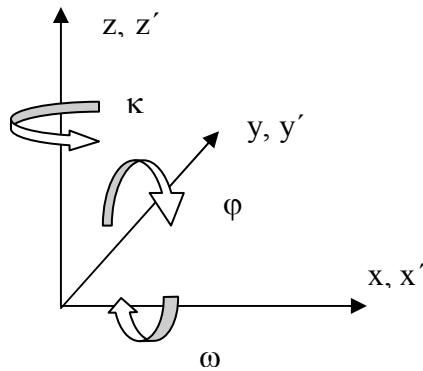


Fig. 6.- Rotaciones angulares.

Si expresamos naturalmente las convergencias de los tres posibles giros:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\text{donde } A = \begin{bmatrix} \cos xx' & \cos yx' & \cos zx' \\ \cos xy' & \cos yy' & \cos zy' \\ \cos xz' & \cos yz' & \cos zz' \end{bmatrix}$$

o bien

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos x'x & \cos y'x & \cos z'x \\ \cos x'y & \cos y'y & \cos z'y \\ \cos x'z & \cos y'z & \cos z'z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

Como la matriz A es ortogonal se cumple que $A^{-1}=A^T$ y por tanto:

$$\text{Si } \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix}$$

Sin embargo el manejo y cálculo de los cosenos directores de la matriz A no resulta operativo en la práctica, por ello será conveniente relacionar estos elementos matriciales con los valores angulares de las tres rotaciones ω , φ , κ para obtener la matriz equivalente de transformación.

Con el fin de analizar cada una de las rotaciones en sentido positivo, se van a analizar de manera independiente, sobre un punto teórico P, considerando que los sistemas de referencia fijo x, y, z y los rotados x', y', z' son inicialmente coincidentes.

Rotación ω : En este caso observando la figura adjunta se obtiene fácilmente:

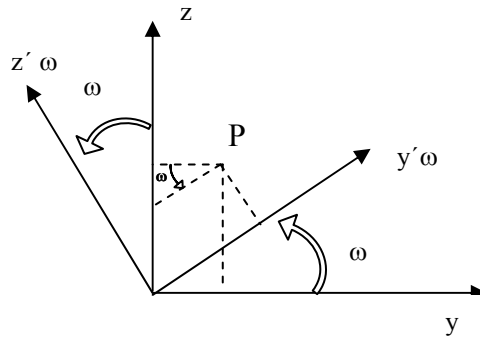


Fig. 7.- Rotación ω , el eje x - x'.

$$\begin{aligned} x'_{\omega} &= x \\ y'_{\omega} &= y \cos \omega + z \operatorname{sen} \omega \\ z'_{\omega} &= -y \operatorname{sen} \omega + z \cos \omega \end{aligned}$$

En forma matricial:

$$\begin{bmatrix} x'_{\omega} \\ y'_{\omega} \\ z'_{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \operatorname{sen} \omega \\ 0 & -\operatorname{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad \text{ó} \quad \begin{bmatrix} x'_{\omega} \\ y'_{\omega} \\ z'_{\omega} \end{bmatrix} = A_{\omega} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

De manera semejante para las rotaciones φ y κ :

$$\begin{bmatrix} x'_{\varphi} \\ y'_{\varphi} \\ z'_{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\operatorname{sen} \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \operatorname{sen} \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A_{\varphi} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x'_{\kappa} \\ y'_{\kappa} \\ z'_{\kappa} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \kappa & \text{sen} \kappa & 0 \\ -\text{sen} \kappa & \cos \kappa & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A_{\kappa} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Con las expresiones anteriores considerando simultáneamente el efecto de las tres rotaciones se tendrá:

$$\begin{bmatrix} x'_{\omega\varphi\kappa} \\ y'_{\omega\varphi\kappa} \\ z'_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = A_{\omega} A_{\varphi} A_{\kappa} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix}$$

Donde si realizamos el producto matricial expresado se obtiene que:

$$A = \begin{bmatrix} \cos \kappa \cos \varphi & \text{sen} \kappa \cos \omega + \text{sen} \varphi \cos \kappa \text{sen} \omega & \text{sen} \kappa \text{sen} \omega - \text{sen} \varphi \cos \kappa \cos \omega \\ -\text{sen} \kappa \cos \varphi & \cos \kappa \cos \omega - \text{sen} \kappa \text{sen} \varphi \text{sen} \omega & \cos \kappa \text{sen} \omega + \text{sen} \kappa \text{sen} \varphi \cos \omega \\ \text{sen} \varphi & -\text{sen} \omega \cos \varphi & \cos \varphi \cos \omega \end{bmatrix}$$

teniendo además en cuenta que A es una matriz ortogonal

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x'_{\omega\varphi\kappa} \\ y'_{\omega\varphi\kappa} \\ z'_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} x'_{\omega\varphi\kappa} \\ y'_{\omega\varphi\kappa} \\ z'_{\omega\varphi\kappa} \end{bmatrix}$$

Sin embargo este procedimiento metodológico, aunque resulta claro, no es adecuado tampoco para relacionar las coordenadas de la fotografía con sus correspondientes puntos del terreno, si bien la definición de la matriz anterior (A) resulta de gran importancia como se verá más adelante.

Por ello, es preciso recurrir a dos condiciones fundamentales para resolver el problema: las condiciones de colinealidad y coplanariedad que a continuación se desarrollan.

2.5.2.1. Condición de colinealidad

Si consideramos como sistemas de referencia de la fotografía (x',y',z'), con origen en O' , del terreno (x, y, z) y un tercero definido por (u, v, w) cuyos ejes son paralelos al sistema de referencia del terreno con origen el centro de proyección O' (véase figura 8).

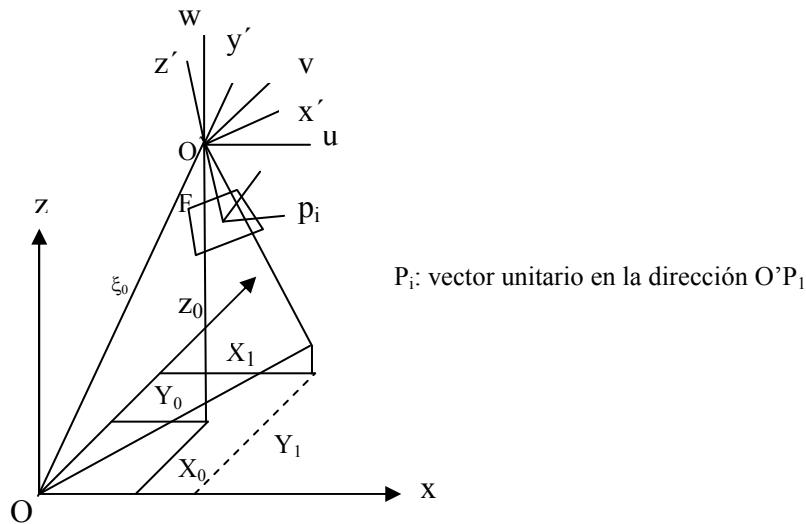


Fig. 8. Condición de colinealidad.

Se observa que el plano definido por los ejes $x'y'$ es paralelo al de la fotografía y el eje z' contiene al punto principal de la misma.

En estas circunstancias cualquier punto de la fotografía se puede expresar como: ($x',y',-f$).

Si las coordenadas de un punto imagen se representan con su expresión vectorial, la del punto del terreno P por el vector $\bar{\varepsilon}_i$ y la del centro O' por $\bar{\varepsilon}_0$ se puede obtener la ecuación:

$$\bar{\varepsilon}_i = \bar{\varepsilon}_0 + \lambda_i \bar{p}_i' \quad \bar{p}_i' : \text{vector en el sistema } u,v,w.$$

λ_i : factor de escala.

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} + \lambda_i \begin{bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{bmatrix}$$

El factor de escala λ_i es:

$$\lambda_i = \frac{|\varepsilon_i - \varepsilon_0|}{|P_i|} = \frac{|O'P_i|}{|O''P_i|} = \frac{\sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2 + (z_i - z_0)^2}}{\sqrt{x_i'^2 + y_i'^2 + f^2}}$$

P_i' se puede determinar directamente en el sistema de la imagen, si lo referimos al sistema del terreno (u,v,w) supone establecer una transformación semejante a la establecida con anterioridad.

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{bmatrix} \quad \text{por tanto} \quad \begin{bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{bmatrix} = A^{-1} \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} x' \\ y' \\ -f \end{bmatrix}$$

Como:

$$\begin{bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} x_i - x_0' \\ y_i - y_0' \\ z_i - z_0' \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_i} A \begin{bmatrix} x_i - x_0' \\ y_i - y_0' \\ z_i - z_0' \end{bmatrix} \quad \text{de donde:}$$

$$\begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ -f \end{bmatrix} = \frac{1}{\lambda_i} \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i - x_0' \\ y_i - y_0' \\ z_i - z_0' \end{bmatrix}$$

siendo a_{ij} los elementos de la matriz A de rotación.

Despejando x_i' y_i' y eliminando λ obtenemos:

$$x_i' = -f \frac{a_{11}(x_i - x_0') + a_{12}(y_i - y_0') + a_{13}(z_i - z_0')}{a_{31}(x_i - x_0') + a_{32}(y_i - y_0') + a_{33}(z_i - z_0')}$$

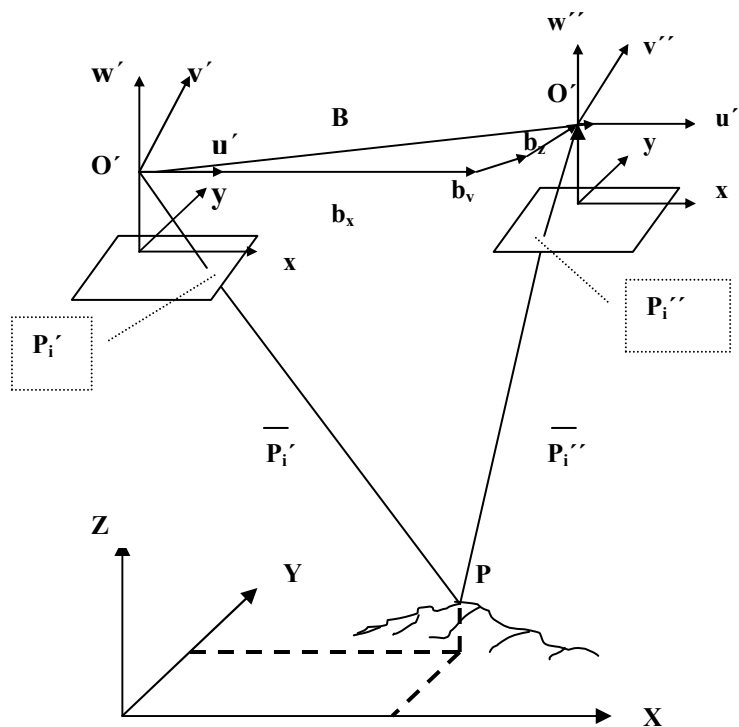
$$y_i' = -f \frac{a_{21}(x_i - x_0') + a_{22}(y_i - y_0') + a_{23}(z_i - z_0')}{a_{31}(x_i - x_0') + a_{32}(y_i - y_0') + a_{33}(z_i - z_0')}$$

Expresiones conocidas como **ecuaciones de colinealidad** lo que supone que el vector $O''P_i'$ y el vector $O''P_i$ son colineales, lo que en definitiva supone que los vectores $O''P_i'$ estarán en la misma línea que sus correspondientes $O''P_i$.

2.5.2.2. Condición de coplanariedad

Esta condición hace referencia al hecho de que los dos centros de proyección O' y O'' , un punto del terreno P_i y sus correspondientes proyecciones sobre las imágenes del par estereoscópico P_i' y P_i'' están en el mismo plano.

La condición de coplanariedad resulta fundamental en la orientación relativa, ya que supone que todos los rayos homólogos se cortan en el espacio y, por tanto, se evitan paralajes verticales (Py).



En la figura anterior cuando se ha realizado la orientación relativa se cumplirá que los vectores $\overline{P_i'}$, $\overline{P_i''}$ y \overline{B} son coplanarios (condición de coplanariedad).

Esta condición implica la intersección de dos rayos homólogos, y por tanto su producto mixto sea cero, ya que el volumen del paralelepípedo formado por los tres vectores es nulo.

$$\overline{B} \times \left(\overline{P_i'} \cdot \overline{P_i''} \right) = 0 \quad \text{expresado como determinante.}$$

Esta circunstancia supone:

$$\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u_i' & v_i' & w_i' \\ u_i'' & v_i'' & w_i'' \end{vmatrix} = 0$$

Resulta oportuno recordar que los vectores $\overline{P_i'}$ y $\overline{P_i''}$ se refieran a los sistemas u, v, w y para relacionar con las coordenadas en la fotografía será preciso recurrir a la expresión, ya vista:

$$\begin{bmatrix} u_i' \\ v_i' \\ w_i' \end{bmatrix} = A^T \begin{bmatrix} x_i' \\ y_i' \\ -f \end{bmatrix}$$

Las variables que intervienen en esta expresión son las coordenadas en el sistema de la fotografía de 2 puntos homólogos, la matriz de rotación (ω, ϕ, κ) de ambas fotografías y las componentes de la base aérea.

2.5.2.3. Orientación interna o interior

Esta primera fase consiste en reproducir el haz perspectivo de rayos definidos por los puntos imagen y el centro de proyección; para lo cual resulta indispensable conocer los datos de calibración de la cámara aérea empleada en la toma de la fotografía como son: distancia focal, marcas fiduciales y distorsión. Además será preciso transformar las coordenadas medidas en el comparador al sistema definido por las marcas fiduciales.

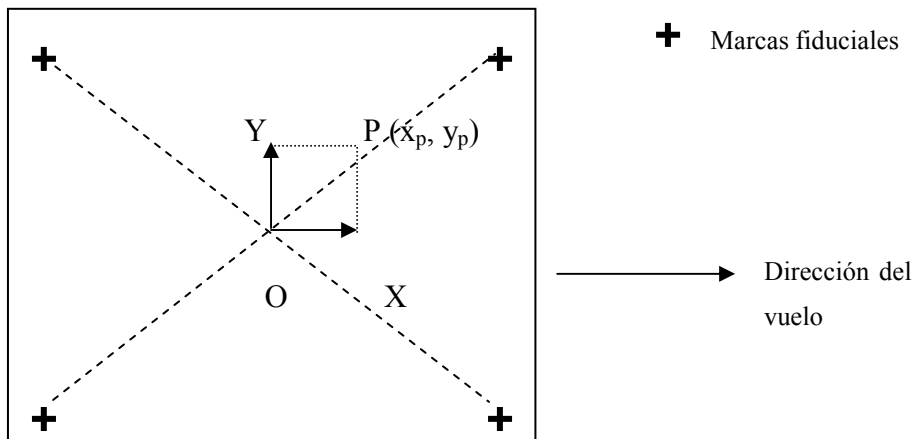


Fig. 4.- Sistema de coordenadas de la fotografía.

La transformación de coordenadas puede ser de semejanza o afin:

$$\begin{aligned} \text{semejanza:} \quad x &= a_0 + a_1x + b_1y \\ y &= b_0 + b_1x + a_1y \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{afín:} \quad x &= a_0 + a_1x + a_2y \\ y &= b_0 + b_1x + b_2y \end{aligned}$$

Los parámetros a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 y b_2 se determinan a partir de las coordenadas fiduciales referidas a los dos sistemas de referencia en el comparador además de los datos de calibración de la cámara, con control de tolerancia automático según métodos analíticos.

Una vez transformadas las coordenadas será preciso corregirlas de los errores sistemáticos siguientes:

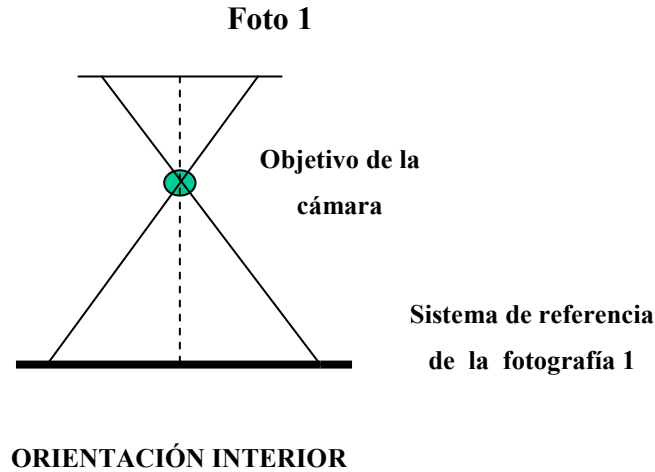
- Distorsión de la lente.
- Contracción y dilatación de la película.
- Refracción atmosférica.
- Curvatura terrestre.
- Desplazamiento del punto principal.

Con las ecuaciones de colinealidad para el centro de proyección $O(0,0,0)$ y las coordenadas del punto $(x,y,-f)$ se puede definir el rayo.

A manera de resumen y con una visión eminentemente práctica las operaciones que se deben realizar en la orientación interna con un restituidor son:

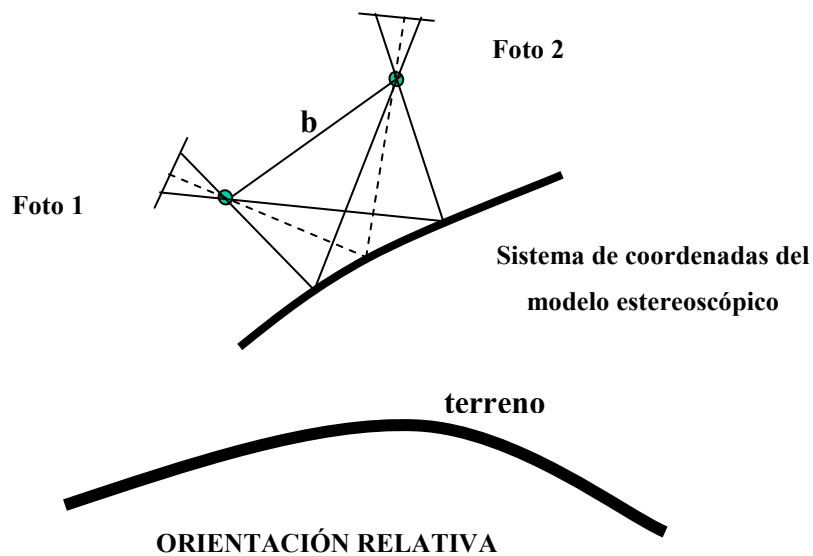
- Centraje.
- Introducir datos de calibración y compensar distorsiones.
- Medición de las coordenadas de las marcas fiduciales.
- Determinación de los parámetros de transformación a_0 , a_1 , a_2 , b_0 , b_1 y b_2 .
- Medir las coordenadas de los puntos imagen en el comparador.
- Transformar del sistema del comparador de marcas fiduciales
- Introducción de la distancia principal y reproducir el haz de rayos considerando la condición de colinealidad, y sus ecuaciones asociadas.

A manera de resumen, con la orientación interior o interna se determina el centro perspectivo interior de la fotografía aérea, tal como estaba en el instante de la exposición; por tanto, cada fotograma se situará de idéntica manera que estuvo el material sensible con relación al objetivo en el momento de su impresión.



2.5.2.4. Orientación relativa

En este caso lo que se pretende es reconstruir el modelo estereoscópico en la misma posición relativa que tenían cuando se realizó la toma fotográfica, para lo cual será preciso que los pares de rayos homólogos del par estereoscópico se intersecten en el espacio.



Para que el modelo estereoscópico quede correctamente definido será preciso que los paralajes verticales P_y (en dirección del eje Y) sean nulos para todos los puntos del modelo. El paralaje P_x no impide la visión en relieve y se anula levantando o bajando el plano de referencia.

Clásicamente con equipos óptico-mecánicos los procedimientos eran básicamente gráficos o empíricos. En la actualidad, con restituidores analíticos o digitales, se procede considerando la condición de coplanariedad:

$$\begin{vmatrix} b_x & b_y & b_z \\ u'_i & v'_i & w'_i \\ u''_i & v''_i & w''_i \end{vmatrix} = 0$$

en la que:

$$\begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = A_i^T \begin{bmatrix} x'_i \\ y'_i \\ z'_i \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = A_i^T \begin{bmatrix} x''_i \\ y''_i \\ z''_i \end{bmatrix}$$

Se pueden considerar conocidos $\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$ y b_x , aunque en realidad no lo sean y se consideren con un valor arbitrario, por lo que las 5 incógnitas que será preciso determinar son: $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2, b_y$ y b_z .

Para lo cual, en la orientación relativa, será preciso definir 5 ecuaciones para resolver el problema, lo que supone que se han de insertar 5 pares de rayos homólogos en el espacio e implicará que todos los pares de rayos homólogos se intersectarán ... y se habrá conseguido la orientación relativa.

En la práctica resulta conveniente y recomendable medir un sexto punto, que sirve de comprobación ya que 5 puntos no permiten definir una solución redundante.

Al igual que se propuso en la orientación interna, para la orientación relativa la secuencia práctica que será preciso realizar es:

- Haber realizado previamente la orientación interna.
- Medir 6 puntos comunes en coordenadas (x,y) en las dos fotografías del par, con un comparador.
- Calcular los parámetros $\omega_2, \varphi_2, \kappa_2, b_y$ y b_z considerando la condición de coplanariedad.
- Transformar las coordenadas de la fotografía a coordenadas del modelo.

Con la orientación relativa se determinan, en definitiva, la posición y la altitud de una de las fotografías de un par estereoscópico, con respecto al otro fotograma.

2.5.2.5. Orientación absoluta

Una vez definido el modelo en la orientación relativa, la última operación de reconstrucción es el nivelado, escalado (ampliación o reducción entre la escala de la fotografía y la de su proyección) y traslación en el modelo estereoscópico.

La orientación absoluta antiguamente se resolvía mediante métodos iterativos aproximados; hoy en día se resuelve matemáticamente, dentro del campo de la fotogrametría analítica, mediante una transformación ortogonal espacial con cambio de escala y de origen de coordenadas:

$$\begin{bmatrix} x_t \\ y_t \\ z_t \end{bmatrix} = \lambda A \begin{bmatrix} x_m \\ y_m \\ z_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix}$$

Donde:

(x_t, y_t, z_t) : coordenadas del terreno.

(x_m, y_m, z_m) : coordenadas del modelo.

λ : factor de escala.

A: matriz de rotación del sistema modelo al sistema terreno.

$(\Delta x, \Delta y, \Delta z)$: desplazamiento del modelo para situarlo en su verdadera posición respecto al terreno.

Las incógnitas son 7: $\lambda, \Omega, \phi, \kappa, \Delta x, \Delta y, \Delta z$.

Cada punto del terreno nos permite definir matemáticamente 3 ecuaciones, por lo cual serían precisos 3 puntos con coordenadas conocidas sobre el terreno para determinar las 7 incógnitas.

Para situar el modelo, dar escala y nivelar el modelo en realidad bastarían 2 puntos de coordenadas planimétricas conocidas y tres puntos con z conocidas.

En la práctica, lo que sirve de comprobación, se utilizan al menos 4 puntos de coordenadas (x, y, z) conocidas. Lo que nos define un sistema de 12 ecuaciones con 7 incógnitas.

En la práctica, con un restituidor, los pasos a realizar consisten en:

- Realizar previamente las orientaciones interna y relativa.
- Medir las coordenadas en las 2 fotografías de 4 puntos de coordenadas conocidas del terreno.
- Transformación del sistema fotografía al sistema modelo.
- Calcular los 7 parámetros de la orientación absoluta: $\lambda, \Omega, \phi, \kappa, \Delta x, \Delta y, \Delta z$.
- Transformar las coordenadas modelo a coordenadas terreno.

En la orientación absoluta se ha realizado, en definitiva, el ajuste a la escala apropiada y la nivelación u orientación del modelo, mediante un restituidor, en relación al control terrestre.

2.5.2.6. Orientación externa o exterior

Otro modo de proceder para determinar las coordenadas del terreno sobre los fotogramas consiste en calcular las 12 incógnitas ($x_0, y_0, z_0, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0, x_0'', y_0'', z_0'', \omega'', \varphi'', \kappa''$) a la vez, para lo cual se emplean las ecuaciones de colinealidad:

$$x' = -f \frac{a_{11}(x_i - x_0) + a_{12}(y_i - y_0) + a_{13}(z_i - z_0)}{a_{31}(x_i - x_0) + a_{32}(y_i - y_0) + a_{33}(z_i - z_0)}$$

$$y' = -f \frac{a_{21}(x_i - x_0) + a_{22}(y_i - y_0) + a_{23}(z_i - z_0)}{a_{31}(x_i - x_0) + a_{32}(y_i - y_0) + a_{33}(z_i - z_0)}$$

Donde:

(x', y'): coordenadas de un punto en la fotografía.

(x_0, y_0, z_0): coordenadas del centro de proyección.

(x_i, y_i, z_i): coordenadas de un punto del terreno.

($a_{11}, a_{ij}, \dots, a_{nn}$): elementos de la matriz A, definida por las rotaciones ω, φ y κ .

Las 6 incógnitas son en este caso: $x_0, y_0, z_0, \omega, \varphi$ y κ . Con cada punto del terreno (x_i, y_i, z_i) de coordenadas conocidas se pueden definir 2 ecuaciones y serán precisos al menos 3 puntos del terreno para resolver el problema.

Sin embargo, al igual que se comentó en la orientación absoluta, en la práctica se considera un cuarto punto que sirve de comprobación.

Como resumen en la rotación externa en la práctica:

- En primer lugar realizar la orientación interna.
- Medir sobre 4 puntos con un comparador en ambas fotografías cuyas coordenadas sobre el terreno son conocidas.
- Cálculo, con la condición de colinealidad, de los parámetros de orientación: $x_0, y_0, z_0, \omega_0, \varphi_0, \kappa_0, x_0'', y_0'', z_0'', \omega'', \varphi'', \kappa''$.
- Transformar las coordenadas de los puntos en ambas fotografías a coordenadas del terreno en base a la intersección espacial.

2.6. Aparatos de restitución

2.6.1. Definición

Un aparato de restitución es un instrumento que permite determinar las intersecciones de los rayos homólogos de dos haces perspectivas, a partir de dos fotografías que constituyen un par estereoscópico.

Estos aparatos se pueden clasificar en dos grandes grupos, en función de la forma de realizar la reconstrucción de los haces perspectivas:

- **Aparatos analógicos:** la reconstrucción se realiza de forma óptica o mecánica. Son los aparatos clásicos, que han sido básicos para el desarrollo de otros aparatos de fotogrametría.
- **Aparatos analíticos:** la reconstrucción es de forma matemática. Son los aparatos que se imponen actualmente al no tener limitaciones mecánicas ni ópticas, además pueden acoplarse a ordenadores, lo que aumenta su capacidad.

2.6.2. Restituidores analógicos

2.6.2.1. Características generales

Son aparatos que realizan la reconstrucción por medios ópticos y mecánicos, con una alta precisión. Estos aparatos han alcanzado unos límites en su desarrollo, por lo que están siendo sustituidos por los aparatos analíticos con unas posibilidades de mejora mucho mayores.

Un aparato analógico debe estar compuesto de:

- Un sistema para reconstruir los haces perspectivas.
- Un sistema que posibilite el ajuste del modelo: escala, orientación relativa y absoluta.
- Un dispositivo de visión estereoscópica.
- Un mecanismo de restitución para materializar, automática y constantemente, la intersección de los dos rayos perspectivas homólogos.
- Un medidor de coordenadas de los puntos de intersección que posibilite su lectura y registro.
- Un dispositivo de dibujo para representar el modelo.

2.6.2.2. Clasificaciones de los aparatos analógicos

2.6.2.2.1. Según la materialización de los haces perspectivas

- **Ópticos:** la reconstrucción de los haces perspectivas es óptica tanto en el espacio imagen como en el espacio objeto. Las principales ventajas de este tipo de restituidores son:

- Son relativamente baratos debido a su gran sencillez.
- El sistema anaglifo permite ver una gran proporción del modelo.
- La triangulación se puede realizar fácilmente, tan solo es necesario aumentar el número de cámaras de proyección.

Sin embargo, también presentan inconvenientes, como son:

- El empleo de la cámara oscura produce más cansancio en el operador.
- Es necesario usar gafas anaglifas.
- Necesitan un gran campo luminoso.
- El aumento de la foto al plano es fijo, pues las lentes son de enfoque fijo, así que sólo se pueden hacer ligeras modificaciones de la escala.

Los restituidores más representativos son: Zeiss DP-1, Zeiss Estereoplanígrafo, Balplex ER-55, Kelsh Plotter, Matra SFOM-930 y Bausch and Lomb Multiplex.

- **Óptico – mecánicos:** la reconstrucción de los haces perspectivas en el espacio imagen es óptica, mientras que la reconstrucción en el espacio objeto es mecánica. Estos aparatos no han sido muy frecuentes, los más representativos son los de la casa Nistri.

- **Mecánicos:** la reconstrucción de los haces perspectivas es mecánica tanto en el espacio imagen como en el espacio objeto. Además, el sistema de proyección y el de observación son completamente independientes.

El sistema de observación está constituido por dos varillas metálicas de gran precisión, que materializan los dos rayos de luz correspondientes al punto que se observa en el modelo.

El sistema óptico está formado por un sistema de lentes que lleva a cada ojo la imagen de un fotograma. Como el modelo estereoscópico es independiente de la observación, las lentes no exigen la calidad que se requiere en los restituidores ópticos. Las principales ventajas de los restituidores mecánicos son:

- No exigen cámara oscura.

- No necesitan un foco potente, basta con una pequeña luz para iluminar una pequeña porción del fotograma.
- No exigen una ventilación forzada.
- El aumento y reducción del modelo se hace alejando o acercando las cámaras.
- La variación de la distancia focal de la cámara se realiza, tan solo con subir o bajar el cojinete intermedio de cada varilla.

Como inconveniente, cabe citar, su elevado precio, debido a su gran precisión mecánica.

Los restituidores más representativos son: Wild A-7, A-8, A-9 y A-10, Santoni III, IV y V, Zeiss Planimat y Planicart.

2.6.2.2.2. Según la precisión

- **1° orden:** tienen una precisión planimétrica menor de 4 micrómetros y altimétrica de $0.1-0.2:1000 \cdot H$, se usan para escalas grandes y aerotriangulación. Dentro de este grupo se encuentran: Wild A-10, Zeiss Planimat y Santoni V.
- **2° orden:** tienen una precisión planimétrica entre 4 y 10 micrómetros y altimétrica de $0.2-0.6:1000 \cdot H$, sirven para escalas medias y pequeñas. Dentro de este grupo se encuentran: Wild A-8, Santoni IV y Zeiss Planicart y Topocart.
- **3° orden:** tienen una precisión planimétrica entre 10 y 20 micrómetros y altimétrica mayor de $0.6 \cdot H$, se usan para terrenos llanos y vuelos verticales. Dentro de este grupo se encuentran: Wild B-8, Santoni G-6 y Zeiss Planiton.

2.6.2.2.3. Según el tipo de trabajo

- **Universales:** aptos para trabajar con fotogramas de formato, distancia principal y condiciones de toma muy diversas. Los aparatos más representativos son: Wild A-7, A-8 y A-9, Santoni IV y Zeiss C-8.
- **Instrumentos de precisión:** para trabajar con escalas grandes. Los más representativos son Autógrafo B-8 de Wild, Estereometrografo y Planimat de Zeiss y Estereosimplex de Santoni.

- **Instrumentos topográficos:** se usan para escalas pequeñas y medias. Son Aviografo B-8 de Wild, Santoni E-9 y Kern PE-2.
- **Instrumentos de solución aproximada:** son los estereoscopios de refracción o de bolsillo, los estereoscopios de reflexión o de espejos y las barras de paralaje.

2.6.3. Restituidores analíticos

En los restituidores analíticos no se realiza una materialización de los rayos perspectivos como en los restituidores analógicos. Se establece una correspondencia entre los puntos homólogos de las fotos y del modelo por vía analítica, aplicando una transformación de coordenadas mediante un calculador.

Un restituidor analítico consta de:

- Un instrumento de visualización que permite la identificación y puntería sobre puntos homólogos de la foto y el modelo. Estos instrumentos son los comparadores.
- Un calculador, que realice la transformación de coordenadas.
- Un registrador de coordenadas, que proporcione y almacene la información.



2.6.3.1. Comparadores

De forma general existen dos tipos de comparadores: los monocomparadores que realizan las observaciones en una sola imagen fotográfica y los estereocomparadores que realizan las observaciones a partir de un par fotogramétrico, con ayuda de la visión estereoscópica.

Los monocomparadores son instrumentos de gran precisión que realizan las mediciones de puntos artificiales, previamente marcados mediante un ajuste estereoscópico y en una fase previa a la medición.

Estos instrumento no tienen limitación alguna en cuanto a distancia principal de los fotogramas, formatos, distorsiones e inclinaciones de la imagen. El instrumento es de gran sencillez y estabilidad, la mayoría de ellos se pueden colocar sobre una mesa y con reducidas condiciones de climatización del lugar de trabajo.

La medición se realiza sin dispositivos mecánicos que entren en contacto con la imagen, lo cual confiere una gran independencia respecto a los errores derivados de las deformaciones producidas por los cambios de temperatura.

La medición en un plano combina el principio de compensación de los errores de guía, con el de la medición de impulsos lineales, aplicando el principio del comparador de Abbe, con lo cual pequeñas deformaciones en el carro de medición no influyen en la precisión de las observaciones.

Los modelos más usados son Ascorecord 30P de Zeiss-Jena, TA 1/P de Omi-Nistri, NK-2 de Kern y PK-1 de Zeiss-Oberkochen; con precisiones en la medición que van desde 0.001mm a 0.0001mm.

Los estereocomparadores tienen un dispositivo de medición similar al de los monocomparadores. El instrumento conste de un bastidor con dos carros que realizan el desplazamiento del fotograma en las dos direcciones del plano. La medición se realiza por comparación de los desplazamientos de estos carros, que llevan unas escalas graduadas.

Los estereocomparadores están integrados por dos comparadores en los que se apoya el par estereoscópico, siendo un microscopio binocular su sistema de observación. El proceso de orientación del par se realiza por desplazamientos de los fotogramas y, posteriormente, se corrige el giro debido al efecto de deriva.

La óptica del sistema tiene un poder de resolución cercano a las 100 líneas por mm. En estos aparatos no es imprescindible, aunque sí recomendable, realizar la transferencia de puntos estereoscópicamente y su materialización, gracias a la posibilidad de observación estereoscópica.

Los modelos más usados son AP/C-37 y AC/C-4 de Omi-Nistri, Digital DS de Santoni, Esteo 1818 de Zeiss y STK-1 de Wild. Todos requieren un formato de imagen de 23x23 cm, salvo del estereoscopio de Zeiss que requiere 18x18 cm. Las precisiones en la medición van desde 0.005 a 0.001 mm.



2.6.3.2. Calculador

El calculador recibe las coordenadas del registrador de coordenadas, calcula unas coordenadas imagen que son las que envía al comparador. Además puede realizar el ajuste de los pares estereoscópicos y registrar variaciones en los datos almacenados ya en memoria.

Además puede recibir información necesaria para realizar correcciones como la esfericidad terrestre, la refracción atmosférica, la distorsión de la cámara o deformaciones de la película.

La asociación estereocomparador-calculador proporciona al conjunto una mayor universalidad y versatilidad, con una posibilidades de uso mucho más extensas que las de un restituidor analógico.

2.6.3.3. Aparatos auxiliares

Son aparatos de ayuda a los anteriores, que permiten llevar a cabo las operaciones de restitución. Uno de ellos es el registrador electrónico de coordenadas, en el que la información numérica entra en un sistema de cálculo electrónico.

Otro aparato auxiliar son los marcadores y registradores de puntos, que permite realizar el marcaje de los puntos en un fotograma y transferir su posición correcta a fotografías adyacentes, según su recubrimiento longitudinal y transversal.

2.6.4. Restitución digital

Con el uso de ordenadores, la restitución ha ido aumentando sus posibilidades. Los restituidores digitales realizan el proceso de transformación de la fotografía en una imagen digital, que estará representada por una matriz de filas y columnas, constituidas por celdas o píxeles, además los procesos de orientación interna, relativa y absoluta son automáticos. La porción de terreno que representan estos píxeles está en función de su tamaño.

La calidad fotogramétrica de la imagen obtenida va a venir condicionada por el poder de resolución y la radiometría. El poder de resolución depende el tamaño del píxel, de modo que cuanto mayor sea éste, menor será el poder de resolución. Sin embargo, no se puede esperar obtener el mismo poder de resolución que en una fotografía convencional, por lo que se pierde precisión con respecto a los métodos clásicos de la fotogrametría convencional. De todas formas, esta pérdida se compensa gracias a las grandes ventajas que aporta la informatización de todo el proceso de restitución.



Otra característica que define la calidad de la imagen es la radiometría, que a través del bit o unidad elemental de información digital, nos da toda la variación de grises o de colores que se puede representar.

Algunos de los aparatos usados en fotogrametría digital son la Estación Fotogramétrica Digital para Objeto Cercano CDW de Rolleimetric y el Phodis ST Digital Stereoplotter de Zeiss.

2.7. Apoyo de campo

2.3.2. Introducción

La formación del modelo estereoscópico, que se realiza mediante las operaciones que conforman la fase de orientación absoluta en la fotogrametría, necesita el conocimiento de las coordenadas terrestres de puntos del fotograma para poner a escala y nivelar el modelo.

Los trabajos topográficos necesarios para la determinación de las coordenadas planimétricas y altimétricas de estos puntos son lo que se denomina **apoyo de campo**.

De forma general, estos trabajos serán:

- Determinación de la red básica.
- Determinación de las coordenadas planimétricas y altimétricas de los puntos de apoyo.
- Señalización en el terreno.
- Presentación de los trabajos.

2.7.2. Red básica

La red básica la conformarán puntos o vértices que pertenezcan a una red geodésica o topográfica ya existente, y servirá de base para la determinación de los puntos de apoyo fotogramétrico.

En el caso de que no se pudiera utilizar o no existiera esta red, habría que determinarla empleando los métodos de triangulación, trilateración o poligonales de precisión, incorporando algún vértice geodésico, siendo necesario el uso de aparatos electrónicos medidores de distancias (distanciómetros).

Su diseño (S. López- Cuervo, 1980) es función de la topografía del terreno y se realizará de modo que, conteniendo el mínimo número de puntos, presenten la máxima flexibilidad para la determinación de los puntos de apoyo.

Los puntos de la red básica se atienen a los criterios que se exigen a las redes geodésicas, y su elección y distribución, por tanto no dependerán de la geometría del vuelo, y se referencian en los fotogramas con un topónimo representativo y sus coordenadas estarán referidas al sistema U.T.M.

2.7.3. Puntos de apoyo fotogramétrico

2.7.3.1. Definición

Los puntos de apoyo son puntos del terreno claramente identificados en la fotografía, de los que se conocen las coordenadas.

Como se ha comentado anteriormente, son los puntos que van a permitir dar una orientación exacta al modelo estereoscópico, para obtener una restitución fotogramétrica rigurosa.

De ahí la importancia de su elección, distribución y la correcta determinación de sus coordenadas.

2.7.3.2. Número de puntos de apoyo

Para la realización del proceso de restitución, para cada unidad de restitución será necesario un número mínimo de punto de apoyo, de coordenadas conocidas referidas al sistema U.T.M. de igual manera que los puntos que conforman la red básica.

El proceso de orientación absoluta, como se ha comentado anteriormente tiene por objeto, por una parte dar escala al modelo, para lo que precisa de dos puntos de coordenadas planimétricas conocidas, y por otro lado nivelar el modelo para lo cual se necesitan tres puntos (que podrán ser coincidentes con los anteriores) de coordenadas altimétricas conocidas.

De esto se deduce que el número mínimo de puntos de apoyo necesario para la realización del proceso de restitución sería de tres. Sin embargo, teniendo en cuenta la posibilidad de que existiera algún error en alguno de estos puntos, se considera necesaria para proceder a una restitución fiable las coordenadas planimétricas y altimétricas de cuatro puntos de apoyo fotogramétrico y la cota altimétrica de un punto más, para un buen ajuste del modelo, llegándose a exigir para escalas grandes (1: 1 000 y mayores) más de seis puntos por modelo.

2.7.3.3. Distribución de los puntos de apoyo

La distribución de los puntos de apoyo viene impuesta por el hecho de intentar disminuir el número de los mismos para evitar el encarecimiento del trabajo, para lo cual deben servir de apoyo para las pasadas superior e inferior, al igual que para los fotogramas anterior y posterior

Según las últimas tendencias se recomienda además distribuirlos de forma que el polígono de mayor superficie definido por ellos cubra más del 70% del área útil del modelo.

La elección de los puntos de apoyo se realiza de forma aproximada en gabinete con ayuda de la cartografía de la zona y los fotogramas del vuelo teniendo en cuenta además la accesibilidad de estos puntos.

2.7.3.4. Condiciones de los puntos de apoyo

Como condiciones primordiales que deben cumplir los puntos de apoyo, se

señalan las siguientes:

- Buena definición fotográfica de la imagen del punto.
- Posibilidad de establecer un buen contacto entre el índice estéreo y la imagen del punto.
- Fácil determinación topográfica.

El complemento de estas condiciones, y en particular la segunda, dependen en buena parte de la función que va a desempeñar el punto, es decir se va a utilizar para ajuste planimétrico, para ajuste altimétrico, o para ambos, que es el caso más general.

En el ajuste planimétrico, los detalles que permiten una colimación más precisa son aquellos que presentan una superficie reducida y de formas regulares, que aseguren la fácil determinación del centro de figura. Cuando los puntos tienen formas irregulares deben escogerse aquellos detalles que estén mejor definidos, como esquinas de edificios ángulos de tejados, intersecciones, lindes de parcela; etc.

Como orientación se señalan a continuación, y por orden de preferencia algunos tipos de puntos:

- Intersección en ángulo recto o próximo al recto de ejes de caminos, caminos, ferrocarriles, sendas y canales angostos, etcétera.
- Intersección en ángulo recto o próximo al recto de ejes de camino y sendas, con cercas, setos vivos y lindes de parcela, etcétera.
- Intersección en ángulo próximo al recto de cercas, setos, límites de parcela, etcétera.
- Intersección en ángulo próximo al recto de ejes de zanja con cualquiera de los anteriores o con otras líneas de zanja.
- Esquinas de sitios poblados de árboles que tienen límites claramente definidos con respecto al terreno despejado circundante.
- Las bases de árboles pequeños aislados.
- El centro de pequeños edificios o construcciones bien definidas.
- Esquinas de casas.

Para el ajuste altimétrico, en general, serán buenos todos los situados a nivel del suelo y que no presenten altura sobre el terreno, como cruces de caminos, sendas, etcétera.

En todos los casos, las imágenes de los puntos de apoyo han de tener una buena nitidez y una tonalidad justa y uniforme. Deben, por tanto, excluirse aquellos puntos que se presentan en zonas blancas o de tonalidad muy semejante, pues el contacto estereoscópico de altura puede ser defectuoso por presentarse un falso efecto de relieve. También es conveniente que se presenten libres de sombras, y de elementos adosados, que confundan o alteren su aspecto real, y puedan hacer incierta su interpretación.

De las anteriores condiciones, se desprende la conveniencia de hacer la selección y elección de los puntos, mediante el examen estereoscópico de las fotografías; solamente así, podrá apreciarse la perfecta idoneidad de puntos para su visión en el instrumento fotogramétrico, pues no es raro el caso de objetos o detalles que en visión directa en el terreno, parecen dotados de buenas cualidades, y sin embargo, les corresponden en las fotografías imágenes de escasa calidad, por causa de imperfección en la fotografía, alteración por sombras, falso efecto de luz, etcétera.

En estos casos resultaría inútil todo rigor en la determinación topográfica, puesto que al realizar el contacto estereoscópico del índice con su imagen se perdería todo o gran parte de su valor desde el punto de vista de la precisión.

Referente a este último extremo, conviene que la determinación topográfica de los puntos se realice siempre por el camino más directo, simple y rápido debiendo evitarse, en lo posible las soluciones complicadas que además de requerir un mayor trabajo de campo y de cálculo, hacen que sean más numerosas las posibles causas de error, con lo que resulta menor la precisión alcanzada. Como resumen de lo anteriormente dicho, se puede concluir, y la práctica así lo confirma, que:

- Los detalles que se encuentran a nivel del suelo, reúnen mejores cualidades como puntos de apoyo, que los que se encuentran elevados sobre el terreno.
- Los límites de parcelas, aunque tienen una buena definición fotográfica conviene evitarlos, sobre todo cuando el vuelo utilizado no sea actual, pues han podido variar la forma y dimensiones de las mismas.
- Los puntos singulares de las edificaciones, aunque estén bien individualizados en el terreno conviene también evitarlos, pues no siempre presentan buena definición fotográfica.

2.7.4. Determinación de coordenadas

2.7.4.1. Red básica

Para la determinación de las coordenadas de la red básica, ya se ha expuesto anteriormente los métodos (triangulación, trilateración, y poligonales de precisión) que son necesarios emplear ateniéndose a los criterios que exigen las redes geodésicas.

2.7.4.2. Puntos de apoyo fotogramétrico

Para la determinación de los puntos de apoyo existen dos caminos: la medida terrestre de los puntos de apoyo, o bien, la determinación de los mismos a partir de las fotografías aéreas mediante la aerotriangulación.

2.7.4.2.1. Medida terrestre de los puntos de apoyo

Se pueden usar todos los procedimientos distintos que estudia la geodesia y la topografía, trisección directa, trisección inversa, etc, utilizando los instrumentos electrónicos tanto para las mediciones planimétricas como en las mediciones altimétricas, de acuerdo con las tolerancias impuestas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

La determinación altimétrica de los puntos de apoyo se efectuará mediante nivelaciones geométricas, si así lo prescribe el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, debido a las necesidades de precisión de los planos finales. En los restantes casos, la determinación altimétrica se efectuará trigonométricamente o por pendientes, dando cota de nivelación geométrica al menos a un vértice de la triangulación.

Los trabajos de nivelación se iniciarán en el punto de nivelación de alta precisión, más cercano a la zona de levantamiento.

Las medidas terrestres en terreno poco abierto ocasionan gastos muy elevados. En la mayor parte de los casos se sustituyen por la aerotriangulación.

2.7.4.2.2. Aerotriangulación

El proceso de aerotriangulación se divide en dos partes:

- Triangulación radial, que determina únicamente la precisión planimétrica de los nuevos puntos pero no su altura
- La aerotriangulación espacial, mediante la cual se determinan planimetría y altura de los nuevos puntos.

Los dos procesos de aerotriangulación suponen pasadas de vuelo con más del 50% de recubrimiento de las fotografías sueltas, con lo cual, en cada par de fotografías, existe una zona común de superposición.

2.7.4.2.3. Compensación de los trabajos topográficos

Los trabajos topográficos requeridos para la determinación de los puntos de apoyo se compensarán debidamente, una vez que el proceso de cálculo haya demostrado que las mediciones efectuadas han sido suficientes para alcanzar las tolerancias fijadas.

En caso contrario, se reiterarán dichas mediciones hasta conseguir la precisión impuesta.

Los cálculos a efectuar señalarán claramente los errores obtenidos en los cierres de las triangulaciones, poligonaciones, itinerarios de nivelación así como su distribución, compensación y los resultados adoptados como definitivos.

2.7.5. Señalización

2.7.5.1. Preseñalización de los puntos

Por definición, los puntos de apoyo deben ser claramente identificados en la fotografía y en el terreno, para establecer la correspondencia entre ambos en los procesos de restitución.

Esta identificación no siempre se consigue de forma natural, es decir, con la elección de puntos de apoyo claramente identificables sin lugar a dudas utilizando los criterios anteriormente expuestos, debido, o bien a la naturaleza del terreno (monotonía del paisaje, falta de elementos artificiales, etc.) o a las exigencias mismas del replanteo.

En estos casos se hace necesaria la preseñalización de los puntos de apoyo fotogramétrico, materializando en campo, antes de la ejecución del vuelo, las señales con un formato, distribución y densidad suficientes.

2.7.5.2. Señalización

Los puntos que deben quedar materializados sobre el terreno son:

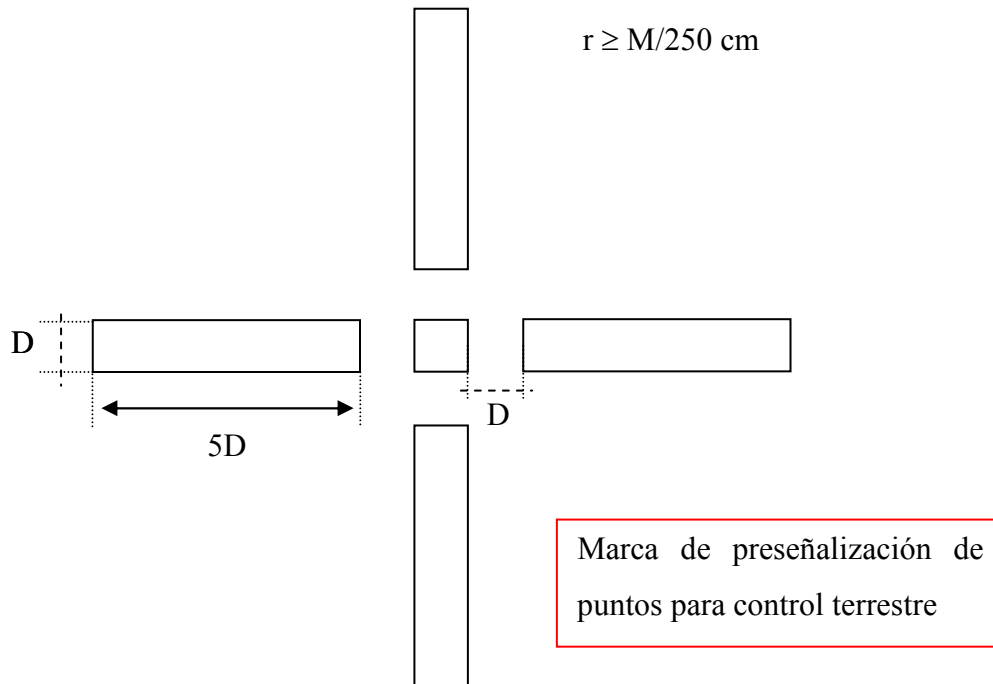
- Los vértices de la red básica.
- Los puntos de replanteo planimétrico.
- Los puntos de replanteo altimétrico.
- Los puntos de apoyo (éstos en el caso que no existan puntos identificables en el fotograma, como se expuso anteriormente).

A continuación se enumeran las características que se especifican en el Pliego de Prescripciones Técnicas para la ejecución de Trabajos Fotogramétricos (MOPU, 1975) y que pueden servir de referencia para todos los trabajos de apoyo de campo fotogramétrico.

2.7.5.2.1. Formato

La figura geométrica utilizada es una cruz con centro en el hito, cada uno de cuyos cuatro haces tendrá la longitud y anchura que se prescriba en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares del trabajo que se esté realizando.

En el caso de los puntos de apoyo planimétricos, de forma general el formato de esta señal será tal que la circunferencia circunscrita al contorno tendrá un radio expresado en centímetros menor que el denominador de la escala dividido por 250.



En el caso de los puntos de apoyo alimétrico, se utilizan señales con forma paralelepípeda de una altura no inferior a 70 cm y base cuadrada de lado no inferior a 30 cm, enterrándose como mínimo las 8/9 partes de su altura.

En el centro de la base se empotra un clavo de, al menos, 10 cm de longitud y junto al hito se sitúa una bandera para su localización.

2.7.5.2.2. Material y color

Las señales deberán ser perfectamente identificables por lo que se buscará el máximo contraste. Lo más claramente visible en los fotogramas son las señales blancas sobre fondo negro.

Es aconsejable por tanto, la utilización de cruces de formato adecuado de material plástico, blanco sobre superficies oscuras como rocas, tierras oscuras, césped, etc.

Da buenos resultados para prever posibles enterramientos de la señal, la utilización de clavos con cabeza de plástico y mezcla de mineral de hierro (López Cuervo, 1980) para que en la fase de los trabajos topográficos y con la ayuda de un detector de metales y datos de preseñalización se puedan localizar estas señales.

En el caso de superficies claras, terrenos arenosos, desiertos, se puede utilizar un material negro como fondo (papel alquitranado, tela negra, etc.) y posteriormente colocar la señal, en color claro.

2.7.6. Documentación

También siguiendo las recomendaciones de dadas en el Pliego de Prescripciones Técnicas para la ejecución de Trabajos Fotogramétricos (MOP, 1975), la documentación que debe acompañar todo trabajo de campo fotogramétrico se puede resumir como sigue.

2.7.6.1. Gráfico del apoyo fotogramétrico

Este gráfico contendrá la información con arreglo a las siguientes especificaciones:

- La escala será la del mapa-índice del vuelo fotogramétrico.
- Los vértices se representarán mediante triángulos equiláteros de 2 mm de lado, coincidiendo su centro con el vértice.
- Los puntos de apoyo se representarán mediante círculos de 2 mm de diámetro, coincidiendo su centro con el punto.
- Los hitos de señalización se representarán mediante cuadrados de 2 mm de lado, coincidiendo su centro con el hito, y distinguiéndose con distintos colores las clases de hitos.
- El gráfico se referirá a unas coordenadas rectangulares en el sistema U.T.M., estando el Norte en la dirección de las Y crecientes.
- Los elementos cartográficos, podrán omitirse, si el gráfico tiene marcas de referencia para su superposición con un mapa preexistente.

2.7.6.2. Relación y reseñas de vértices y puntos de apoyo

Este documento constará de dos partes para cada una de las clases de puntos consideradas. La primera será una relación de los vértices o de los puntos de apoyo, que se identificarán, en el caso de los vértices, por la letra V seguida de un número de orden y de un topónimo, y en el caso de puntos de apoyo, por las letras P. a. seguidas de un número de orden. A la derecha de esta relación se dispondrán tres columnas en las que se indicarán respectivamente los valores de X, Y, en el sistema U.T.M. y de Z, referido al nivel medio del mar en Alicante. La segunda parte del documento estará constituida por la colección de reseñas gráficas de los vértices o de los puntos de apoyo, dispuestos en el mismo orden que la relación y expresándose a la izquierda de cada reseña gráfica el distintivo del vértice o del punto de apoyo junto a sus tres coordenadas, así como la información adicional que se considere oportuna para complementar el gráfico y ofrecer una clara e inequívoca definición de la situación del punto y del nivel a que está referido el valor de Z. El gráfico estará dibujado a mano alzada y estará constituido por el mínimo de líneas posible que defina la situación inequívoca en planta del punto, con

referencia a los elementos planimétricos más próximos. Se indicará en el gráfico la dirección aproximada del Norte.

Para la numeración de los puntos de apoyo, se empleará como primera cifra la correspondiente a la pasada de vuelo a que pertenece; y la segunda será el número de orden.

2.7.6.3. Nivelación geométrica

Este documento constará de la relación de puntos nivelados con sus correspondientes cotas referidas al nivel medio del mar en Alicante. Los puntos se nombrarán con las letras Ni seguidas de un número de orden y los valores de las cotas habrán sido debidamente compensados. Se acompañarán croquis a mano alzada de la situación de los puntos.

2.7.6.4. Libretas de campo y gabinete

Se utilizarán los tres tipos siguientes de libreta:

- Observación de la red básica.
- Observación de los puntos de apoyo.
- Observación de la nivelación geométrica (si es prescrita en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares)

Estas libretas contendrán con toda claridad y limpieza los valores medidos en los instrumentos topográficos, especificando el punto de estación y la dirección de las visuales. Los modelos y disposición de los elementos en los cuadros de la libreta podrán ser de cualquiera de los tipos existentes, siempre que quede a salvo la claridad de las operaciones efectuadas.

2.7.6.5. Cálculo y compensación de la red básica y de los puntos de apoyo

Los métodos para el cálculo y la compensación de la triangulación o la poligonación y, como consecuencia, para la determinación de las coordenadas definitivas de los puntos de apoyo deberán ser expuestas con la máxima claridad. En el caso (muy conveniente) de que se realicen totalmente o en parte a través de un ordenador, la salida de resultados se incluirá en la documentación. Los signos empleados expresarán con toda claridad los pasos seguidos y los valores definitivos. Se acompañará una breve memoria explicativa sobre el proceso general de cálculo seguido y la interpretación correcta de los listados de resultados.

2.7.6.6. Colección de copias de fotogramas con los puntos de apoyo

Los puntos de apoyo se señalarán en los fotogramas mediante pinchazos, alrededor de los cuales se trazarán círculos de 1 cm de diámetro. El punto correspondiente se nombrará con las letras P. a. seguidas de un número de orden. Si en

el fotograma aparece algún vértice se pinchará igualmente, dibujando alrededor un triángulo equilátero de 1 cm de lado. El vértice correspondiente se nombrará con la letra V seguida de un número de orden y el topónimo. Los hitos y puntos señalizados antes del vuelo se marcarán también de modo que se distingan del resto de los puntos.

2.8. Planeamiento del vuelo

2.8.1. Introducción

En determinadas ocasiones, las exigencias técnicas de un proyecto concreto obligan a la realización de nuevos vuelos, debido a que los ya existentes no las satisfacen; es en estas ocasiones cuando el técnico se debe enfrentar al planeamiento del vuelo, cuyo propósito primordial es la determinación de los parámetros que condicionan la ejecución del vuelo en función de los requerimientos del usuario.

Estos parámetros, que serán comentados más adelante son:

■ Aspectos geométricos.

- Distancia focal de la cámara.
- Escala de la foto y del modelo.
- Formato de la foto.
- Superficie del área a fotografiar.
- Altura del vuelo.
- Recubrimientos.
- Velocidad del avión.
- Tiempos de apertura del objetivo, tiempo entre disparos y tiempo total de vuelo.

■ Condiciones atmosféricas.

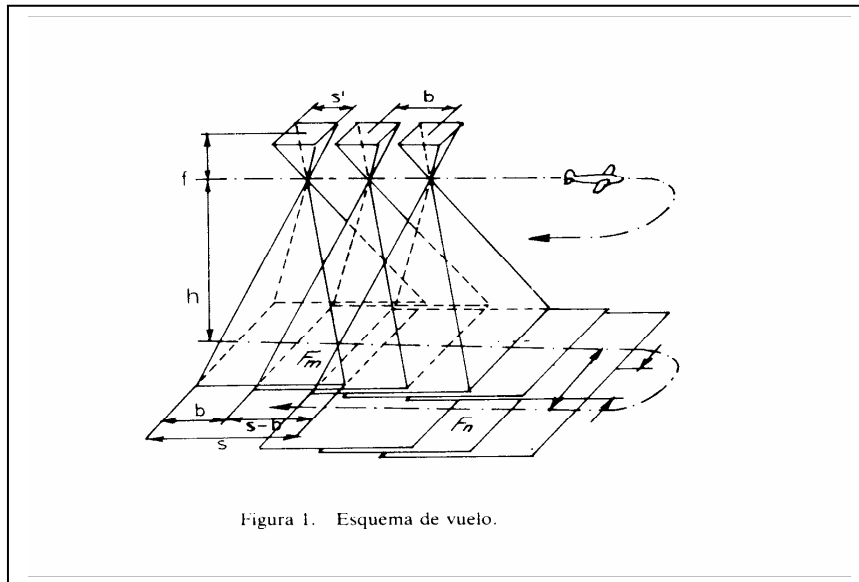
Tomando como base estos parámetros se realizan los cálculos necesarios y el mapa de vuelo para indicar a la tripulación:

- La altura de vuelo sobre el datum de referencia.
- La localización, dirección y número de líneas de vuelo a realizar sobre el área de estudio.
- El número de disparos a realizar en cada línea de vuelo.
- El número total de exposiciones en el vuelo.

Los planes de vuelo se vuelcan generalmente sobre mapas de vuelo creados al efecto.

Para afrontar el problema del planeamiento del vuelo hay que tener presente que “el vuelo fotogramétrico ideal será aquel en el cual, el avión a una determinada altura H , recorra el terreno a levantar, disparando el obturador de su cámara nadiral a intervalos regulares, de tal manera que cada dos fotogramas consecutivos dispongan del recubrimiento adecuado y distribuya sus pasadas sobre el terreno en trayectorias paralelas barriendo el mismo por fajas que dispongan a su vez de suficiente recubrimiento lateral para que puedan empalmarse con otras, dando lugar así a un

conjunto armónico que permita el levantamiento deseado, sin lagunas ni desconexiones” (Chueca, 1982).



2.8.2. Parámetros que condicionan el proyecto de vuelo

El punto de partida del plan de un trabajo es siempre el producto deseado, en este caso, una ortofoto o un fotomapa. Los datos del problema son la escala del mapa a levantar y la disposición de las hojas, así como las características y dimensiones del territorio objeto de estudio, las exigencias de precisión altimétrica y planimétrica y la información sobre la calidad deseada de la imagen, que depende a su vez de la resolución fotográfica, de las irregularidades de las bandas y del movimiento de la imagen.

Otros factores que condicionan el plan de vuelo son:

- La información sobre si la ortofoto se requiere en positivo o en negativo.
- Si se precisa invertida lateralmente o derecha.
- Si se considera como un producto final o sólo como una etapa intermedia.

Sobre la base de estos parámetros relativos al producto a obtener, se establecen los parámetros del proyecto de vuelo ya enumerados anteriormente; en los apartados siguientes se discuten estos parámetros, su interrelación y los aspectos que deciden su selección con el fin de dar una directriz para el planeamiento de este tipo de trabajos.

2.8.2.1. Distancia focal de la cámara

La primera decisión a tomar en el proyecto de vuelo es el tipo de cámara a utilizar; dado lo extendido del formato 23x23 cm. el problema se reduce a elegir una distancia focal conveniente.

Las distancias focales usuales en fotografía aérea son las siguientes (MOP, 1975, b).

Denominación	Distancia focal (mm)	Angulo sólido para formato de 23 cm (g)	Relación de la base a la altura de vuelo ($r=60\%$)
Superangular	85	119	1,08
Granangular	150	83	0,60
Normal	210	64	0,44
Especiales	305	46	0,30
	610	24	0,15

Las cámaras granangulares son las más utilizadas pues constituyen un excelente compromiso entre el ángulo de campo, las deformaciones perspectivas en los tipos de terreno más usuales y la economía del levantamiento; es la distancia focal más versátil utilizándose tanto en restitución como en fotointerpretación, la mayoría de los ortoproyectores y restituidores, así como las técnicas de restitución están concebidos para la fotografía gran angular, que por otro lado se encuentra disponible para grandes extensiones; las distancias focales más largas mejoran, por último, la precisión horizontal.

Las cámaras supergranangulares son históricamente de aparición más reciente y tienen la ventaja, como ya se comentó en el apartado 2 de este mismo capítulo, de abarcar más campo para una altitud dada, con lo que con la misma posición se tiene una escala más pequeña, mayor cobertura y por tanto más economía en el vuelo, en el apoyo de campo y en la restitución. Hay que destacar por último, que con focales más cortas se obtiene una mayor precisión en altura, debido a la intersección más favorable de los rayos homólogos (proporción base altura más adecuada)

Las cámaras normales tienen hoy un uso muy limitado debido principalmente a condicionamientos económicos.

Para la selección de la focal óptima en cada caso habrá que adoptar un compromiso entre las exigencias de precisión y los condicionantes económicos; siempre que no sean necesarias grandes precisiones en altura, se adoptará como distancia focal

óptima la distancia focal más larga que pueda ser utilizada dentro de un cierto margen de altitud.

2.8.2.2. Escala de la foto y del modelo

Una de las decisiones más importantes en el planeamiento del vuelo es la selección de las relaciones de escala entre:

foto: modelo: mapa

Estos parámetros determinan tanto la exactitud del trabajo fotogramétrico como los costes implicados en la realización del trabajo.

La escala del modelo es una escala intermedia que depende únicamente del instrumento empleado, y tiene por tanto una importancia secundaria en el plan de vuelo. La cuestión de la relación de escalas se concentra por consiguiente en la selección de la escala de vuelo en función de la escala del mapa, que concreta unas necesidades topográficas y cartográficas, y de las exigencias presupuestarias.

El factor coste conduciría a la elección de un vuelo a escala lo más pequeña posible; por el contrario el factor precisión exige escalas lo más grandes posibles, tanto mejores cuanto más parecidas sean a la escala del documento cartográfico definitivo. En consecuencia es necesario llegar a una relación de compromiso entre ambos factores.

Para determinar el valor de la escala de vuelo existen relaciones establecidas por distintos autores, que se traducen a su vez en una serie de tablas en las que se indica la escala de vuelo idónea para distintas escalas de mapa; algunas de estas se recogen en las páginas siguientes.

- Para la selección de la escala de la foto según el principio de la máxima cobertura se utiliza frecuentemente la expresión

$$E_v = C_1 E_m C_2$$

En la que el valor de C_2 se toma como 0.5 y el de C_1 entre 200 y 250 (MOP 1975 a).

- Según Lehmann (Lehmann, 1975), bajo condiciones normales, se puede aceptar la siguiente relación empírica entre los números que expresan la escala de la foto y la escala del mapa.

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

Esta relación es aconsejable para valores de E_m comprendidos entre 500 y 20.000. Desde las escalas grandes de mapa al ir creciendo E_m , hay que ir tomando valores menores que los que proporciona la fórmula; en este sentido la experiencia aconseja emplear el siguiente cuadro de escalas:

Em	1000	2000	5.000	10.000	25.000	50.000
Ev	7.000/8.000	10.000/12.000	14.000	20.000	32.000	45.000
Ev / Em	7,5	5,5	2,8	2,0	1,3	0,9

En MOP, 1975 b se ofrece así mismo un cuadro que relaciona la escala del plano con la del fotograma, en los restituidores más usuales, teniendo en cuenta la equidistancia entre curvas de nivel y las distancias focales utilizadas.

ESCALA DEL PLANO	EQUIDISTANCIA (m)	ESCALA FOTOGRAMA		
		f= 210 mm	f = 150 mm	f = 85 mm
1:500	0.5	1: 2.500	1: 3.500	1: 5.500
	1.0	1: 5.000	1: 5.500	1: 5.500
1: 1.000	0.5	1: 3.000	1: 4.000	1: 6.500
	1.0	1: 5.500	1: 7.000	1: 8.000
1: 2.000	0.5*	1: 3.000	1: 4.000	1: 6.500
	1.0	1: 5.500	1: 7.500	1: 10.000
	2.0	1: 11.000	1: 12.000	1: 12.000
1: 5.000	1.0	1: 6.000	1: 8.000	1: 13.500
	2.0	1: 12.000	1: 15.000	1: 18.000
	5.0	1: 18.000	1: 18.000	1: 18.000
1: 10.000	5.0	1: 20.000	1: 20.000	1: 30.000
	10.0	1: 25.000 a 1:30.000	1: 25.000 a 1:30.000	
1: 25.000	10.0	1: 30.000 a	1: 30.000** a	1: 30.000** a
		1: 40.000	1: 40.000	1: 40.000
* Valores poco usuales				
** Pueden disminuirse estas escalas, si se cuenta con vuelos de gran calidad fotográfica, hasta valores de 1: 60.000 a 1: 80.000, sobre todo para f = 85 mm				

Para la confección de este cuadro se ha tenido en cuenta tanto la relación óptima entre las escalas de la foto y plano, como la precisión requerida en altimetría, que se estima en $\frac{1}{4}$ de la equidistancia, suponiendo que se relaciona con la altura de vuelo H según la expresión:

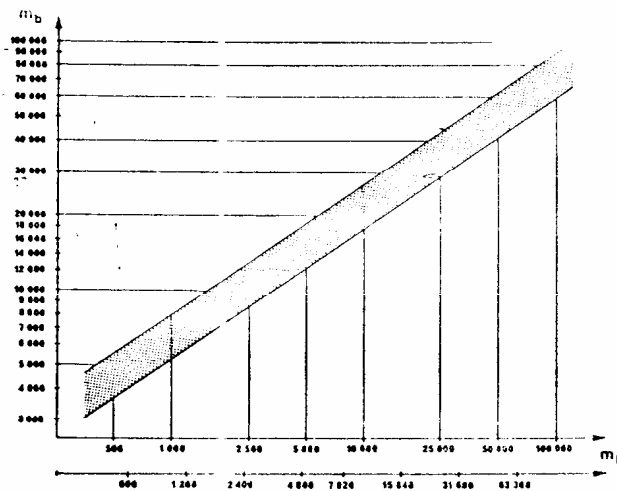
$$p = \frac{0.22 * H}{1000}$$

Otros autores establecen la precisión en altimetría en $\frac{1}{3}$ de la equidistancia.

Cuanto más bajo sea el vuelo más se encarece el trabajo, según una ley exponencial cuyo exponente varía entre 2.2 y 2.7. Es preciso pues, estudiar con todo detenimiento la elección de la escala de vuelo de acuerdo con la finalidad del trabajo.

Por último algunos autores (CLAVO, 1982) aconsejan utilizar el gráfico que se reproduce a continuación para determinar la Ev a partir de la Em.

Relación entre escalas de imagen y del mapa que se trata de preparar por medios fotogramétricos



$$\text{Escala mapa} = \frac{1}{m_k}$$

$$\text{Escala imagen} = \frac{1}{m_b}$$

Ejemplo:

$m_k = 10.000$

Hay un margen de escalas de Imagen entre $\frac{1}{17.000}$ y $\frac{1}{27.000}$

Resumiendo se puede afirmar que la escala de vuelo se debe determinar en función de:

- La escala del documento cartográfico a obtener
- Tamaño de los objetos que se desee identificar en la foto.

En relación con el primer punto hay que tener en cuenta las siguientes relaciones:

- Precisión planimétrica = 0.2 mm * Em.
- Precisión altimétrica = 1/3 Eq ó $\frac{0.22 * H}{1.000}$
- $Eq = \frac{Em}{2.000}$

En relación con el segundo punto hay que considerar que:

- Tamaño mínimo observable en foto = 0.08 mm · Ev

Por último, y en relación con la escala del modelo, insistir en que este es un valor intermedio entre la escala del mapa y la escala de vuelo que se puede fijar de forma subjetiva o a través de la relación:

$$e_{\text{modelo}} = \frac{h \text{ (distancia de proyección)}}{f \text{ (focal)}} \cdot e_v$$

Si se desconocen los parámetros de la relación anterior se podrá tomar:

$$e_{\text{modelo}} = 2-3 \cdot e_v.$$

2.8.2.3. Altura de vuelo

Una vez que se han seleccionado la distancia focal de la cámara y la escala de vuelo, debe elegirse la altura nominal de vuelo teniendo en cuenta los márgenes operativos del equipo, el relieve del terreno y las variaciones usuales de la altura de vuelo. Con objeto de asegurar que el margen de seguridad sea suficiente en las aplicaciones más desfavorables, la altura de vuelo H dada por $f \cdot Ev$ debe referirse a la H_{máx} de las cumbres:

$$\begin{aligned} H_{\text{cumbre}} &= f \cdot Ev \\ H_{\text{valle}} &= f \cdot Ev + \Delta H \\ H_{\text{mar}} &= f \cdot Ev + H_{\text{máx.}} \end{aligned}$$

Si la tolerancia vertical para la línea de vuelo es $\pm h_T$, la altura de vuelo mínima que hay que mantener sería:

$$H_{\text{mar}} = f \cdot Ev + H_{\text{máx}} + h_T$$

El valor admisible de h_T es del orden de $\pm 10\% H$; estas variaciones son debidas a que durante el vuelo el avión debe modificar su trayectoria para adaptarse, de forma aproximada al relieve del terreno.

En MOP, 1975 b aparece el cuadro que se reproduce a continuación en el que se indican la altura de vuelo (en metros) para algunas escalas de vuelo y distintas distancias focales.

ESCALA	f = 210 mm	f = 150 mm	f = 85 mm
40.000	8400	6000	3400
30.000	6300	4500	2250
20.000	4200	3000	1700
15.000	3150	2250	1275
10.000	2100	1500	850
5.000	1050	750	425

2.8.2.4. Recubrimientos

Como ya es sabido el recubrimiento fotográfico tiene por finalidad poder aplicar el principio en la visión estereoscópica de los fotogramas aéreos; los modelos estereoscópicos, parte común entre dos fotografías consecutivas, han de poder ser enlazados tanto longitudinal como transversalmente.

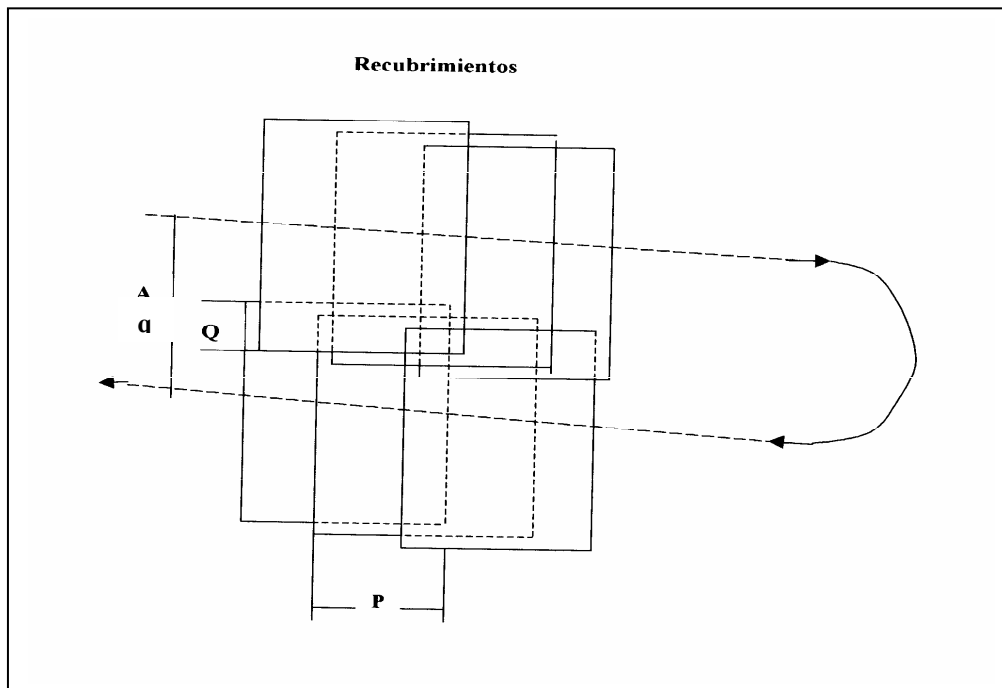
El solape longitudinal (p) mínimo necesario para que cualquier zona del terreno a restituir aparezca en dos fotogramas consecutivos sería del 50% de la superficie de cada fotograma, pero por seguridad, en la práctica es habitual emplear un recubrimiento a partir del 60%, así se tiene la garantía de que los pequeños errores de alineación de la cámara o de otro tipo no van a provocar que algunas zonas del terreno sean cubiertas por un solo fotograma y no puedan, en consecuencia, ser restituidas esteresocópicamente.

Habitualmente la zona a cubrir por el vuelo es de una extensión tal que no puede ser cubierta de una sola vez en la trayectoria del avión, por lo que se hace necesario realizar varias pasadas con trayectorias paralelas entre sí; lo cual hace necesario que se produzca un solape transversal (q), habitualmente superior al 20%.

En función del tipo de terreno los solapamientos aconsejados con un error del 10% son los siguientes (MOP, 1975 b):

TIPO DE TERRENO	SOLAPAMIENTO	
	Longitudinal	Transversal
Llano	60	25
Ondulado	65-70	25-30
Montañoso	70-80	30-35

Siempre que exista un cambio de dirección en las líneas de vuelo, el fotograma que corresponde al principio de la nueva sección se solapará un 100% con el último de la sección anterior.



A partir de los valores de los solapamientos elegidos se calculan otros de los parámetros básicos del plan de vuelo: la base (B) y el espaciamiento (A), distancias entre dos disparos consecutivos.

De la propia geometría del vuelo se deduce que:

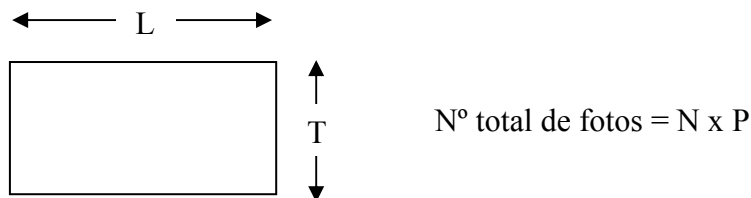
$$B = \frac{L \cdot (1-p) \cdot (H-h)}{f} = L \cdot (1-p) \cdot Ev$$

$$A = \frac{L \cdot (1-q) \cdot (H-h)}{f} = L \cdot (1-q) \cdot Ev$$

Estos dos parámetros permiten a su vez calcular el número de fotos y pasadas necesarias para cubrir el terreno a levantar:

$$N^{\circ} \text{ fotos} = \frac{\text{Dimensión longitudinal del área (L)}}{B} = N$$

$$N^{\circ} \text{ pasadas} = \frac{\text{Dimensión transversal del área (T)}}{A} = P$$



En la práctica el número de fotogramas necesario puede ser considerablemente mayor, dado que es muy difícil lograr que las distintas pasadas del vuelo se adapten perfectamente a la forma del área de terreno a restituir, especialmente si esta es reducida y de forma irregular. Por este motivo y en función de las características del terreno se incrementará el valor del número total de fotos en una proporción que oscila entre el 10 y 30%.

2.8.2.5. Tiempos

Una vez conocida la focal (f) y la escala de vuelo (Ev), se determina la altura de vuelo (H) que impone una base (B) y un espaciamiento (A); en función de ellas y conocida la velocidad del vuelo se puede determinar el tiempo entre disparos que viene dado por la expresión

$$t = \frac{\text{Base}}{\text{Velocidad del avión}}$$

Por otro lado el pliego de condiciones generales para el vuelo fotogramétrico impone un valor de arrastre, o lo que es lo mismo, un desplazamiento de los puntos imagen inferior a un determinado valor, en función del cual se puede determinar el tiempo de exposición o de apertura del objetivo mediante la siguiente expresión:

$$m = v \cdot t_{\text{exp}} \cdot e_v$$

m = valor dado de arrastre de la imagen.

v = velocidad del avión.

$$e_v = \frac{1}{Ev}$$

Las causas que pueden motivar arrastre de imagen son las siguientes (López Cuervo, 1980):

- Desplazamiento de la cámara en la dirección del vuelo.
- Vibraciones de la cámara transmitidas por el avión.
- Balanceo del avión.

No hay duda que el primer efecto es mucho mayor que los otros dos, que quedarían prácticamente anulados con un buen montaje de la cámara, condiciones atmosféricas aceptables y un buen pilotaje del avión.

Para una determinada escala de vuelo, el avión deberá tener una velocidad tal que combinada con los tiempos de exposición de la cámara, proporcionen los siguientes valores permisibles:

- El valor del arrastre de la imagen debe mantenerse siempre en valores inferiores a 0.03 mm.
- Excepcionalmente cuando la luminosidad sea baja, se requiera aumentar el tiempo de exposición o para escalas mayores a 1:50 000, serían aceptables valores de hasta 0.09 mm.

2.8.2.6. Orientación del vuelo

La orientación de las líneas de vuelo se determina en función de:

- Tamaño y forma del área a volar (búsqueda de menores líneas de vuelo y mayor eficiencia en el control de su orientación).
- Orientación de los modelos estereoscópicos en relación con la fotografía y la posición del sol.

Respecto al primer criterio, si el área a volar es rectangular, lo más conveniente es que la dirección del vuelo sea paralela al lado mayor del rectángulo, sin olvidar que por razones de seguridad, es necesario que la primera y la última pasada sobresalgan ligeramente del área a restituir, y que, por la misma razón, el primer y último fotograma de cada pasada debe exceder ligeramente los límites de dicha área. Si el área a

fotografiar es demasiado accidentada, la orientación de las líneas de vuelo debe buscar el mayor paralelismo posible con las líneas topográficas, a fin de lograr el mínimo de cambios de altura de vuelo con respecto al terreno.

Respecto al segundo de los criterios la orientación de las líneas de vuelo afecta, en muchos casos la interpretación de los modelos estereoscópicos; la mejor dirección es un rumbo este-oeste y viceversa. En ocasiones, cuando se trata de cubrir grandes zonas y aprovechar mejor el tiempo disponible en un día se recomienda la dirección Norte-Sur; cuando se dispone exclusivamente de la mañana se recomienda el sentido Noroeste-Sureste en el hemisferio Norte (Herrera, 1987).

En resumen, el mejor criterio estará basado en las consideraciones que permitan lograr la mayor calidad en el material aerofotográfico; estas consideraciones generales son:

- Uniformidad de escala.
- Tiempo de vuelo disponible.
- Topografía y sombras.

2.8.3. Condiciones atmosféricas

Las condiciones atmosféricas aceptables, conforme queda expuesto en los distintos manuales de fotogrametría son las siguientes:

- La zona a fotografiar estará desprovista de nubes y humos, y el efecto de la calima deberá poder ser compensado por la adición de filtros.
- En caso de que exista nubosidad, el techo de nubes deberá tener una altitud que será equivalente a la altura de vuelo $\pm 10 \%$.
- Si las nubes son compactas la sombra que arrojen no deberá superar el 3% de la superficie de cada negativo y si son dispersas este valor podrá aumentar hasta el 5%.
- La visibilidad deberá ser al menos igual al doble de la altura de vuelo.
- No se fotografiaran zonas cubiertas de nieve salvo que esa sea su condición habitual al menos en el 50% de su superficie y durante más de ocho meses al año.

Por lo que se refiere a las horas útiles para la toma de fotografías aéreas, se puede afirmar siguiendo a López Cuervo, 1980 que éstas son función de la época del año y de los condicionantes del estudio para el cual se ha realizado el trabajo.

Los criterios pueden ser distintos, según los fines de explotación de la información. En el campo de la fotogrametría, a la fotografía aérea se le exigirá una buena definición, y que el terreno esté libre de nieve y de zonas inundadas y, fundamentalmente, que las sombras arrojadas por los accidentes del terreno sean mínimas.

En cambio, con fines no netamente cartográficos, el vuelo fotogramétrico puede tener la finalidad de evaluar las reservas de nieve, de estimar las zonas inundadas por una causa determinada o bien, la proyección de sobras, puede ser el indicativo de altura de determinadas estructuras.

Prescindiendo en principio de las aplicaciones no cartográficas, que podrían definirse con el análisis de estos criterios, vamos a ceñirnos al campo del levantamiento aerofotogramétrico.

La altitud solar óptima, será aquel intervalo horario, en el cual los rayos solares presenten una inclinación tal, que las sombras arrojadas por los accidentes del terreno se consideren aceptables.

Lógicamente, las restricciones deben ser mayores para zonas montañosas, que para zonas llanas. Igualmente tiene gran importancia la orientación de determinados accidentes geográficos, tal es el caso de un desfiladero orientado en dirección perpendicular a la trayectoria solar.

No puede existir un criterio normalizado, a nivel internacional, para considerar la altitud solar mínima aceptable en el transcurso del año. En España se exige la siguiente norma. En las épocas comprendidas entre el 1 de mayo y el 31 de septiembre, los fotogramas se tomarán durante la parte del día en la que la latitud solar sobre el horizonte, sea superior a 45°, pudiéndose considerar en el resto de los meses altitudes superiores a los 30°.

2.8.4. Errores cometidos en el proceso fotogramétrico

En todo proceso fotogramétrico se pueden cometer una serie de errores que se estiman a través de los valores siguientes:

- **Error en topografía (e_T):** es el error derivado de unirse a la red geodésica en el apoyo de campo, se estima en 0.1m.
- **Error en fotogrametría (e_F):** viene dado en función del restituidor elegido y tiene un componente “x, y” y una componente z de distinto valor; en el caso de utilizar un restituidor de primer orden estos valores vienen dados por las expresiones siguientes:

$$e_{xy} = 1-2 \mu\text{m} \cdot E_{\text{modelo}}$$

$$e_z = \frac{0.1-0.2}{1000} \cdot H, \text{ donde } H \text{ es la altura de vuelo.}$$

- **Error de identificación (e_i):** será el mayor de los derivados de la agudeza visual y la sensibilidad de la película:

$$- \text{Error derivado de la agudeza visual} = \frac{0.08\text{mm} \cdot E_{\text{modelo}}}{n^\circ \text{ aumentos}}$$

- Error derivado de la sensibilidad de la película

$$\left. \begin{array}{l} 1 \text{ mm} \text{ ----- } E_v \\ 1 / n^\circ \text{ líneas} \text{ ----- } \text{Error} \end{array} \right\} \text{Error} = \frac{E_v}{n^\circ \text{ líneas}}$$

Este error sólo tiene componente x, y.

- **Error derivado del sistema de dibujo elegido para editar el documento cartográfico (e_D):** se seleccionará un sistema que garantice un error ≤ 0.1 mm. A la escala de mapa elegida este error será igual a 0.0001 m · E_{mapa}

Error total del documento

$$e_{x,y} = \sqrt{e_T^2 + e_F^2 + e_i^2 + e_D^2}$$

$$e_z = \sqrt{e_T^2 + e_F^2 + e_D^2}$$

Estos errores totales deben ser menores que los valores de tolerancia en x,y y z establecidos al comienzo del proceso fotogramétrico; generalmente:

$$T_{x,y} = 0.2 \text{ mm} \cdot E_M$$

$$T_z = 1/3 E_q$$

E_M: Escala del mapa.

E_q: Equidistancia

Ejemplo:

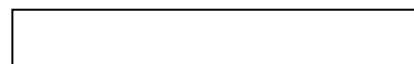
Para poder realizar un proyecto de un canal de riego se precisa realizar un levantamiento por métodos fotogramétricos; los datos a tener en cuenta son los siguientes:

- pendientes suaves

- longitud de 80 km

- anchura de 0,5 km

- error máximo en altimetría igual a 20 cm.



500

80.000

Determinar:

┌ Escala del mapa

- ┌ Escala de vuelo
- ┌ Tolerancia gráfica de estos documentos
- ┌ Sistema cartográfico de representación
- ┌ Sistema de captura de información: cámara, emulsión, condiciones de vuelo, velocidad del avión
- ┌ Planeamiento general del vuelo:
 - horas
 - condiciones atmosféricas
 - tiempo entre disparos
 - tiempo de exposición con arrastre < 30 μm
 - distancia entre tomas y entre pasadas
 - superficie cubierta por un fotograma
 - nº de fotos
- ┌ Tipo de apoyo de campo (existe observada, calculada y señalizada la red geodésica de 1º orden, la red inferior y la de 4º orden)
- ┌ Equipo de restitución
- ┌ Sistema de dibujo
- ┌ Errores cometidos
- ┌ Error total del documento

Solución:

- **Escala de mapa:**

error máximo en z = 0,20 m → equidistancia = 3 · 0,20 = 0,6 m
 equidistancia = (Escala/1000) · (1/2) → E = 1200
e_{MAPA} = 1: 1200

- **Escala de vuelo:**

$E_V = 200 \cdot \sqrt{E_M} \rightarrow E_V = 200 \cdot \sqrt{1200} = 6928 \approx 6000$
e_{VUELO} = 1: 6000
 e_{MODELO} = 2 · e_{VUELO} = 1:3000 → Se usa para hallar el error de identificación

- **Tolerancia gráfica:**

- En x,y = 0,2 mm · E_M = 24 cm
- En z = 1/3 · E_q = 20 cm

- **Sistema cartográfico de representación:** se elige como sistema cartográfico el U.T.M.

- **Sistema de captura:**

- Tipo de cámara: se seleccionan una supergranangular con 88 mm de focal que es la más indicada cuando se requieren altas precisiones en z.

Una vez seleccionada la cámara y conocida la e_v , se puede calcular la altura de vuelo: $H = f \cdot E_v = 0,088 \text{ m} \cdot 6000 = 528 \text{ m}$

- Apertura del objetivo:

$$Ap = \frac{\text{diámetro}}{\text{focal}} = \frac{22\text{mm}}{88\text{mm}} = \frac{1}{4}$$

- Emulsión: pancromática con una sensibilidad de 400 lin/mm
- Velocidad del avión: sobre un rango posible de 300 – 800 km/h se fija la velocidad del avión en 400 km/h

- **Planeamiento general del vuelo:**

- Altura sobre el horizonte: $>45^\circ$.
- Condiciones atmosféricas: las teóricas(sin calina, sin nieve, altura de nubes, etc...).
- Distancia entre tomas (Base = B):

$$B = L \cdot (1 - p) \cdot E_v = 0,23 \cdot (1 - 0,6) \cdot 6000 = 552 \text{ m}$$

Como se trata de terrenos con pendientes suaves se considera:

$p = 60 \%$ y $q = 30 \%$. Además el formato de la foto es de 23 x 23 cm.

- Distancia entre pasadas (Espaciamiento = A):

$$A = L \cdot (1 - p) \cdot E_v = 0,23 \cdot (1 - 0,3) \cdot 6000 = 960 \text{ m}$$

- Superficie cubierta por un fotograma y nº de fotos:

$$(0,23)^2 \cdot (6000)^2 = \mathbf{190,44 \text{ Ha}} \rightarrow \text{Superficie útil} = 80000 / B \approx 145 \text{ (fotos por pasada)}$$

En sentido \downarrow ocupa $0,23 \times 6000 = 1380 \rightarrow$ aproximamos por abajo a 1200; como la anchura es de 500 m, sería suficiente con una pasada pero se planean dos para mayor seguridad.

$$\text{Nº total de fotos} = 2 \cdot (145 + 1) = \mathbf{292 \text{ fotos}}$$

- Tiempo entre disparos = espacio recorrido / velocidad

como distancia entre tomas $B = 552 \text{ m}$ y velocidad del avión = 400 km/h = 111 m/s

$$t = \frac{552 \text{ m}}{111 \text{ m/s}} = 4,97''$$

- Tiempo de exposición: arrastre = velocidad · t_{EXP} · e_v
 arrastre = 30 μm = 0,00003 m = 111 m/s · t_{EXP} · 1/6000
 $t_{\text{EXP}} = 0,0016''$
- Nº de fotos por pasada = longitud / base = 80000 / 552 \approx 145 fotos → se coge siempre 1 más para garantizar el modelo estereoscópico en toda el zona:
 - Si se hacen 2 pasadas: 146 x 2 = 292 fotos
 - En general: nº fotos = (nº de fotos / pasada) · nº de pasadas
 - Es necesario comprobar que el nº de fotos cubre nuestra zona en
 - visión estereoscópica:
 - Superficie a levantar = 80000 x 500 = 4000 Ha
 - Superficie cubierta por zonas útiles de fotos = A x B x Nº de fotos = 552 · 960 · 145 = 7680 Ha

- **Apoyo de campo:**

Apoyo discontinuo, radiando con estación total (teodolito + distanciómetro) desde los vértices de nuestra red, que se apoyan en la red geodésica; se radia a los puntos de apoyo.

- **Equipo de restitución:**

Se elige el que tenga la precisión adecuada a la requerida en el caso concreto (1º, 2º o 3º orden) → elegimos 1º orden → precisión :

$$\text{en } x,y = 1-2 \mu\text{m} \cdot E_{\text{MODELO}}$$

$$\text{en } z = \frac{(0,1 - 0,2)}{1000} \cdot H$$

- **Sistema de dibujo:**

Aquel que nos garantice un error < 0,1 mm

- **Errores cometidos en todas las fases:**

- Error en topografía: se considera sólo el error derivado de unirse a la red geodésica $e_T=0,1 \text{ m}$

- Error en fotogrametría:

Según el restituidor elegido:

$$\text{en } x,y = 1-2 \mu\text{m} \cdot E_{\text{MODELO}} = 0,002 \text{ mm} \cdot 3000 = 0,006 \text{ m}$$

$$\text{en } z = \frac{(0,1-0,2)}{1000} \cdot H = 0,0001 \cdot 528 \text{ m} = 0,05 \text{ m}$$

$$\text{Altura de vuelo } H = \text{focal} \times E_V = 0,088 \cdot 6000 = 528 \text{ m}$$

– Error de identificación:

Será el mayor de los derivados de:

○ Agudeza visual $\times E_{\text{MODELO}} = 0,08 \text{ mm} \cdot 3000 = 0,24 \text{ m}$

Si teníamos 3 aumentos $\rightarrow \text{error} = 0,24 / 3 = \mathbf{0,08 \text{ m}}$

○ Sensibilidad de la película 400 lin/mm

$$1 \text{ mm} \xrightarrow{\hspace{10em}} 6 \text{ m} \quad (\text{según } E_V)$$

$$1/400 \text{ mm} \xrightarrow{\hspace{10em}} x$$

$$x = \mathbf{0,015 \text{ m}}$$

El mayor es: $e_I = \mathbf{0,08 \text{ m}}$

○ Error de dibujo:

Hemos elegido un sistema de dibujo que garantiza un error

$\leq 0,1 \text{ mm} = 0,0001 \text{ m}$, que a la escala del mapa será:

$$0,0001 \text{ m} \cdot 1200 = \mathbf{0,12 \text{ m}} = e_D$$

• **Error total del documento producido**

$$\text{Error total en } x,y = \sqrt{e_T^2 + e_F^2 + e_I^2 + e_D^2} < \text{tolerancia } (x,y) = 24 \text{ cm}$$

$$e_{X,Y} = \sqrt{0,1^2 + 0,06^2 + 0,08^2 + 0,12^2} = 13,37011 \text{ cm} < 24 \text{ cm} \rightarrow \text{Admisible}$$

$$\text{Error total en } z = \sqrt{e_T^2 + e_F^2 + e_D^2} < \text{tolerancia } (z) = 20 \text{ cm}$$

$$e_Z = \sqrt{0,1^2 + 0,05^2 + 0,12^2} = 11,80 \text{ cm} < 20 \text{ cm} \rightarrow \text{Admisible}$$

2.9. Aplicaciones de la fotografía aérea en la actividad forestal

Las fotografías aéreas se han venido usando tradicionalmente como ayuda por parte de los forestales, de modo que se pueden considerar como una herramienta esencial para la obtención de la información necesaria para la gestión. Mediante la utilización apropiada de fotografías, instrumentos y técnicas, el gestor forestal puede obtener una gran cantidad de información en menos tiempo, a menor coste y con mayor precisión de lo que podría hacer sin ellas.

Las fotografías aéreas son herramientas de uso múltiple en la gestión forestal. Su uso en la construcción de mapas y en la realización de inventarios forestales es evidente. En el proceso de la gestión de un monte, los primeros pasos son cartografiarlo e inventariarlo para determinar su volumen, condición y potencial crecimiento.

Una vez que se ha completado el inventario inicial, la preparación de los planes de gestión y el control rutinario en campo del monte por parte del forestal son de importancia capital. De este modo, la gestión forestal es la última y más difícil tarea del profesional forestal. El valor de las fotografías aéreas para el gestor forestal reside en el hecho de que proporcionan un registro de información del monte fácilmente disponible, gracias a lo cual ahorrará un tiempo y un trabajo muy valioso.

Las aplicaciones de la fotografía aérea que se van a comentar en los apartados siguientes son: inventario forestal, administración de las ventas de madera, apoyo a los trabajos selvícolas, conservación de los bosques y de la vida silvestre, estudios geomorfológicos, mapas forestales, protección contra incendios, recreo en el monte, registros forestales, seguimientos catastrales, seguimiento y control de plagas y enfermedades, y ubicación de carreteras.

2.9.1. Inventario forestal

La recopilación de la información necesaria para la gestión básica está afectada por limitaciones económicas severas. Esto obliga a que la información recogida mediante vuelos fotogramétricos sea utilizada por los gestores en todas sus aplicaciones posibles.

Es evidente que buena parte de la información requerida para el inventario puede obtenerse de las fotografías con el grado de precisión requerido, mientras que otra parte puede obtenerse de modo aproximado, pero queda mucha información que sólo puede obtenerse en el terreno. El inventario del gestor debe incluir información sobre la edad del arbolado, condición selvícola y otros factores no necesariamente incluidos en el inventario forestal. Hasta cierto punto, se puede reunir la información de estos factores a partir de fotointerpretación estereoscópica, pero en gran medida se requiere recopilación de datos en el suelo. En cualquier caso, existen suficientes ejemplos que ponen de manifiesto que la combinación de técnicas fotogramétricas con técnicas de inventariación “in situ” es generalmente la forma más favorable para recopilar la información necesaria al menor precio.

Las fotografías aéreas proporcionan un registro gráfico del monte cuya información inventarial relevante se quiere obtener. Bajo condiciones ideales, se pueden obtener, directamente a partir de las fotografías, estimaciones razonablemente precisas de las existencias totales. Sin embargo, habitualmente el objetivo buscado en la fotointerpretación es subdividir el monte en estratos relativamente homogéneos y

determinar el área de cada uno. Posteriormente, y en base a información fotogramétrica, se localiza una serie de parcelas de cada estrato a partir de las cuales se obtiene la información requerida para el cálculo de volúmenes y crecimientos por hectárea. En otras palabras, la fotografía aérea se emplea más bien para el cálculo de áreas y el control del muestreo de campo, que como base para la estimación directa de volúmenes.

Existen ciertas premisas que deben tenerse en cuenta si se quiere que la fotografía aérea suponga una herramienta valiosa en la que apoyarse para inventariar superficies forestales:

- Para lograr medidas precisas de árboles en fotografías aéreas, éstas deben ser de alta calidad, recientes, y con las adecuadas especificaciones. Si sólo se dispone de fotografías de baja calidad, o antiguas, es mejor renunciar a su empleo y recurrir al muestreo tradicional a pie de monte, que a buen seguro ofrecerá resultados más precisos.
- Las especificaciones relativas a aspectos como combinación de película y filtro, época de vuelo, escala y distancia focal varían con los objetivos del muestreo y con la naturaleza del área sometida a estudio.
- El intérprete debe ser un forestal bien entrenado y conocedor en profundidad de las condiciones locales. Hay mucha información inventarial valiosa en las fotografías aéreas que no puede extraerse a partir de simples medidas obtenidas con el uso de un estricto procedimiento fotogramétrico. El reconocimiento de tipos de bosque es un ejemplo de ello. Por tanto, el verdadero valor de una fotografía aérea sólo puede ser extraído por un intérprete que sea capaz de ir más allá de medidas directas de árboles y superficies.

En resumen, la aplicación de la fotografía aérea en el inventario forestal está estrechamente ligada a la identificación de tipos de bosques y a la medida de la altura de pies, diámetro de copas, fracción de cabida cubierta (FCC), recuento de pies y área de la masa. La mayoría de estas medidas se pueden obtener rápida y fácilmente a partir del estudio estereoscópico de fotografías aéreas verticales. En cualquier caso, como se ha dicho, la fotografía aérea sólo debe emplearse cuando estos beneficios no se vean contrarrestados por una pérdida en precisión. En general, la medida de áreas puede hacerse con gran precisión sobre las fotografías. También pueden obtenerse estimaciones bastante precisas de altura, diámetro de copa y FCC. Estas variables se emplean con posterioridad para la obtención indirecta de otras, fundamentalmente para el cálculo de volúmenes.

2.9.1.1. Variables que se pueden medir directamente sobre fotografías aéreas

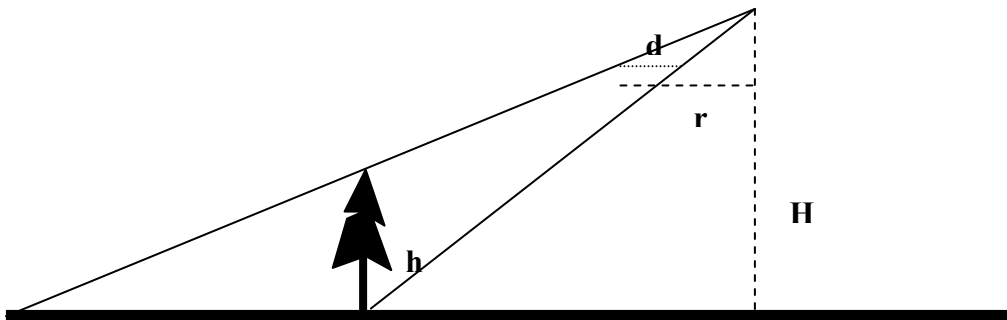
2.9.1.1.1. Altura de árboles.

En las fotografías aéreas se puede medir la altura de los árboles siempre que el nivel del suelo pueda verse en la imagen estereoscópica. Hay tres métodos básicos de medida de alturas en fotografías aéreas:

- Medida directa del desplazamiento de la imagen sobre fotografías sencillas.
- Medida de la longitud de la sombra arrojada.
- Medida de la diferencia de paralaje en pares estereoscópicos de fotografías aéreas.

A los tres métodos anteriores hay que añadir un cuarto, ya que la altura de los árboles también se puede estimar ocularmente en la imagen estereoscópica e incluso, prescindiendo de esta última, a partir de su apariencia en fotografías sencillas.

Desplazamiento en fotografías sencillas: debido a que la punta del árbol tiene mayor elevación que la base, aquélla se observará desplazada hacia fuera respecto del centro de la fotografía. La amplitud del desplazamiento es proporcional a la altura del árbol y a la distancia del árbol al nadir, y se puede calcular mediante la fórmula $d/r = h/H$, que se obtiene a partir de un sencillo razonamiento geométrico. Las medidas de d y r se efectúan sobre la fotografía (d es la longitud de la imagen del árbol y r es la distancia desde la punta del mismo hasta el punto principal). H es la altura de vuelo y h la altura del árbol, que se quiere calcular.



Este método está sujeto a limitaciones obvias, debido al hecho de que por lo general, los desplazamientos son demasiado pequeños como para ser medidos con precisión, salvo en las proximidades de los bordes de fotografías tomadas a baja altura de vuelo. Una segunda limitación sería del método es la necesidad de que tanto la punta del árbol como la base sean visibles. Ya que la base, en particular, rara vez puede verse, al quedar cubierta por la copa, y ya que la propia punta de la copa no suele ser tampoco distinguible en una fotografía individual excepto en el caso de árboles de copa cónica, el método rara vez puede usarse satisfactoriamente.

Método de las sombras: si el ángulo del sol en el momento en el que se tomó la fotografía es conocido y se puede medir la longitud de la sombra, la altura del árbol se puede calcular fácilmente. El método de las sombras se ha usado ampliamente durante muchos años y es rápido una vez que se ha calculado el ángulo del sol. De cualquier forma, está sujeto a cierto número de limitaciones. Sólo ofrecerá precisión en la medida de alturas, sin necesidad de corrección, cuando existan sombras suficientemente largas

para ser medidas sobre un espacio de suelo no obstruido y a nivel. Esto último es importante: hay que tener cuidado para tomar en consideración el efecto de la pendiente sobre la longitud de la sombra. Por todo lo anterior, el método puede ser adecuado en la medida de alturas en masas forestales más o menos abiertas, pero en condiciones distintas se ha mostrado escasamente satisfactorio.

Método de paralaje: de los tres métodos de medida de alturas de árboles, éste es el más preciso y el más satisfactorio, una vez que el intérprete se ha acostumbrado a su uso. Básicamente se trata de un método de medida de la altura del árbol según aparece éste en la imagen estereoscópica. Con la ayuda de la cuña de paralaje y otros instrumentos de medida del mismo, se sitúa una marca flotante en la imagen estereoscópica de tal modo que parezca estar a la misma altura que la base del árbol en la imagen estereoscópica. Se toma una lectura en ese momento. Entonces se eleva la marca flotante hasta que parezca tener la misma altura en el espacio que la punta de la copa. Se toma otra lectura y la diferencia entre las dos lecturas se puede convertir rápidamente a la altura del árbol por medio de la fórmula estándar de la paralaje: $h = H \cdot dP / (P + dP)$. La diferencia de paralaje en X se puede medir en fotografías adecuadamente orientadas sin el uso de estereoscopio.

Las mejores precisiones se obtienen usando los instrumentos más avanzados. De todos modos, se puede obtener una buena precisión con cuña de paralaje, estereomicrómetro o barra de paralaje. Debido a que esta técnica permite la medición directa de alturas de pies, se puede usar bajo una gran variedad de condiciones independientemente de la hora del día a la que se tomó la fotografía o de si se pueden encontrar sombras útiles. La precisión del método de paralaje varía directamente con la diferencia de paralaje entre la punta y la base del árbol. Por consiguiente, cualquier factor que tienda a incrementar esta magnitud mejorará la precisión del método. Esto conduce a que, a igualdad de otros factores, las diferencias de paralaje más precisas se medirán en fotografías tomadas con una separación máxima, por lentes gran angular, y a baja altitud. El principal inconveniente del método radica en el hecho de que requiere más entrenamiento y mucha más experiencia que el método de las sombras.

Factores que afectan a la precisión en la medida de alturas de árboles:

La precisión en la medida depende de cierto número de factores, de entre los cuales los más importantes son: la resolución de la imagen; la escala y forma de la copa; la estructura de la masa; la topografía; las dotes del observador.

El más importante de todos ellos es el primero.

- **La resolución de la imagen.** A menos que tanto la punta del árbol como el suelo adyacente a su base estén claramente visibles en la imagen, la medición de su altura es imposible. Es más, la falta de resolución conduce a errores sistemáticos: cuanto más pobre sea la imagen, más se subestimarán la altura de los pies, debido a la incapacidad del observador para ver la verdadera punta del árbol. Cualquier procedimiento que proporcione imágenes más precisas incrementará la precisión en la estimación de alturas.
- **La escala y forma de la copa.** La escala, por su parte, influye de un modo sustancial en la precisión de las estimaciones. Cuanto menor sea la escala, menos detalle se apreciará en la fotografía. Esto conduce a subestimar la altura de los árboles, pues los objetos de diámetro inferior a uno dado no

aparecerán en la foto, por lo que en ella se apreciará como punta del árbol lo que en realidad es el punto de la copa en el que su ancho se estrecha a menos de ese diámetro. Afortunadamente, esta subestimación es muy constante y se puede compensar en gran medida con la realización de correcciones arbitrarias recogidas en tablas que tienen en cuenta la forma de la copa y la escala, como la que se recoge a continuación, tomada del libro *Photogrammetry and Photo-Interpretation*, de Stephen H. Spurr, y adaptada a las unidades del Sistema Métrico Internacional.

Escala de las fotografías	Copas estrechas	Copas normales	Copas anchas
	Corrección arbitraria en centímetros		
1:10.000	60	30	0
1:15.000	105	60	15
1:20.000	150	90	30

Estos valores de corrección habrá que sumarlos a las alturas medidas sobre las fotografías para obtener una aproximación a la altura real de los árboles. La precisión de las medidas de alturas en fotografías aéreas es directamente proporcional a la escala de la foto, suponiendo que la distancia focal de la cámara, la magnitud del solapamiento y las demás variables se mantengan constantes.

Factores como la velocidad y la vibración del aeroplano, así como las condiciones atmosféricas, pueden limitar de tal modo la precisión de la imagen que eventualmente llegue a eliminarse en gran medida la correlación entre ésta y la escala. Este hecho lleva a la conclusión de que solamente cuando un incremento en la escala lleva aparejado el correspondiente incremento en precisión de la imagen, lo cual se ve que no siempre ocurre, son posibles determinaciones más precisas de la altura del arbolado.

- **La estructura de la masa.** La estructura del bosque, combinada con el relieve topográfico, puede limitar la capacidad del intérprete para ver el suelo y la base del árbol. Las determinaciones de alturas se hacen por este hecho más fácilmente en masas abiertas libres de sotobosque. Por el contrario, en bosques de gran densidad, puede ser imposible la determinación del nivel del suelo, motivo por el cual la determinación de alturas en tales condiciones sólo puede ser aproximada. Se pueden elegir los árboles que estén al mismo nivel que los claros para tomar las medidas.
- **La topografía.** Los árboles que crecen en pequeños valles, barrancos o depresiones, son frecuentemente medidos por defecto, mientras que los que crecen en lomas, montículos y otras elevaciones son sobreestimados, debido a la incapacidad del observador para ver el suelo circundante y a su tendencia a referir las mediciones a claros próximos de diferente cota.

- **Las dotes del observador.** Parte del error en la estimación de alturas es debido al observador. En general, el método de paralaje requiere un aprendizaje mucho más prolongado que los otros métodos, pero también obtiene resultados mucho mejores. En todos los trabajos relacionados con la medición de alturas, los mejores resultados los obtendrán, a igualdad de otras cualidades, aquellos observadores que estén más familiarizados con las condiciones locales.

2.9.1.1.2. Diámetro de copa

La medición de esta variable se puede hacer sobre fotografías aéreas de escala media y grande con mayor facilidad y precisión que en el terreno al desaparecer en el fotograma aquellas irregularidades que son irrelevantes a efectos de la medición de esta variable, como pueden ser las ramas delgadas, por lo que es posible medir con facilidad copas de apariencia regular. De este modo, las mediciones sobre fotografías estarán más relacionadas con los volúmenes que las efectuadas desde el suelo. Dichas medidas se tomarán con cualquier mecanismo micrométrico. El más comúnmente usado es la cuña micrométrica. También se pueden usar plantillas de diferentes tamaños y escalas. La medida ha de realizarse en una dirección normal a la radial, porque en esta dirección se producen deformaciones en la imagen debido al alejamiento del punto principal.

Los mayores errores producidos en estas estimaciones se deben al hecho de que muchas copas pequeñas no pueden ser detectadas por el intérprete y a que en ocasiones se identifica un golpe de árboles pequeños que solapan sus copas con un único árbol de gran diámetro de copa.

Como la escala varía con la cota, hay que tenerla en cuenta, ya que siendo el diámetro de copa una magnitud lineal, varía del mismo modo que lo hace la escala.

2.9.1.1.3. Fracción de cabida cubierta (FCC)

La FCC se puede estimar ocularmente, se puede evaluar por comparación con escalas de densidad de copas o con estereogramas de rodales con una FCC conocida, o bien puede evaluarse mediante una técnica de muestreo puntual. La FCC suele expresarse en términos de porcentaje sobre superficie de terreno.

Con algo de práctica se puede emplear el método de estimación ocular, que da estimaciones más precisas que las efectuadas a pie de monte debido a la perspectiva de observación más favorable. De todos modos es preferible emplear los métodos de comparación con masas de densidad conocida, las cuales proporcionan una excelente base de comparación.

Esto es lo que hacen las escalas de densidad de copas, que se construyen con recortes de fotografías aéreas reales o bien mediante representaciones gráficas de las distintas densidades. Para cada escala se construye una plantilla, que contiene puntos de una determinada dimensión, cada uno de los cuales representa la copa de un árbol maduro de la especie que se está considerando, a esa escala. La plantilla se aproxima a la fotografía y el intérprete la va desplazando hasta identificar la FCC que mejor se

corresponde con la zona que esté considerando dentro del fotograma. Sin embargo este método tiene cierto componente de subjetividad.

El método más objetivo para la estimación de la FCC es el del muestreo puntual. Se utilizan mallas de puntos dibujadas sobre transparentes. Estos elementos deberían estar contruidos de tal forma que el rodal que se esté midiendo contenga al menos 20 o 30 puntos. El cociente entre el número de puntos ocupados por copas y el número total de puntos proporciona la estimación de la FCC.

La estimación está influenciada por cierto número de factores, entre los cuales destacan:

- **La calidad de la imagen.** Cuanto mejor sea la imagen, más claramente se apreciarán los claros pequeños, y menor será la estimación de la FCC. Así, en general, la FCC se estimará por exceso en fotografías de baja calidad.
- **La naturaleza y distribución de las sombras.** Las sombras también afectan a la estimación, ya que tienden a oscurecer los claros existentes, haciendo que la masa parezca más densa de lo que realmente es, sobre todo si no se está recurriendo al empleo de visión estereoscópica. En estos casos será difícil apreciar cuándo una sombra cae sobre un claro y cuándo oculta otra copa más baja. La presencia de grandes sombras en la masa es indicativa de la presencia de pequeños claros o bien de una distribución irregular de alturas. El examen estereoscópico proporcionará una indicación de la importancia relativa de estos dos factores.
- **La escala de la fotografía.** Puesto que los claros pequeños no aparecerán en las fotografías de escala pequeña, la FCC se estimará por exceso en estas fotografías. Así, se pueden detectar muchos de estos claros en una escala como la 1:5.000, mientras que en la 1:20.000 sólo se podrán ver los más grandes.
- **La perspectiva de la fotografía.** Por otra parte, el desplazamiento de las copas en los bordes de la fotografía tenderá a oscurecer los claros, y por tanto contribuirá a la sobreestimación.

El efecto acumulado de resolución, sombras y escala se traduce en una tendencia del intérprete hacia la sobreestimación de la FCC en fotografías aéreas, justamente al revés de lo que ocurre en el caso de las estimaciones en el suelo, que tienden a subestimarla. Aparentemente, el valor real de la FCC va a oscilar entre estos dos valores estimados en campo y fotografía.

La FCC es una medida valiosa de la densidad solamente cuando es un factor influyente en el volumen, es decir, cuando la medida de la FCC sirve para estimar el área basimétrica. Si la FCC se sobreestima, como ocurre en las fotografías aéreas, o se subestima, como ocurre en el suelo, su valor en la estimación de volúmenes se verá reducido en gran medida.

Finalmente, hay que tener en cuenta que frecuentemente no existe una relación directa entre FCC y existencias en las masas. En ciertas especies, las masas rara vez alcanzan coberturas completas aunque sus existencias sean las máximas posibles en su óptimo de estación, mientras que masas de otras especies rápidamente alcanzan coberturas excesivas aun sin haber alcanzado el mismo nivel de existencias. Incluso en

masas de una misma especie, la cobertura puede variar a lo largo de la vida de los árboles, de forma inversa a la forma en que aumenta el volumen maderable.

2.9.1.1.4. Recuento de copas

Adicionalmente a la FCC, se puede obtener una segunda medida de la densidad contando las copas en fotografías aéreas. La principal ventaja de los recuentos de copas reside en el hecho de que se puede obtener un valor numérico simple relativamente independiente de la subjetividad asociada a un juicio personal. Las desventajas son la dificultad de lograr un recuento preciso y la correlación de éste con la variable volumen.

En la imagen estereoscópica solamente aparecerán aquellos árboles visibles directamente desde arriba y suficientemente grandes en sus partes expuestas. De acuerdo con lo anterior, puede afirmarse que cuanto menor sea la escala, peor será la resolución de detalles, y menor será el número de pies contados.

Los recuentos de copas siempre dan estimaciones a la baja en fotografías aéreas. El error es máximo en el caso de observadores inexpertos trabajando con masas densas en fotografías de pequeña escala en las cuales es muy probable que sean ignoradas muchas copas pequeñas. Normalmente se experimenta una dificultad especial en la segregación de los componentes de golpes de árboles para determinar su número correcto. Es probable que estos golpes sean señalados como un solo árbol.

La precisión del recuento también se ve afectada por las especies sometidas al mismo. Se pueden efectuar recuentos precisos, incluso sobre escalas pequeñas, en el caso de árboles que crecen en masas abiertas con copas evidentes y redondeadas. En el extremo opuesto, las masas extremadamente densas raramente pueden ser contadas con precisión, ni tan siquiera en fotografías de gran escala inusualmente claras.

Para la mayoría de trabajos no resulta práctico contar todos los árboles de una masa. Más bien la práctica general ha sido contar los árboles en parcelas de muestreo circulares sobre las fotografías. El tamaño de la parcela circular debería ser tal que incluyera aproximadamente entre 20 y 30 árboles visibles. Parcelas de menor tamaño no contienen el número suficiente de árboles como para proporcionar una estimación precisa, y parcelas más grandes contienen tantos árboles que el recuento es a la vez difícil y pesado. Cuando las masas son heterogéneas, de todos modos, se deben tomar parcelas más grandes. También hay que usar parcelas más grandes cuando hay pocos árboles por unidad de superficie ya que de otro modo se cuentan pocos pies.

Para resumir, se pueden efectuar recuentos precisos cuando se cuenta con fotografías de media o gran escala y las copas están claramente separadas y aparecen nítidas bajo visión estereoscópica. El juicio personal es necesario particularmente en la segregación de golpes para determinar sus componentes.

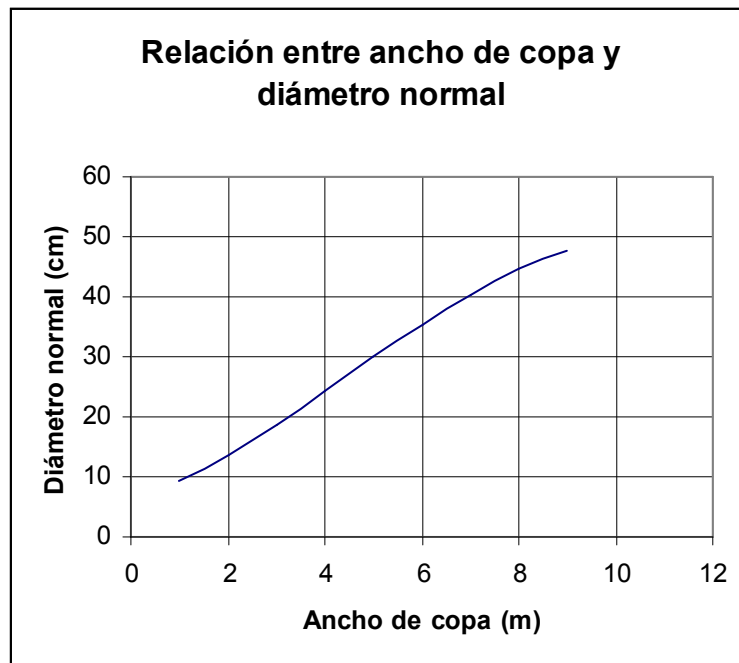
2.9.1.2. Variables que se estiman indirectamente a partir de variables medidas en fotografías aéreas

Como se ha indicado con anterioridad, aunque la medición de variables útiles para el inventario forestal en fotografías aéreas se limita a la altura, diámetro de copa, FCC y recuento de copas, estas variables se pueden relacionar con otras para obtener estimaciones indirectas de estas últimas. En particular se pueden estimar con fotografías aéreas el diámetro normal, el volumen del árbol y el volumen de la masa. También se

han realizado otras estimaciones con éxito variable (Krajicek, Brinkman y Gingrich, 1961; Hamilton y Brack, 1999; estos ejemplos son una pequeñísima muestra de una cantidad enorme de trabajos efectuados en relación a este tema). La precisión con la que se pueden obtener estas estimaciones depende de la precisión con la que se efectúen las mediciones directas por un lado, y por otro de la efectividad en la correlación entre éstas y las variables que se buscan.

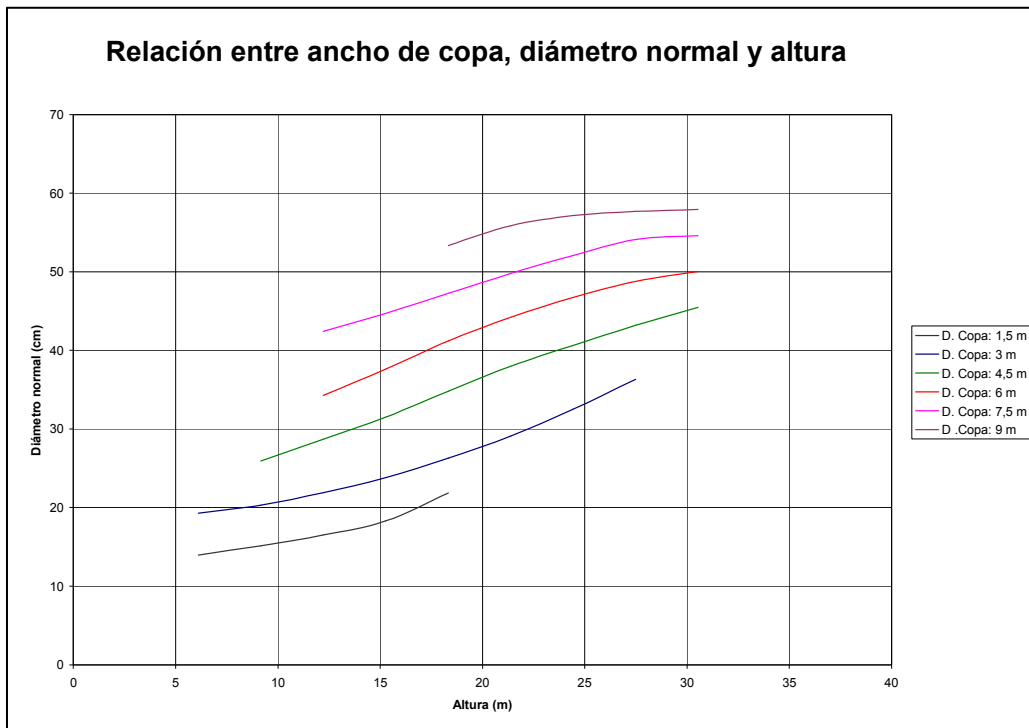
2.9.1.2.1. Diámetro normal

Diferentes estudios (Willingham, 1957; Eule, 1959; Gingrich, 1967) han demostrado que el diámetro normal está directamente relacionado con la anchura de copa, de la forma en que a continuación se representa para una determinada especie.



En la mayoría de los casos la representación gráfica de esta relación es levemente sigmoidal, pero su forma se aproxima a una línea recta. La forma de la curva es variable de unas a otras especies y también es variable dentro de cada especie en función de la población muestreada. La estimación del diámetro normal a partir de medidas tomadas en fotografías aéreas no es particularmente precisa, y el empleo del diámetro de copa como única variable en la estimación conduce a errores considerables.

La introducción de la variable altura total del árbol como variable independiente junto con el diámetro de copa eleva sustancialmente la precisión de la estimación del diámetro normal en fotografías aéreas. Un árbol alto de una cierta especie con una determinada anchura de copa tendrá normalmente un tronco más ancho que un árbol menos alto de su misma especie con el mismo ancho de copa. Por este motivo siempre será preferible utilizar las dos variables en lugar de una.



2.9.1.2.2. Volumen de árboles

Puesto que la altura y el diámetro de copa se pueden medir en fotografías aéreas, se deduce que el volumen se podrá estimar hasta el punto en que esté relacionado con estas variables independientes. Esta relación se expresa normalmente en tablas aéreas de cubicación. El uso de este tipo de tablas está limitado por la falta de precisión estadística inherente a la regresión y por el problema que presenta la conversión del volumen unitario en volumen de masa debido a la dificultad del recuento de copas en fotografías aéreas. El método se puede practicar en fotografías de gran escala para la estimación de volúmenes de pies dispersos de tamaño moderado a grande.

Se pueden obtener estimaciones aproximadas de volúmenes de pies basadas en una sola variable. Se han confeccionado tablas basadas solamente en la altura. Sin embargo, la mayoría de las tablas construidas para estimar volúmenes de árboles aislados utilizan ambas medidas como variables independientes, y más concretamente las que se pueden medir sobre las fotografías: la altura visible, que es la altura de un pie hasta el punto en el que la copa alcanza un diámetro tal que ya no aparece en la fotografía la porción de la misma que se halla por encima de ese punto, y el diámetro de copa visible, que es el diámetro de la copa visto directamente desde arriba, excluyendo tanto porciones de copa oscurecidas por otros pies como ramas tan delgadas y estrechas como para no aparecer en la fotografía.

Tabla aérea de volúmenes de pies para abeto rojo (*Picea abies*) elaborada para el Este de los Estados Unidos y Canadá

Altura visible (pies)	Diámetro visible de copa (pies)								
	2	6	10	14	18	22	26	30	34
	Volúmenes en pies cúbicos								
20	2.8	3.9	6.1						
25	2.9	4.2	6.9	9.4					
30	2.9	4.5	7.4	10	14	19			
35	2.9	4.9	8	11	16	22			
40	3	5.2	8.5	12	18	24			
45	3	5.5	9	13	19	26			
50	3	5.8	9.5	14	21	29	39		
55	3.1	6.1	10	15	22	31	42		
60	3.1	6.4	10	16	24	34	45	59	74
65		6.7	11	17	26	36	49	64	80
70		7	11	18	27	39	52	68	86
75		7.1	12	19	29	41	56	73	92
80		7.3	12	20	31	44	59	77	98
85		7.5	13	21	32	46	62	82	104

Se ha publicado cierto número de tablas, algunas nacidas como evolución de tablas convencionales de diámetro normal - altura, adaptándolas mediante el uso de la relación diámetro normal – diámetro de copa. Sin embargo, esta técnica, que utiliza como variable independiente una variable dependiente, no es satisfactoria estadísticamente, y las tablas desarrolladas de esta manera deben emplearse con precaución. Así mismo se han elaborado otras tablas tomando como base datos adecuados y el correspondiente desarrollo estadístico. Los errores de las tablas respecto al verdadero volumen del árbol son por lo general altos, según Spurr, de entre un 30 y un 60 %.

Aunque el error en la estimación del volumen de un árbol individual tiende a ser bastante alto, estos errores suelen compensarse entre sí, por lo que las estimaciones de volúmenes de masas efectuadas a partir del uso de estas tablas suelen ser bastante satisfactorias cuando los árboles individuales se pueden ver y medir en las fotografías. Desafortunadamente, estas condiciones ideales solamente se dan cuando se dispone de fotografías de gran escala y alta calidad.

Cuando las estimaciones de volúmenes de árboles se utilizan para el cálculo de volúmenes de masas, hay que efectuar las correcciones oportunas sobre las superficies de las parcelas por causa de la variación de la escala dentro de la propia fotografía debida al relieve. Paralelamente, hay que tener presente que en la mayoría de las fotografías las imágenes de muchos árboles se mezclan y no se pueden separar satisfactoriamente para determinaciones de volumen.

Finalmente, el método proporciona una estimación precisa sólo para aquellos árboles de la masa cuyas copas en el dosel superior son suficientemente grandes. Allá donde existan pies maderables en el dosel inferior, o pies intermedios con copa pequeña, se obtendrá una subestimación del volumen.

2.9.1.2.3. Volumen de masas

Las limitaciones del método de estimación de volúmenes de masas a partir de la estimación de volúmenes de pies en fotografías aéreas han conducido a estimaciones directas de volúmenes de masas. La altura y la FCC son las variables independientes más claramente relacionadas con el volumen por unidad de superficie y son las más comúnmente usadas en la regresión de volúmenes de masas. El diámetro de copa medio, el número de copas visibles por unidad de superficie, y el área de la masa se han utilizado también como base para la estimación de volúmenes. El volumen de una masa se puede también estimar subjetivamente por comparación con estereogramas que contengan masas similares de volumen conocido.

Regresiones. Para estimar el volumen por unidad de área se han empleado con éxito regresiones que relacionan el volumen de la masa con una o más variables independientes. Pueden estar expresadas como fórmulas, gráficos o tablas. Las regresiones de una única variable están basadas normalmente en la altura media o en la FCC de la masa. La mayoría de las tablas de cubicación aéreas utilizan tanto altura como FCC como variables independientes. Otras, en fin, tienen en cuenta tres variables, añadiendo a las anteriores el ancho de copa medio o el número de árboles por unidad de área. A continuación se representa una tabla de dos variables para una especie y procedencia determinada.

Tabla de cubicación aérea

Cubida cubierta (%)	Altura total visible (m)			
	10	15	20	25
	Existencias en metros cúbicos por hectárea			
15	14.3	24.3	33.8	39.1
25	23.8	40.1	56.5	64.9
35	33.3	56.5	79.2	90.8
45	43.3	72.3	101.9	116.7
55	52.8	88.7	124.6	142.5
65	62.3	104.5	147.3	168.4
75	71.8	120.9	170.0	194.3
85	81.3	136.7	192.7	220.7
95	90.8	153.1	215.4	246.5

Comparación visual. Los volúmenes de las masas pueden estimarse directamente en fotografías aéreas por comparación visual con fotografías similares de parcelas previamente medidas en el suelo. Con disponibilidad de un archivo adecuado de tales fotografías de parcelas, el fotointérprete puede evaluar masas no visitadas a partir de fotografías de parcelas cuidadosamente medidas. El método es altamente subjetivo, pero la precisión de las estimaciones de volúmenes por comparación ha probado ser comparable a aquélla de las estimaciones basadas en regresiones. El intérprete tiene una visión de múltiples aspectos que no se puede reducir a valores numéricos simples, mientras que la precisión estadística de las estimaciones de volumen a partir de variables medidas en fotografías aéreas es normalmente baja.

El número de parcelas que se puede establecer en el campo viene determinado por el tamaño del muestreo, la complejidad del monte y los recursos económicos. En general, se deben medir más parcelas en aquellas zonas de mayor volumen, mayor importancia comercial y mayor variabilidad en las existencias. Se deberían tomar pocas parcelas en clases con escaso volumen, poca importancia comercial y características uniformes.

Limitaciones de la estimación de volúmenes en fotografías aéreas

En ningún caso se puede estimar el volumen de una masa a partir de medidas tomadas sobre fotografías aéreas con la precisión que se obtiene en su estimación a partir de medidas tomadas en el campo. Por este motivo su utilidad es limitada en masas pequeñas o accesibles, en las que el muestreo de campo es más competitivo.

Sin embargo, las fotografías aéreas tienen dos importantes ventajas en la estimación de volúmenes:

- Los límites y las áreas de las masas se pueden determinar con precisión en fotografías aéreas, y más rápidamente de lo que se puede lograr en el campo. Este factor por sí solo puede ya compensar la menor precisión con la que se puede estimar el volumen de árboles individuales desde el aire.
- Las muestras y las medidas se pueden obtener más rápidamente en las fotografías que en el suelo. De este modo, la precisión estadística se puede lograr no mediante la toma de un número limitado de muestras cuidadosamente medidas en el campo, sino mediante la toma de un número grande de muestras medidas con precisión simplemente moderada.

Es significativo que la mayoría de los trabajos publicados muestran diferencias respecto a las mediciones de las masas por métodos tradicionales en campo de menos del 10 % (Dahl, 1954; Aldrich, 1969; Gong, 1995; Lund, 1997). Parece no haber duda de que, bajo la mayoría de condiciones, las estimaciones de volumen a partir de fotografías aéreas son suficientemente precisas para el reconocimiento de masas y para la estratificación del bosque en clases de volumen.

2.9.2. Administración de las ventas de madera

Las fotografías aéreas juegan un papel importante en la elaboración del plan de gestión y en la gestión rutinaria del monte. Son de particular importancia en las actividades de compra-venta de madera. En el caso de que un propietario de un terreno alejado venga al forestal para ofrecerle la madera que contiene, un vistazo rápido a la imagen estereoscópica del terreno le dirá al forestal más cosas sobre el terreno y la madera que una visita al monte que llevaría varias horas o incluso un día entero. Si el terreno tiene una gestión extensiva y un valor bajo, los arreglos para la venta se pueden efectuar exclusivamente a partir del estudio de las fotografías, ya que el beneficio de la venta se puede consumir por completo en los gastos de la visita del forestal a la zona.

Incluso cuando la gestión intensiva o el alto valor de la masa requiere un marcado de árboles cuidadoso a pie de monte y una supervisión de las cortas, gran parte de los detalles de la venta se pueden arreglar a la vista de las fotografías.

Para servir a las áreas que están siendo objeto de corta, hay que ubicar eficientemente las pistas y los arrastraderos. Finalmente, la distribución real de las cortas se debe fijar en mapas y en el suelo. En el caso de cortas por fajas o por bosquetes, hay que controlar la localización y la intensidad de las talas. Todos estos elementos pueden ser localizados por el forestal más fácilmente en pares estereoscópicos de fotografías aéreas. Se requerirá un número considerable de comprobaciones de campo, pero gran parte de la planificación se puede llevar a cabo por fotointerpretación. El ahorro de tiempo y dinero que se consigue con esta aplicación probablemente supera al mejor conocido ahorro resultante del uso de fotografías aéreas en el inventario forestal.

2.9.3. Apoyo a los trabajos selvícolas

En el campo de la selvicultura, las fotografías aéreas sirven de ayuda en varios aspectos, especialmente en el registro de la historia de las masas, en la prescripción de tratamientos para las mismas y en el seguimiento de la regeneración.

La fotografía aérea proporciona un registro en un momento dado del tamaño, condición y estado del monte. Después de un intervalo de tiempo, un vuelo posterior proporciona un registro de los cambios en el monte. Por ejemplo, fotografiar un área después de las cortas permitirá la evaluación de la extensión y forma de la corta, masa residual, ancho de copa de los pies residuales, cantidad y distribución de las talas, escarificación del suelo como consecuencia del desembosque y cantidad de regenerado existente. Vuelos sucesivos cada 5 a 10 años mostrarán el progreso y desarrollo de los árboles residuales y del regenerado, y servirá como base para la prescripción de tratamientos culturales. A los equipos de limpieza se les puede proporcionar fotografías oblicuas mostrando la cantidad y distribución de las talas para guiar su trabajo.

La historia de las masas se puede leer frecuentemente en las fotografías aéreas. Los antiguos patrones de corta, las superficies incendiadas y otras indicaciones del pasado son a menudo fácilmente discernibles en las fotografías mucho después de que se hayan camuflado cuando se las observa desde el suelo.

Los inventarios forestales convencionales a menudo proporcionan escasa información sobre el estado de las clases inmaduras. Sin embargo, el conocimiento de las condiciones y potencialidades del arbolado joven puede ser de gran importancia para el propietario forestal. Además, estas informaciones son esenciales antes de poder elaborar planes efectivos para el desarrollo selvícola del monte.

En las masas jóvenes que sean valiosas hay que efectuar desbroces. Hay que efectuar clareos para liberar a los mejores pies y permitirles un crecimiento añadido. Las áreas despobladas o pobremente pobladas se deben plantar para devolverlas al uso productivo. Otra vez, en todas estas aplicaciones la fotografía aérea juega un papel importante. En fotografías oblicuas a baja cota, el estado de las plantaciones se puede determinar con rapidez y precisión.

El tamaño de copa medido en las fotografías se puede usar para determinar el vigor relativo de los árboles individuales dentro de una determinada clase de edad, dirigiendo así al forestal hacia aquellos rodales que necesitan una entresaca más inmediata. Las áreas que requieren plantación se pueden localizar y delimitar en las

fotografías aéreas. La clase y cantidad del material de plantación necesario se puede calcular normalmente a partir de la información de la foto, apoyada solamente por un rápido chequeo en campo.

La imagen estereoscópica suministra más información sobre la naturaleza de un monte de la que se puede recoger a partir de un mapa, de notas de campo o de cualquier otra fuente a excepción de la visita al monte. En realidad, en muchos casos se puede obtener más información sobre las copas a partir de las fotografías que a partir de trabajos de campo.

En el seguimiento del regenerado, las fotografías aéreas son útiles porque su empleo reduce en gran medida la cantidad de trabajo de campo y porque las mismas fotografías proporcionan una base excelente sobre la cual delimitar las áreas con distintos grados de existencias. Sin embargo, es difícil reconocer el regenerado de especies de hoja caduca en fotografías aéreas durante el período invernal e igualmente es difícil distinguir entre el regenerado de las distintas especies. Como resultado se requiere un considerable trabajo de campo en dichos seguimientos.



Fotografía aérea oblicua que muestra la evolución de una zona en regeneración tras efectuarse las cortas

El pequeño tamaño de los arbolitos y la necesidad de reconocer la cantidad y tipos de la vegetación competidora indican que se debe disponer de fotografías de gran escala con buena resolución si se quiere utilizar la fotointerpretación para reducir el trabajo de campo. En general, las fotografías más apropiadas para este propósito son las de escala comprendida entre 1:5 000 y 1:10 000.

2.9.4. Conservación de los bosques y de la vida silvestre

En los estudios de conservación de los bosques, la condición de la misma se puede estimar, grosso modo, directamente en las fotografías aéreas. Su evaluación detallada y la de las condiciones del suelo, de todos modos, requiere normalmente comprobación en el campo. Así pues, las fotografías aéreas se usan comúnmente como base sobre la cual recoger la información a pie de monte. La fotointerpretación directa de las condiciones de conservación requiere fotografías de alta calidad y gran escala, a ser posible utilizando películas de color.

En general, los usos son similares a los descritos para las aplicaciones estrictamente forestales en las que la información referente a topografía, suelo, agua, vegetación y otros factores del hábitat se puede obtener de las fotografías. Pese a todo, son posibles los censos de la vida silvestre para animales de gran tamaño en bosques abiertos o semiabiertos y para aves acuáticas en aguas abiertas. Ambos tipos requieren fotografías especiales.

2.9.5. Estudios geomorfológicos

Es sabido por todos los forestales que la importancia de la geología de un terreno concreto sometido a estudio es capital, siendo invariablemente objeto de un capítulo en la memoria de cualquier proyecto de ingeniería forestal. Su importancia deriva del hecho de que un determinado sustrato, sometido a unas determinadas condiciones climáticas a lo largo del tiempo, genera un determinado tipo de suelo con unas propiedades físico – químicas que condicionan el tipo de cubierta vegetal que sobre él pueda asentarse. Además, la geología determina las características constructivas de una zona y sus cualidades para que sobre ella puedan construirse obras civiles. Pero, del mismo modo que ocurre en la evolución de los suelos, tienen lugar fenómenos erosivos que van configurando las formas del terreno y las redes de drenaje.

La fotografía aérea en este campo, como en los ya mencionados, ofrece sus mejores resultados cuando su estudio se combina con el necesario trabajo de campo que, eso sí, se reduce considerablemente. Así, sobre una fotografía sólo se pueden identificar fácilmente, sin otra ayuda, los materiales más simples, como son granitos, yesos o pizarras, pero sin poder precisar su naturaleza concreta. Otra ventaja de la fotografía aérea es la posibilidad que ofrece de delimitar automáticamente cualquier afloramiento que, pasando inadvertido sobre el terreno, aparece nítidamente en la fotografía. Ésto permite el trazado de mapas geológicos muy precisos y completos en cuanto al emplazamiento de los distintos afloramientos.

Sin embargo, también existen inconvenientes. La fotografía aérea sirve de poco para el análisis litológico, es ineficaz en zonas cubiertas por un manto vegetal denso, y no es capaz de realizar estudios finos, con localización de afloramientos pequeños, al no quedar reflejados en las fotografías, dependiendo de su escala, ciertos detalles. Por este motivo es recomendable apoyar el estudio de las fotografías con trabajo de campo, procedimiento bajo el cual se obtendrán los mejores resultados.

Redes de drenaje. La delineación de las redes de drenaje es muy fácil en climas áridos y puede hacerse con gran detalle. En climas húmedos y lluviosos, donde una espesa cubierta vegetal cubre los cauces, los valles con fondo en forma de V son

utilizados para delinear los cursos de agua, pero los detalles pequeños no son visibles. Incluso se pueden obtener evidencias de la red interna de drenaje si se sabe reconocer las dolinas y las hoyas, que suelen aparecer bajo formas constantes en función de la naturaleza del terreno. Las dolinas son los elementos más útiles para indicar áreas calizas. Sobre las fotografías aéreas son fácilmente visibles, y su forma, distribución y tipos de transición se pueden seguir y evaluar.

Fenómenos erosivos. Las zonas donde el proceso de erosión es rápido se observan directamente en las fotografías por su apariencia desnuda, presencia de cárcavas, declive de la pendiente y tonos brillantes. En los demás casos hay que recurrir al estudio de sus tres formas principales: laminar, por surcos y por cárcavas, todos los cuales, con mayor o menor dificultad, pueden identificarse sobre fotografías aéreas. Una aplicación muy importante es la de comparar fotografías de la misma zona, tomadas con un intervalo aproximado de 10 años y determinar el progreso de la erosión. Es necesario, para no llegar a resultados erróneos, que la escala y calidad de la fotografía se mantenga, así como la época de vuelo.

Fotointerpretación de rocas y depósitos. En relación con la fotointerpretación de rocas y depósitos se puede establecer que:

- La presencia de estratificación en la fotografía indicará la existencia de rocas sedimentarias.
- Redes de drenaje completamente superficiales, muy ramificadas y poco espaciadas reflejan la impermeabilidad propia de las pizarras.
- La presencia de formas especiales como surcos, canales, trincheras y dolinas es propia de los sustratos calizos.
- La aparición de escarpes abruptos y angulosos en zonas no muy húmedas indican la presencia de areniscas.
- En el caso de las rocas ígneas, la identificación de las extrusivas se basa en su forma, contrastando con la de las intrusivas, como el granito, que se logra considerando drenaje, textura, carácter masivo de la roca, etc.
- La fotointerpretación de las rocas metamórficas suele ofrecer mayor dificultad, sobre todo en escalas pequeñas. En general la mayor pendiente de las laderas metamórficas sirve para diferenciarlas de las graníticas. Gneises, mármoles, esquistos y serpentinas presentan características diferenciadas que permiten su identificación sobre fotografías aéreas.

2.9.6. Mapas forestales

Puesto que la gestión forestal implica la gestión del territorio, los mapas que muestran el estado y condición del mismo proporcionan registros esenciales en los que se basa la práctica forestal. Se pueden usar muchos tipos de mapas: mapas planimétricos

simples mostrando caminos, redes de drenaje, etc., mapas topográficos, mapas catastrales mostrando límites de propiedades, mapas de usos del suelo, mapas de rodales, mapas de riesgo de incendio y otros.

Los mapas forestales encuentran su aplicación en el inventario, en la elaboración de los planes de gestión, planes de corta, planes de control de incendios y planes de control de avenidas, en la evaluación de los daños producidos por distintos agentes, en la conservación del suelo y de los recursos hídricos, en los estudios de usos del suelo, en el emplazamiento de zonas de recreo en el monte y en la gestión del pastoreo, por ejemplo.

Las fotografías aéreas son útiles en la preparación de cualquier tipo de mapa usado para cualquier propósito. De todos modos, no toda la información deseada se puede obtener de las fotografías. Carreteras, límites de masas, condición de las mismas y a veces límites de propiedades se pueden ver en fotografías aéreas. Otra información como límites de propiedad completos, información detallada de las masas, suelos y vegetación se debe obtener en campo. El valor de las fotografías en la elaboración de mapas dependerá por tanto del tipo y de la cantidad de información requerida. Las fotografías aéreas son particularmente útiles en la preparación de mapas planimétricos simples, mapas topográficos y mapas de rodales. En el monte, los mapas topográficos son ayudas valiosas para el ingeniero que ejecute el aprovechamiento, y éstos se pueden construir económicamente por procedimientos fotogramétricos.

Aunque buena parte de la información requerida sobre tipos de masa y clases del arbolado se puede obtener de las fotografías, otra información deseable sólo puede ser recabada en el campo. En cualquier circunstancia se suele necesitar la comprobación a pie de campo, aunque sólo sea para garantizar la precisión de la fotointerpretación.

2.9.7. Protección contra incendios

En el campo general de la protección contra incendios, las fotografías aéreas y el reconocimiento visual aéreo son de gran importancia en la planificación de las labores de prevención, en las labores de extinción y en las evaluaciones del daño producido.

El uso de fotografías en la preparación de planos y mapas topográficos para las actividades de control del fuego es obvio. Se deduce que los mapas especiales que destacan esos aspectos de la vegetación y de la topografía de particular importancia en la extinción de incendios se pueden desarrollar también mediante técnicas fotogramétricas. Por ejemplo, se pueden construir mapas de tipos de combustible. Se pueden preparar con antelación estereogramas que recojan las áreas del monte críticas para que se puedan proporcionar al personal cuando se necesiten.

La aeronaves se han usado en la detección de incendios durante mucho tiempo, así como en el transporte de hombres y suministros para la lucha contra los mismos. Sirven como una completa fuente de información en fuegos activos y como auxilio en la comunicación de instrucciones a la línea de fuego.

El daño real al bosque por causa del fuego se registra normalmente con claridad en las fotografías aéreas. Los incendios recientes generalmente quedan registrados en tonos extremadamente oscuros en las películas pancromáticas. El tono se aclara, de todos modos, tan pronto como la nueva vegetación se establece y se hace extremadamente claro una vez que ésta cubre por completo el suelo.

2.9.8. Recreo en el monte

Las fotografías aéreas y los mapas desarrollados a partir de ellas proporcionan una fuente de información básica para la planificación de actividades recreativas y para los propios excursionistas. Entre las aplicaciones que se pueden enumerar están:

- Localización de áreas apropiadas para el desarrollo de actividades recreativas.
- Planificación de dicho desarrollo.
- Trazado de pistas y carreteras con fines recreativos.
- Evaluación de tramos de ríos, lagos o embalses para pesca, praderas para acampada y montañas para escalada.

2.9.9. Registros forestales

Las fotografías aéreas constituyen un registro permanente, de fácil archivo y disponibilidad, del estado de un monte en el momento de la toma de la fotografía. Contienen una riqueza de información que no puede reducirse a un mapa, descripción o cualquier otra forma de registro.

Un archivo de fotografías actualizado y bien clasificado en el gabinete, bien puede ahorrar la mitad del tiempo del administrador forestal. Se pueden responder muchas preguntas simplemente a través del estudio de las fotografías durante un momento en el estereoscopio cuando, sin ellas, sería esencial una visita al monte.

Las fotografías son útiles para mostrar la condición actual de determinadas zonas y el estado de las operaciones a cualquier persona no familiarizada con la actividad forestal. Los estereogramas y los impresos en tres dimensiones son particularmente útiles para este propósito.

Se puede instruir fácilmente a los capataces forestales y a otros trabajadores a partir de las fotografías. Los problemas se pueden entender mucho más rápido, las soluciones se pueden alcanzar mucho antes, y las instrucciones se pueden seguir más explícitamente si se dispone de una visión estereoscópica del área considerada. Las decisiones del administrador forestal se tomarán sobre una base completamente informada.

El mantenimiento de registros actualizados no plantea problemas. Sólo se requieren vuelos fotogramétricos de alta precisión cada 10 años. De todas formas, en el período intermedio, incendios, defoliación por insectos, progreso de las cortas y otros cambios en la vegetación de la zona de estudio serán registrados en fotografías auxiliares. Estas fotografías se pueden superponer a las anteriores fotografías, más precisas, para producir mapas con un razonable nivel de detalle. Las empresas madereras encuentran en la fotografía aérea un medio más eficiente y más barato para mantener registros que el muestreo de campo.

En muchas zonas de terreno relativamente llano, las mismas fotografías se utilizan como soporte del registro, sin la preparación de mapas. Áreas de corta,

incendios, desarrollo de redes viarias y diversas actividades selvícolas y de gestión se superponen a ellas para constituir los registros permanentes.

Las fotografías aéreas también son útiles en cualquier tipo de investigación de usos del suelo. Se pueden usar para registrar la localización de parcelas de muestreo, para registrar las condiciones de parcelas en un momento dado, y para planear nuevas investigaciones. Su uso facilita la planificación y ejecución de prácticamente todos los tipos de investigación forestal. Proporcionan un insuperable material ilustrado.

2.9.10. Seguimientos catastrales

La localización de límites es esencial en la definición de propiedades. Las técnicas de seguimiento mediante fotografía aérea se pueden usar para cartografiar los límites existentes, para relocalizar límites perdidos y para establecer nuevos límites. Puesto que estos límites deben ser localizados con gran exactitud, es deseable el máximo grado de precisión posible. Son deseables escalas grandes, se debe efectuar un control en el suelo, se deben emplear los instrumentos más precisos y los cálculos para la localización de puntos deben ser esmerados y precisos.

Prestando gran atención tanto a la planificación como a los detalles, se ha demostrado que se puede lograr localizar puntos con precisiones de centímetros bajo costes sustancialmente inferiores a los de los métodos convencionales, aunque es difícil competir en la actualidad con la tecnología GPS, de gran utilidad en esta aplicación concreta.

2.9.11. Seguimiento y control de plagas y enfermedades

2.9.11.1. Generalidades

La utilidad de la fotografía aérea en este campo de la ingeniería forestal se basa en la diferente reflexión de la radiación electromagnética que presentan las hojas de los árboles dañados frente a la de los árboles sanos. Uno de los síntomas más evidentes que reflejan la existencia de un ataque es la progresiva decoloración de las hojas, que también puede ser reflejo de condiciones de stress de cualquier otro tipo en las plantas. Estas diferencias en la reflectancia espectral son causadas por alteraciones fisiológicas y finalmente acaban reflejadas en el fotograma.



Muestra de un ataque de *Dryocoetes confusus*

Las regiones del espectro electromagnético donde se registran estos cambios son la visible y la del infrarrojo cercano, y como es en esta última región donde la pérdida de reflectancia es más acentuada, el tipo de fotografía más adecuado para esta aplicación es la infrarroja, que además conviene que sea en color porque así habrá una mayor distinción de tonos por parte del ojo humano. Así, en las películas de falso color los árboles sanos se ven como morado o rojo, mientras que los enfermos o moribundos toman un color verde azulado en dichas películas, o no aparecen, si ya han perdido todo el follaje muerto. El color rojo otoñal aparece como amarillo, y el amarillo como blanco.

Como se recoge en otra parte de este capítulo, la utilidad más importante de la fotografía aérea en el ámbito forestal es en la realización del inventario. Como quiera que el nivel de existencias de un monte o la calidad de sus recursos maderables puede variar drásticamente de un año a otro debido a diversas causas como incendios, vendavales, heladas, nevadas, plagas o enfermedades, se hacen necesarias técnicas que permitan identificar en tiempo real y con precisión estas alteraciones, contribuyendo de este modo a una gestión eficaz del monte. En este sentido, se ha propuesto la fotografía aérea como técnica de actualización del inventario forestal entre dos inventarios oficiales consecutivos, puesto que el intervalo de tiempo entre ambos puede resultar excesivo para un aprovechamiento óptimo. Así, las fotografías se pueden usar para detectar y descontar los árboles muertos. Otras aplicaciones en este contexto son:

- Identificación de aquellas áreas con un nivel de daño tal que requieran la aplicación de tratamientos químicos u otras medidas de control para prevenir una excesiva mortandad de árboles y, por tanto, una pérdida de volumen aprovechable.
- Evaluar la eficacia de tratamientos con pesticidas.
- Reducir el coste de los trabajos de medición entre un 50 y un 100 %, aumentando entre dos y tres veces la productividad en la misma (Zhirin, 1983).

Las características de color que se han comentado anteriormente sólo son apreciables cuando la resolución es elevada, cosa que se consigue realizando fotografías de gran escala. Los mayores logros en el uso de fotografías aéreas para detectar daños en bosques debidos a plagas se han conseguido con escalas grandes (1:600 – 1:2.000), si bien en algunos casos particulares se han cartografiado correctamente infecciones con escalas de hasta 1:32 000. Sin embargo, también es posible detectar rodales severamente defoliados dentro de masas puras o casi puras en fotografías de gran escala (incluso superior a 1:100 000) tomadas a gran altura mediante un estudio detallado de las mismas apoyado en trabajos de campo.

El desarrollo de la informática y la tecnología digital ha supuesto un nuevo modo de enfocar la fotogrametría. El proceso de análisis de las imágenes por parte del intérprete ha sido sustituido por el de digitalización de la imagen y análisis de la misma a través de programas informáticos adecuados, apoyándose en cálculos estadísticos. En la búsqueda de técnicas digitales para estudiar ataques recientes de plagas, Murtha y Wiart (1988) encontraron que existían diferencias significativas entre las propiedades de la imagen del árbol atacado y la del no atacado, en la fotografía de falso color de escala grande (1:2 000).

Como en los árboles sanos se producen variaciones de color dependiendo de la estación del año en que nos encontremos, también es conveniente fijar de manera apropiada y justificada la época en que se realizan las fotografías para la detección de daños por enfermedades o plagas. Todos los autores parecen coincidir en que los mejores resultados se obtienen realizando el estudio en la época en la que se alcanza el máximo daño. Esta época normalmente sólo es de unas pocas semanas, y depende del ciclo biológico de la plaga, de la estación y de la climatología. Esta variabilidad exige un conocimiento importante de la masa que se desea controlar para programar los vuelos en el momento apropiado. Donde se requiera un seguimiento periódico, se ha de intentar llevar a cabo los estudios en el mismo estado fenológico.

En cualquier situación, un selvicultor puede encontrarse con una gran variedad de agentes que pueden en un momento dado causar algún daño a los árboles gestionados. El rango es amplio, desde insectos o cualquier otro tipo de fauna, enfermedades o contaminación atmosférica a daños provocados por excursionistas.

El problema aparece, para la persona que debe estudiar las fotografías aéreas, por el hecho de que varios síntomas pueden ser causados por un mismo agente y un mismo síntoma puede ser causado por varios agentes diferentes. Exceptuando aquellos casos en los que se puede relacionar inequívocamente un síntoma con un agente de daño (escobas de brujas producidas por hongos o zonas quemadas por los incendios) se requiere de un apoyo de campo muy exhaustivo para determinar el agente causante de un determinado daño en los árboles.

Se podrían evitar muchos problemas en nuestros montes mediante la aplicación de prácticas selvícolas apropiadas, una vez que el selvicultor y el entomólogo o, en su caso, el patólogo, se pongan de acuerdo en dichas prácticas con el objetivo de disminuir o incluso anular la amenaza que pueda suponer el agente implicado en cada caso.

Centrarse demasiado en el estudio de uno solo de los agentes que dañan las masas puede ocasionar efectos secundarios no deseados al ignorar otras muchas posibilidades. Por ejemplo, una determinada afección puede estar provocada por la acción conjunta de un insecto y de un agente contaminante que puede originar buena parte del daño observado.

Cuando un árbol es dañado, éste ha de manifestarse de alguna forma. Hay dos formas en las que puede verse afectado: o sufre algún daño fisiológico o el daño es morfológico, o los dos a la vez. Un daño en la morfología supone algún cambio en su

forma externa o internamente, como una pérdida de hojas provocada por un defoliador, o pérdidas de ramas, o incluso un colapso de sus elementos conductores. Los daños fisiológicos son aquellos que impiden al individuo realizar las funciones básicas para sobrevivir. Entre ellos está la pérdida de capacidad fotosintética por una disminución en el contenido de clorofila o deterioro de los cloroplastos, o un estrés hídrico. Los daños no son observables inmediatamente, pero llega un momento en que el daño primario acaba repercutiendo sobre el conjunto del individuo y esto hace que su detección sea más fácil. Un daño en la morfología acaba causando daños en las funciones fisiológicas y viceversa. De esta forma uno de los síntomas más fácilmente observable cuando un árbol resulta dañado es un cambio en su signature espectral.

2.9.11.2. Necesidad de apoyo en campo

Todos los autores (Heller, 1978; Murtha, 1978; Weber, 1972) coinciden en que, para que las estimaciones de daño sean fiables, es necesaria una investigación previa y posterior en la zona estudiada para relacionar los distintos valores de color de las imágenes con los distintos niveles de daño de los árboles. En caso de utilizar fotografías de escala grande para evaluar el daño pie a pie, puede prescindirse del apoyo de campo. Sin embargo, cuando se trabaja con escalas pequeñas (tanto fotografías como imágenes digitales de sensores remotos), la asignación de un significado a cada nivel de intensidad siempre tiene que apoyarse en parcelas de control localizadas expresamente en el monte. El trabajo de campo es imprescindible en muchos casos para poder georreferenciar las imágenes.

2.9.11.3. Aplicaciones

La principal finalidad del estudio de los efectos de las plagas o de la contaminación atmosférica en las masas forestales es poder delimitar las zonas que han sido atacadas. Dentro de las zonas marcadas como dañadas es importante asignar distintos niveles de daño para facilitar y optimizar cualquier acción que posteriormente deba realizar el selvicultor, tanto de prevención como de ataque, mediante el uso de insecticidas tradicionales o lucha biológica.

El estudio de las fotografías se puede realizar de forma simplemente visual, en combinación con técnicas automáticas, o exclusivamente mediante éstas. En este último caso será necesaria de todos modos la participación del observador en las últimas fases de análisis de resultados.

Las imágenes aéreas abarcan grandes áreas que no pueden estudiarse fácilmente desde tierra. En la evaluación de daños producidos en la vegetación, a menudo es necesario poder ver árboles sanos para compararlos con aquéllos que han sido afectados. En el caso de insectos barrenadores que atacan a coníferas, normalmente en pequeños focos dispersos, el uso de fotografías aéreas de color y de mapas dibujados a mano desde avionetas ha eliminado el trabajo de campo casi por completo.

El diseño de los vuelos depende de la altura de los mismos, de la topografía, de la velocidad del avión y del nivel de precisión deseado. Cuando las áreas atacadas son pequeñas, son difíciles de ver y de registrar correctamente desde distancias grandes en mapas de escalas pequeñas. Los vuelos para cartografiar de visu se organizan por equipos (un piloto y uno o dos dibujantes) en pequeños aviones o avionetas. Los equipos vuelan sobre líneas de vuelo predeterminadas y representan en el mapa todas

las áreas de daño en las categorías que se hayan establecido para llevar a cabo el estudio.

Para cartografiar ataques de plagas usando fotografías aéreas de falso color, el uso de escalas pequeñas es el más apropiado. Ciesla (1974) comparó las posibilidades de este tipo de fotografías con los reconocimientos aéreos de visu y las fotografías de falso color de escalas grandes. Para el caso de defoliaciones anuales se mostró que las fotografías aéreas de escala ultra pequeña constituían una herramienta útil para detectar y cartografiar este tipo de daño, siempre y cuando se restringiese a masas casi puras y sin cubierta herbácea que enmascarase los daños producidos. También señalaba que otras técnicas como el realce de la imagen o el uso de densiómetros podían ser útiles para producir cartografía de ataques.

En otros casos, para realizar mapas de daños, se divide la zona atacada según el grado de defoliación que presente. Después es conveniente marcar las zonas no arboladas (carreteras, ríos, cultivos...) como no dañadas, para evitar posibles errores. Un fotointérprete experto señala las áreas defoliadas en un mapa apoyándose en accidentes o construcciones fácilmente reconocibles como cruces de carreteras. Las imágenes con los mapas de defoliación superpuestos se pueden digitalizar para tratarlas con un SIG y editar posteriormente cartografía temática de la zona.

2.9.12. Ubicación de carreteras

La localización preliminar de carreteras se puede efectuar a partir del examen estereoscópico de las fotografías aéreas. Se pueden evaluar y medir con precisión las laderas si es necesario. Se pueden así mismo estimar las condiciones de la geología y de los suelos. Se pueden reconocer las formas del terreno y las características topográficas menores y estudiar los cauces de agua y las condiciones de humedad del suelo.

La localización final es posible a partir de medidas cuidadosas de fotografías aéreas y de mapas topográficos construidos a partir de ellas.

El primer paso en el proyecto de una carretera es el reconocimiento del área para determinar posibles trazados. Ésto se hace mejor sobre mapas topográficos existentes o a partir de mapas topográficos nuevos desarrollados a partir de fotografías aéreas de pequeña escala, 1:25 000 o menor. Dentro de la zona servida por la carretera propuesta, se estudia una faja de un ancho aproximadamente igual a la mitad de la longitud de la carretera para localizar posibles trazados alternativos. Estas alternativas, una vez dibujadas en el mapa, son examinadas en gabinete por un experto en fotogrametría y por un especialista en suelos, de cuyos informes se elige el trazado o trazados más viables para un análisis más profundo.

El segundo paso consiste en la construcción de un mapa de escala mayor. Las fotografías previamente tomadas se utilizan para trazar mapas topográficos de los trazados elegidos y sus alrededores. La escala del mapa debe ser en este caso 1:5.000 o mayor, y la equidistancia deseable es de 5 m o menor. En el trazado de las curvas de nivel, el operador advertirá cualquier evidencia de afloramientos rocosos, desprendimientos, áreas encharcadas, pendientes y otros datos que contribuyan a la ubicación final de la carretera. También se tomarán varios puntos de referencia gracias a los cuales el ingeniero en el campo se puede ubicar a sí mismo. El mapa construido y las fotografías son utilizadas por el ingeniero para proyectar el trazado preliminar y visitar el monte.

El tercer paso consiste en la preparación de un mapa de escala grande. Después de que se haya trazado el anterior mapa, se toma una fotografía de gran escala de la zona del trazado. A partir de esta foto, de escala que oscila entre 1:5 000 y 1:6 000, es posible efectuar el trazado final a escalas mayores de 1:2 500 con equidistancias en torno a 1 m. En estos mapas se pueden trazar y calcular las localizaciones finales, incluyendo el eje, los vértices, los desmontes y los terraplenes.

2.10. La Fotogrametría en Internet

Las nuevas tecnologías, con el enorme desarrollo que han cobrado en los últimos años, se han convertido en un pilar básico de la economía de los países desarrollados, siendo herramienta indispensable en cualquier actividad científica o empresarial que en ellos se desarrolle, habiendo supuesto una revolución solamente equiparable a la que originó el descubrimiento del petróleo.

Dentro de ellas, las tecnologías de la comunicación, y muy especialmente Internet, ponen a nuestra disposición una ingente cantidad de información, siendo tal su volumen que, en muchas ocasiones, un usuario deseoso de conocer aspectos relativos a un determinado tema, pierde un tiempo inestimable en su búsqueda.

Es por ello que se ha considerado deseable incluir alguna referencia a direcciones de Internet útiles para las personas que, estando interesadas en el campo de la Fotogrametría, puedan necesitar algún tipo de información (ya sea sobre aspectos teóricos, equipos, fotografías aéreas disponibles on-line, etc.) en un momento dado.

Es evidente que esta relación de direcciones no es completa, ni puede pretender serlo, debido a la magnitud del volumen de información existente y a la acelerada dinámica que acompaña a Internet desde el momento mismo de su creación, pero sí puede ahorrar un tiempo valioso al usuario, al orientarlo hacia aquellas direcciones que le puedan resultar más adecuadas a sus necesidades en un momento dado.

Para mayor comodidad en el manejo de las direcciones, se han dividido en cinco apartados: organismos oficiales, universidades, asociaciones, empresas privadas y directorios con enlaces a direcciones de temas cartográficos.

2.10.1. Organismos oficiales

– *U. S. Geological Survey. Earth Science Information Center*

Servidor oficial del Departamento de Interior del Gobierno de los Estados Unidos en el que se encuentra disponible todo tipo de información geográfica, incluidas fotografías aéreas. Este organismo trabaja en cooperación con más de 2.000 organizaciones distribuidas por todo el país para proporcionar una información científica fiable e imparcial

<http://ask.usgs.gov>

– *INFEO (Information on Earth Observation)*

El sistema INFEO (Información sobre Observación Terrestre) ofrece acceso a este tipo de información y servicios, así como bases de datos de todo el mundo. El servicio INFEO es proporcionado por el CEO (Centre for Earth Observation), que pertenece a la Unión de Centros de Investigación de la Comisión Europea.

<http://www.infeo.org>

- *CNIG (Centro Nacional de Información Geográfica, dependiente del Instituto Geográfico Nacional)*

Por el momento no hay acceso online a los archivos de fotografías aéreas de España, pero se prevé que lo haya en breve.

<http://www.cnig.ign.es>

- *ICC (Instituto Cartográfico de Cataluña)*

Sitio muy interesante y absolutamente recomendable, sobre todo para aquellos con necesidades de trabajar en este área geográfica. Disponibles fotografías de vuelos efectuados en la Comunidad Autónoma de Cataluña. 245 000 negativos de fotografías aéreas verticales (23 x 23 cm). Aparte de la incorporación de fondos antiguos, la Fototeca tiene un incremento anual de un 4 % a partir de la producción propia de vuelos del ICC. Existentes fotografías en blanco y negro (90%), color (8,5%) e infrarrojo color (1,5%).

También hay disponible un ortofotomapa de Cataluña a escala 1:5 000.

<http://www.icc.es>

2.10.2. Universidades

- *Institut für Photogrammetrie und Ingenieurvermessungen. Universität Hannover. (Páginas disponibles en lengua inglesa)*

Enseñanza, investigación, publicaciones e información interesante sobre los institutos de investigación alemanes en materia de cartografía en general y fotogrametría en particular.

<http://www.ipi.uni-hannover.de>

- *Royal Institute of Technology (Kungl Tekniska Högskolan), Stockholm, Sweden*

En este Instituto existe un departamento de Geodesia y Fotogrametría que presenta en Internet sus actividades y proyectos, así como programas académicos de pregrado y postgrado.

<http://www.geomatics.kth.se/>

- *University of Georgia. Department of Geography*

Este Departamento trabaja en cartografía, fotogrametría, teledetección y SIG. Dentro de él se encuentra el Centro de Teledetección y Ciencias Cartográficas (Center for Remote Sensing and Mapping Science, CRMS) lleva a cabo proyectos de investigación interdisciplinarios que requieren el desarrollo de tecnologías de información y procesamiento de imágenes y mapas para aplicaciones en las ciencias físicas, biológicas y cartográficas.

<http://www.uga.edu/geography/>

- *Servicio de Cartografía de la Universidad Autónoma de Madrid*

En esta dirección hay disponible información sobre proyectos, publicaciones y fondos cartográficos disponibles.

<http://www.uam.es/otroscentros/cartografia/default.html>

- *Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Topografía*
Ofrece servicios variados en Internet, aunque no demasiado relacionados con el campo de la fotogrametría.
<http://nivel.euitto.upm.es/>

2.10.3. Asociaciones

- *Sociedad Española de Cartografía, Fotogrametría y Teledetección.*
Los fines de la Sociedad son los siguientes:

- Favorecer el progreso científico y técnico de la Cartografía, la Fotogrametría y la Teledetección.
- Promover en España el conocimiento de las referidas materias y de sus aplicaciones prácticas.
- Promover la unión entre los profesionales relacionados con estas materias, así como difundir entre ellos la información sobre el desarrollo y evolución de las mismas, sus técnicas de aplicación y los instrumentos que emplean.

El sitio ofrece información sobre las distintas revistas existentes en relación a los temas de fotogrametría y teledetección y proporciona enlaces con las mismas.
<http://telenet.uva.es/promotores/nose.html>

- *Remote Sensing of Environment*
Página de la revista, que sirve al colectivo interesado en teledetección mediante la publicación de resultados científicos y técnicos en relación a teorías, experimentos y aplicaciones de la teledetección a los recursos naturales y el medio ambiente.
<http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/0/5/7/3/3/index.htm>

- *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*
Esta revista es la publicación estrella de la Sociedad “Imaging & Geospatial Information Society”. Aquí hay disponibles tablas de contenidos, portadas, sumarios, información para autores, y próximamente una base de datos para consultas.
<http://www.asprs.org/publications.html>

- *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*
Información muy completa sobre las actividades de la Sociedad Internacional de Fotogrametría y Teledetección, Organización No Gubernamental dedicada al desarrollo de la cooperación internacional para el avance en los campos de la fotogrametría y la teledetección, así como en sus aplicaciones.
<http://www.isprs.org>

- *Organisation Européenne d’Etudes Photogrammétriques Expérimentales*
La Organización Europea de Estudios Fotogramétricos Experimentales es una organización pan-europea que tiene por objeto mejorar y promover los métodos, la eficacia y la aplicación de la fotogrametría a través del desarrollo de la cooperación internacional en la investigación, sobre todo en aquella de naturaleza experimental y práctica.

<http://www.itc.nl/~oeepe/>

Las asociaciones cuyas direcciones se presentan a continuación pertenecen a diversos países, y son asociaciones de carácter profesional dentro de las áreas de la fotogrametría, foto-interpretación, teledetección, análisis de imágenes digitales y tecnologías de información geográfica. Todas ellas representan a sus respectivos países en asuntos de cooperación internacional en el ámbito de la fotogrametría, y promueven el desarrollo y el uso de la misma.

- *The Finnish Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

<http://foto.hut.fi/seura/fsprs.html>

- *Swiss Society of Photogrammetry, Image Analysis and Remote Sensing*

<http://www.geod.ethz.ch/sgpbf/sspiars/sspiars.html>

- *Swedish Society for Photogrammetry and Remote Sensing*

http://www.geomatics.kth.se/ssff/index_e.html

- *Deutsche Gesellschaft für Photogrammetrie und Fernerkundung e.v.*

<http://www.dgpf.de>

- *Chinise Society of Photogrammetry and Remote Sensing*

<http://www.csprs.org.tw/chinataipei.html>

- *Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto*

<http://www.rio.com.br/sbegfsr/>

2.10.4. Empresas privadas

- *3-D Fotogrametría*

Empresa madrileña cuya actividad está dirigida a:

- Realización y diseño de Cartografía digital mediante restitución fotogramétrica.
- Digitalización de todo tipo de planos utilizando métodos y sistemas fotogramétricos.

- Rasterización y vectorización.
- Generación de modelos digitales del terreno para la obtención de ortoimágenes.
- Simulación de paisajes y vuelos virtuales, etc.

<http://www.3-d.es>

– *Cartográfica de Canarias, S. A.*

Empresa que desarrolla su actividad en el campo de la INGENIERIA GEOGRAFICA: Sistemas de Información Geográfica, Catastro, Tratamiento de Imágenes, Geodesia, Cartografía básica y temática, Fotogrametría, Control y Vigilancia de Bases de Datos Geográficas y Topografía.

En lo referente al campo específico de la fotogrametría, GRAFCAN, S.A. ha incorporado a su línea de productos la ortofoto a color. Se encuentra disponible la totalidad del territorio de Canarias a escala 1:5.000 (y superiores) y a escala 1:2.000 de zonas urbanas y periféricas de acuerdo con las especificaciones del Plan Regional de Cartografía.

También hay disponible material procedente de vuelos fotogramétricos en blanco/negro y color de diversas escalas y zonas realizadas desde 1987, en los siguientes formatos:

- Fotografía aérea B/N y Color papel.
- Fotografía aérea B/N y Color digital.
- Diapositiva Digital Fotogramétrica.

La empresa concluye su oferta fotogramétrica con la realización de vuelos fotogramétricos especiales para todo tipo de trabajos.

Todo este material se puede encargar rellenando el formulario que aparece en la dirección de la empresa, y ésta lo envía al cliente.

<http://www.grafcan.rcanaria.es/>

– *Intergraph España*

Intergraph España es líder en soluciones software, hardware, formación y consultoría en los campos de GIS, Proceso, Ingeniería Civil, Diseño Mecánico, Digital Media y todas las áreas del Diseño Gráfico. Para ello dispone de Estaciones de Trabajo que cubren todas las gamas, así como Servers, Plotters, Scanners, Aceleradores Graficos, etc.

<http://www.intergraph.com/spain/>

– *Caribersa*

Esta empresa proporciona fotografías aéreas, de tipo normal o gran-angular, blanco y negro, color o falso color, a escalas entre 1/1 000 y 1/60 000, disponiendo así mismo de los medios aéreos necesarios para efectuar los vuelos requeridos por el cliente.

<http://caribersa.com/>

– *Geomap*

GEOMAP S.A., fue creada en el año 1.982 para el desarrollo y realización de trabajos topográficos y cartográficos, contando desde su fundación con personal técnico altamente cualificado y tecnologías avanzadas tanto físicas como lógicas, realizando, entre otros, trabajos de cartografía con técnicas de restitución fotogramétrica.

<http://mercator.org/geomap/>

2.10.5. Directorios

– *Directorio Cartográfico de España (DICES)*

El Directorio Cartográfico de España es una iniciativa que tiene por objeto recopilar todos los recursos posibles en la red relacionados con la Cartografía, los Sistemas de Información Geográfica, y la Teledetección.

<http://www.dices.net>

– *MERCATOR*

MERCATOR es el acrónimo de Medios y Recursos Cartográficos y Topográficos en la Red, título que explica el objetivo general de esta organización, que es poner a disposición de los hispanohablantes una herramienta de comunicación desarrollada para ser utilizada dentro del entorno Topográfico y Cartográfico. El directorio cuenta con un apartado dedicado a la Fotogrametría con 50 enlaces encontrados de direcciones dentro de este campo.

<http://www.mercator.org>

2.11. Bibliografía

- ALDRICH, R.C. and NORICK, N.X. 1969. *Stratifying Stand Volume on Non-Stereo Aerial Photos*. USDA Forest Service General Research Paper PSW-51, Berkeley, California: Pacific Southwest Forest and Range Experiment station, 14p.
- CIESLA, W. M., 1974. *Forest insect damage from high-altitude color-IR photos*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1974, pp. 683-688.
- CLAVO, L. D. 1982. *Apuntes de fotogrametría*. E.U.I.T. Topografía. Madrid.
- CHUECA, M. 1982. Topografía, II. *Fotogrametría terrestre y aérea*. Ed Dossat S. A.
- FERRER TORIO, R. 1987. *Fotogrametría*. E.T.S.I. Caminos, Canales y Puertos. Universidad de Cantabria.
- GINGRICH, S. F. 1967. *Measuring and evaluating stocking and stand density in upland hardwood forest in the central states*. Forest Science 13(1):38-53.
- GONG, P. and BIGING, G. 1995, *Hardwood Monitoring Using an Airborne Digital Camera Integrated with a Low-cost Positioning/Attitude reference System*, Research proposal.
- HAMILTON, F. and BRACK, C.L. (1999) *Stand volume estimates from modelling inventory data*. Australian Forestry, 62(4): 360 - 367.
- HELLER, R. C., 1978. *Case Applications of Remote Sensing for Vegetation Damage Assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Sep. 1978, pp. 1159-1166.
- HERRERA, B. 1987. *Elementos de fotogrametría*. Ed Limusa.
- KRAJICEK, J. E., K. A. BRINKMAN, and S. F. GINGRICH 1961. *Crown Competition-A measure of density*. Forest Science 7(1):35-42.
- LEHMANN, E. 1975. *Fotogrametría*. Editores Técnicos Asociados S. A.
- LILLESAND, T. M. y KIEFER, R. W. 2000. *Remote sensing and image interpretation*. Ihon Wiley and Sons.
- LÓPEZ CUERVO, S. 1980. *Fotogrametría*. Dossat.
- LUND, *Manual of Photographic Interpretation*, ed. W. R. Philipson, 1997.

- MOP 1975, a. *Planeamiento de los trabajos ortofotográficos*. Centro de Estudios Hidrográficos. Dirección General de Obras Hidráulicas, 1975.
- MOP 1975, b. *Pliegos de prescripciones técnicas para la ejecución de trabajos fotogramétricos*. 2º Ed Centro de Estudios Hidrográficos. Dirección General de Obras Hidráulicas. 1975.
- MURTHA, P. A., 1978. *Remote sensing and vegetation damage: a theory for detection assessment*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 44(9): 1147-1158.
- MURTHA, P. A. Y WIART, R. J., 1988. *PC-based digital image separation of mountain pine beetle current attack*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 55 (1): 83-86.
- ROGERS, EARL, J., 1959. *Proposed forest survey applying aerial photographs in regression technique*. Photogram. Engineer., 25: 443-445.
- SPURR, S.H., 1960. *Photogrammetry and Photo-Interpretation*. The Ronald Press Company, New York.
- WEBER, F. P. 1972. *Remote sensing to detect stress in forests*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1972, pp. 163-175.
- WOLF, P. R., 1974. *Elements of Photogrammetry*. McGraw-Hill.
- ZHIRIN, V. I., 1983. *Aerial survey and satellite-imagery methods of following up changes in forests and carrying out periodoc revisions*. Moscow, USSR.

APÉNDICE . AMPLIACIÓN A LOS SISTEMAS DE CLASIFICACIÓN

S. Merino

Clasificación por máxima probabilidad

Los métodos de clasificación supervisada se basan en la información suministrada al sistema a través de las áreas de entrenamiento para establecer patrones de respuesta espectral que caracterizarán cada categoría de la leyenda. Estos patrones son empleados en una fase posterior para asignar cada elemento de la zona de estudio (por ejemplo, cada pixel de la imagen digital) a una categoría (Cihlar *et al.*, 1998). En todos los métodos de clasificación supervisada se asume que las localizaciones de las áreas de entrenamiento sobre la zona de estudio son precisas y representativas de la categoría que caracterizan (Cihlar *et al.*, 1998). Dichos métodos no tienen en cuenta las variaciones espectrales dentro de cada tipo de cubierta ni las variaciones asociadas con la distancia al sistema sensor (Cihlar *et al.*, 1998).

De todos los métodos de clasificación supervisada, el método de la clasificación por máxima probabilidad es uno de los más comúnmente empleados por 'su robustez y por ajustarse con más rigor a la disposición original de los datos' (Chuvieco, 1996). El método de clasificación por máxima probabilidad es el más usado en el análisis de imágenes de satélite (Bolstad y Lillesand, 1991), así como en la elaboración de mapas de cobertura y mapas de usos del suelo a partir de dicho tipo de imágenes (Cihlar *et al.*, 1998).

El éxito de este clasificador puede atribuirse a distintos factores (Bolstad y Lillesand, 1991): (i) la toma de decisiones se hace en base a una ley de probabilidades que caracteriza la información, (ii) es un método que posee una base matemática y estadística bien desarrollada, (iii) se ajusta con eficacia a las características propias de las imágenes de satélite y, (iv) es un método que ha demostrado ser eficaz para distintas cubiertas, condiciones y sensores.

El método de clasificación por máxima probabilidad es un método de clasificación espectral supervisada del tipo paramétrico (Cortijo y Pérez de la Blanca, 1998). Se denomina espectral porque el proceso de clasificación se basa exclusivamente en el valor espectral del pixel que se quiere clasificar. Se denomina paramétrico porque se asume la existencia de una cierta función de distribución en los datos de partida.

La clasificación por máxima probabilidad realiza la asignación de cada pixel a una clase espectral determinada basándose en la varianza y en la covarianza del conjunto de las categorías de la leyenda (Lillesand y Kiefer, 1994). Para ello se asume que cada conjunto de valores espectrales se ajusta a una campana de Gauss multivariante, es decir, se distribuye normalmente.

La información espectral extraída de las áreas de entrenamiento puede representarse como una nube de puntos en un espacio n-dimensional, donde 'n' es el número de bandas o imágenes que intervienen en la clasificación. Idealmente, las nubes de puntos estarán separadas unas de otras, representando cada una de ellas una clase de la leyenda. De la distribución, forma y grado de solapamiento entre clases depende en gran medida la calidad de la clasificación final.

La forma de estas nubes de puntos puede muy a menudo asimilarse a un elipsoide, o en términos más estrictos, a un hiperelipsoide, si el número de imágenes involucradas en la clasificación es superior a tres (Mather, 1999). La varianza de una variable cualquiera 'i' es la proyección del hiperelipsoide sobre el eje i-ésimo. Por otra parte, la orientación y las dimensiones relativas de dicho hiperelipsoide depende del grado de covarianza entre las variables o bandas que intervienen en la clasificación (Lillesand y Kiefer, 1994). Si la covarianza entre todas las variables es cero o próxima a

zero, los hiperelipsoides se convierten en hiperesferas. En resumen, la localización, forma y tamaño de los hiperelipsoides informan sobre la media, varianzas y covarianzas de las variables, bandas o imágenes consideradas (Mather, 1999).

Asumida la condición de normalidad en la distribución de los datos espectrales, cada categoría de la leyenda queda automáticamente definida mediante el vector media (de dimensión 'n') y la matriz de varianza-covarianza (de dimensión 'n x n') (Lillesand y Kiefer, 1994). Conocida la función de densidad que caracteriza cada nube espectral o categoría de la leyenda, se calculan las probabilidades de pertenencia a cada categoría del pixel que se quiere clasificar. Conocidas todas las probabilidades de pertenencia, se asignará el pixel a aquella categoría más probable, es decir, la que proporcione el valor de probabilidad más alto.

En ocasiones se establecen valores de probabilidad umbrales mínimos de forma que si el pixel que se está valorando no los alcanza, no será asignado a ninguna categoría y quedará no clasificado. De esta forma se evita que los pixeles con baja probabilidad de pertenencia a todas o determinadas clases queden asignados, reduciendo así los errores de comisión (Chuvieco, 1996). Los valores umbrales, generalmente establecidos por un experto, pueden tener el mismo o distinto valor para cada categoría de la leyenda.

Asumir la hipótesis de normalidad en la distribución de los datos espectrales puede constituir un inconveniente a la hora de aplicar este método de clasificación, ya que se asumen curvas o distribuciones unimodales cuando ocurre que muchos problemas prácticos presentan funciones de distribución multimodales (Cortijo y Pérez de la Blanca, 1998). Lillesand y Kiefer (1994) aseguran que la hipótesis de normalidad suele mantenerse razonablemente bien para la mayoría de las firmas espectrales. Por su parte Mather (1999) indica que el método de clasificación por máxima probabilidad no es excesivamente sensible a desplazamientos fuera de curva unimodal definida por la ley normal y que en cualquier caso bastaría con realizar una clasificación no-supervisada para comprobar si los datos de cada categoría espectral son o no multimodales. En estos casos la función de densidad multimodal puede ser modelada como la suma de una serie de funciones de densidad unimodales, cada una de las cuales puede ser multiplicada por un peso (Cortijo y Pérez de la Blanca, 1998).

Desde un punto de vista gráfico, la clasificación por máxima probabilidad se basa en la construcción de hiperelipsoides concéntricos equiprobabilísticos (Lillesand y Kiefer, 1994). Como es obvio, cuanto más cerca del centro de gravedad de la categoría se sitúe el hiperelipsoide, menor será el porcentaje de elementos incluidos en su interior. Cada hiperelipsoide dentro de una familia de hiperelipsoides concéntricos representa cierta probabilidad de pertenencia a dicha familia o categoría, dicha probabilidad disminuye a medida que nos alejamos del centro de gravedad (Mather, 1999). Dado que los hiperelipsoides tendrán por lo general distintas dimensiones en las distintas direcciones, la probabilidad de pertenencia a una determinada categoría también variará de distinto modo según la dirección en que nos movamos. En concreto, la probabilidad de pertenencia decrecerá más rápidamente a lo largo de los ejes más cortos y más lentamente en los ejes más largos.

Es razonable esperar que el clasificador máxima probabilidad sea más eficaz a la hora de realizar las asignaciones que otros clasificadores como el de los paralelepípedos o el clasificador mínima distancia. Estos métodos únicamente consideran la distancia al centro de gravedad de la categoría frente al clasificador máxima probabilidad que utiliza

además el conjunto de la información para estimar la forma de las distribuciones de pertenencia a cada categoría de la leyenda (Mather, 1999).

Estadísticamente, la probabilidad de que un determinado pixel 'x' (vector de dimensión 'n') pertenezca a una determinada clase espectral 'θ_i', viene dado por la siguiente expresión que no es otra cosa que la función de densidad de una variable normal n-dimensional:

$$P\left(\frac{\mathbf{x}}{g_i}\right) = \frac{1}{(2\pi)^{n/2} \cdot |S_{g_i}|^{1/2}} \cdot \exp\left\{-\frac{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)' \cdot S_{g_i}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)}{2}\right\}$$

Donde, S_{θ_i} es la matriz de varianza-covarianza para la clase 'i' y $\bar{\mathbf{x}}_i$ representa el vector media de la clase espectral 'θ_i'. El numerador de la exponencial representa la distancia desde el centro de gravedad de la clase espectral 'θ_i' al vector 'x', corregida y escalada por la varianza y covarianza de la propia clase (Strahler, 1980).

Según Smits *et al.* (1999), dos son las ventajas de la clasificación por máxima probabilidad en comparación con el resto de los métodos de clasificación supervisada: (i) precisión a la hora de realizar la asignación y (ii) es un método que considera la variabilidad dentro de las clases espectrales.

Entre los inconvenientes que tiene el método de clasificación por máxima probabilidad, a parte de la mencionada hipótesis de normalidad, conviene mencionar el alto coste computacional dado el gran número de cálculos que deben realizarse (Ahearn y Wee, 1991; Bolstad y Lillesand, 1991). Esta situación se hace especialmente patente cuando son muchas las imágenes involucradas en el proceso de clasificación, cuando es muy grande la escena que quiere clasificarse o cuando son muchas las categorías de la leyenda (Lillesand y Kiefer, 1994). Afortunadamente, existen distintas estrategias que permiten hacer más eficaz la implementación de este algoritmo sin reducir la calidad del proceso de clasificación.

Una de las opciones es simplificar la expresión matemática utilizada para calcular la probabilidad de pertenencia a cierta categoría de la leyenda. Esta operación puede realizarse tomando logaritmos neperianos en ambos miembros de la expresión vista anteriormente (Strahler, 1980; Mather, 1999). La función resultante conserva las propiedades de la primigenia (monótona creciente) y es más fácil de calcular al desaparecer el término exponencial. El resultado aparece a continuación:

$$\ln\left[P\left(\frac{\mathbf{x}}{g_i}\right)\right] = -\frac{n \cdot \ln(2\pi)}{2} - \frac{\ln|S|}{2} - \frac{(\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)' \cdot S_{g_i}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)}{2}$$

Una función aún más sencilla puede obtenerse eliminando los términos constantes (n, Ln(2π)) y llevando el común denominador al primer miembro de la expresión (Strahler, 1980; Mather, 1999), resultando la siguiente expresión:

$$-2 \cdot \ln\left[P\left(\frac{\mathbf{x}}{g_i}\right)\right] = \ln|S| + (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)' \cdot S_{g_i}^{-1} \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{x}}_i)$$

Conviene también mencionar que la implementación será aún más eficaz si las inversas y los determinantes de las matrices de varianza-covarianza para cada clase espectral son calculados y almacenados en la memoria o en un fichero auxiliar, en lugar de ser calculadas cada vez que se necesitan (Mather, 1999).

En cuanto a la forma de leer la imagen, existen también ciertas variantes que resultan de gran interés. La implementación tradicional de este clasificador consistía en recorrer la imagen y clasificar cada pixel secuencialmente. Sin embargo, en una imagen grande, ciertas combinaciones de pixeles ocurren muchas veces (Ahearn y Wee, 1991), circunstancia que puede mejorar la implementación. Mather (1985) usó una tabla numerada de tamaño fijo en la que almacenó todas las combinaciones de pixeles existentes en la imagen junto con la categoría que correspondía a cada combinación. De esta forma las combinaciones de niveles digitales son clasificadas una sola vez, y no cada vez que aparece en la imagen. Estas tablas numeradas fueron el antecesor de la implementación 'look-up-table' (LUT).

La implementación LUT crea una tabla indexada con el identificador de cada categoría así como todas las posibles combinaciones de valores espectrales que aparecen en la imagen y que corresponden a dicha categoría (Lillesand y Kiefer, 1994). La clasificación se reduce entonces a un problema de localización de la combinación de valores de cada pixel en dicha tabla. Sobre esta implementación básica existen distintas modificaciones. Ahearn y Wee (1991) proponen la transformación del conjunto de las bandas en sus componentes principales y la utilización de estos últimos para la clasificación. Dicha transformación tiene sentido ya que la mayoría de las imágenes, aunque disponibles en varias bandas, tienen en realidad una dimensionalidad inferior. Bolstad y Lillesand (1991) proponen la creación de un LUT solo para los valores más frecuentes, los cuales son identificados a partir de los histogramas de todas las bandas, y la clasificación por métodos normales para el resto de los pixeles no incluidos en el LUT.

Durante la etapa de asignación o clasificación propiamente dicha, el clasificador máxima probabilidad, así como el resto de los métodos de clasificación supervisada, se basa únicamente en el valor del pixel que va a asignar. Debido a esta circunstancia, la imagen clasificada es una imagen con gran cantidad de ruido o moteado. Este ruido o moteado lo constituyen aquellos pixeles que han sido clasificados en una categoría distinta a la de los pixeles que le rodean (Cortijo y Pérez de la Blanca, 1999). Este fenómeno será tanto más frecuente cuanto mayor sea el solapamiento espectral entre las categorías de la leyenda. De hecho, Cortijo y Pérez de la Blanca (1998) recomiendan no utilizar el método de clasificación por máxima probabilidad cuando las áreas de entrenamiento utilizadas proporcionan categorías espectrales con alto grado de solapamiento. Si finalmente se opta por este clasificador, determinadas técnicas de post-procesado de la imagen pueden solventar el problema del moteado mejorando el aspecto del mapa final el cual se pretende contenga áreas más o menos homogéneas. Entre estos métodos estarían los filtros del tipo 'majority' caracterizados por no crear nuevos valores, valores que no tendrían sentido en la leyenda.

Otra circunstancia que conviene tener en cuenta es que el método de clasificación por máxima probabilidad no será aplicable a todo tipo de imágenes ni en todas las circunstancias, por lo que será conveniente documentarse con estudios previos a la hora de abordar una clasificación y seleccionar un algoritmo. En concreto, el método de clasificación por máxima probabilidad no será aplicable a imágenes radar de apertura sintética (imágenes SAR¹), imágenes obtenidas de una forma totalmente

¹ Imágenes radar de apertura sintética (SAR: Synthetic Aperture Radar)

distinta a las imágenes del espectro óptico y con características totalmente distintas (Smits *et al.*, 1999).

La utilización de imágenes de alta resolución espectral en la clasificación digital permite el uso de la información proporcionada a distintas longitudes de onda. Como consecuencia mejora la discriminación entre cubiertas así como la calidad de la imagen clasificada (Cortijo y Pérez de la Blanca, 1999). Es importante tener en cuenta esta circunstancia ya que los sensores de nueva generación incorporan un mayor número de bandas. Además, estas bandas suelen ser variables y de rango muy estrecho, proporcionando información mucho más precisa.

Finalmente, conviene mencionar, que durante los últimos años se han desarrollado diferentes técnicas y escenarios de clasificación encaminados a producir mejores mapas. Muchas de estas innovaciones se basan en las técnicas clásicas de clasificación, como la clasificación por máxima probabilidad que es utilizada muy a menudo como punto de partida al proceso de clasificación propiamente dicha o como técnica de suavizado en la clasificación contextual, un método de clasificación que se encuentra en pleno desarrollo (para más información sobre clasificación contextual ver: Mather, 1999; Cortijo y Pérez de la Blanca, 1998; Flygare, 1997).

Clasificación Bayesiana

La clasificación Bayesiana o por métodos Bayesianos es una extensión de la clasificación por máxima probabilidad y se caracteriza principalmente por la introducción del conocimiento previo. Dicho conocimiento previo es incorporado en el proceso de clasificación a través de la probabilidad *a priori*.

La probabilidad *a priori* es la probabilidad asociada al conocimiento de ocurrencia de cada una de las categorías de la leyenda en la zona de estudio de forma previa e independiente al proceso de clasificación propiamente dicho. Dicha probabilidad pondera cada categoría modificando la toma de decisiones (Strahler, 1980).

El conocimiento *a priori* mejora la precisión y calidad de la clasificación (Lillesand y Kiefer, 1994), sin embargo, no siempre es posible disponer de este tipo de información. Cuando no se tiene conocimiento o se tiene un conocimiento muy pequeño de la probabilidad *a priori*, se asume que todas las clases son igualmente probables, hipótesis que caracteriza el método de clasificación por máxima probabilidad anteriormente descrito.

Las probabilidades *a priori*, también denominadas pesos o ponderaciones, son características de cada zona de estudio y pueden obtenerse de diversos modos, algunos de los cuales se mencionan a continuación.

Puede ocurrir, por ejemplo, que algunas de las categorías de la leyenda ocupen mayor extensión superficial, y tengan asociada por lo tanto, mayor probabilidad de ocurrencia (Chuvieco, 1996). En el caso de utilizar los porcentajes de área ocupada por cada categoría de la leyenda como información *a priori*, conviene tener en cuenta que dicha información puede ser estimada a partir de muestreos, mapas de usos del suelo, fotografías aéreas o sencillamente, otras imágenes clasificadas previamente (Mather, 1999). Cuando no se dispone de información *a priori*, es posible realizar una clasificación supervisada por el método de la máxima probabilidad y utilizar la imagen resultante como información *a priori* para una segunda etapa utilizando la clasificación por métodos bayesianos.

En las figuras 1 y 2 aparecen dos clasificaciones, la primera realizada por el método de la máxima probabilidad y la segunda por el método bayesiano para el que se han utilizado los porcentajes de área ocupados por cada clase de la leyenda como información *a priori*. La zona que aparece clasificada está situada en el noroeste de la provincia de Madrid y abarca buena parte de los términos municipales de Cercedilla, Navacerrada, Collado Mediano y Becerril de la Sierra. La superficie que ocupa la imagen es de algo más de 10000 ha. Esta zona de la sierra madrileña se caracteriza por una notable variedad de cubiertas y esta escena en concreto, por un notable gradiente altitudinal. La clasificación se ha obtenido a partir de imágenes SPOT multiespectral del año 95. Posteriormente se ha aplicado un filtro mediana de tamaño 7x7 para limpiar el moteado, tal y como se ha mencionado al hablar de los clasificadores por máxima probabilidad. Los errores de omisión y comisión cometidos en ambas clasificaciones no fueron muy elevados, siendo en cualquier caso menores en el caso de la clasificación bayesiana (aunque difícilmente puede apreciarse a simple vista). La clase responsable de los mayores errores fue los matorrales.

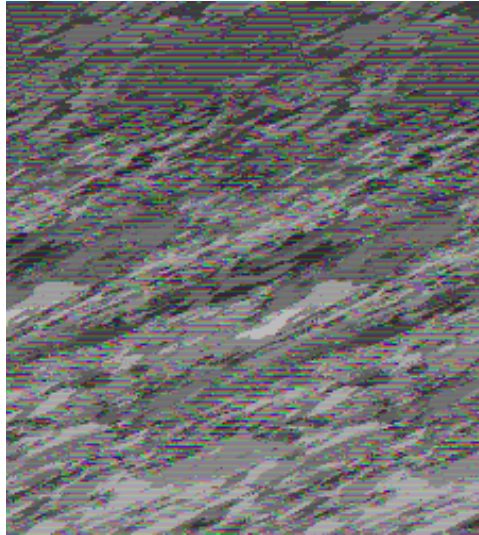


FIG. 1. CLASIFICACIÓN POR MÁXIMA PROBABILIDAD

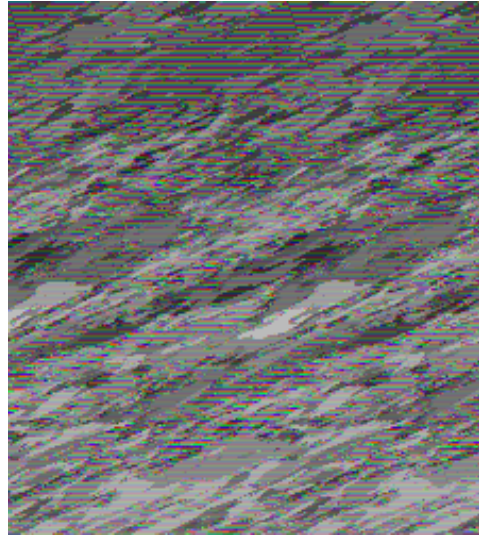


FIG. 2. CLASIFICACIÓN BAYESIANA

Para Strahler (1980) la clasificación Bayesiana constituye un poderoso mecanismo que permite unir variables colaterales a imágenes multiespectrales con el fin de mejorar la precisión de la clasificación. Las variables colaterales constituyen la información *a priori* definida con independencia al proceso de clasificación y pueden ser tantas como sea posible definir. Entre las mencionadas por el autor están: (i) tipo de suelo y el tipo de roca (aunque hay especies vegetales capaces de vivir casi sobre cualquier suelo, generalmente existe asociación entre aquellas y el tipo de suelo o de roca madre sobre el que se encuentran) (ii) altitud, pendiente y orientación (de igual modo ocurre que las especies vegetales de la zona de estudio tenderán a localizarse en un rango altitudinal y de pendiente concreto, igualmente preferirán unas u otras orientaciones).

En ocasiones es posible que clasificaciones de otras épocas o estaciones (más tempranas o más tardías) dentro de un mismo año o periodo vegetativo o incluso de otros años, constituyan una variable condicional externa que es posible utilizar como información *a priori* (Strahler, 1980). Un ejemplo clásico es el de los cultivos cuyos patrones espectrales pueden ser muy distintos en unas épocas y muy semejantes en otras. En el tema de los cultivos, es posible también utilizar las estadísticas agrarias, las solicitudes de subvención o las restricciones impuestas sobre determinados cultivos como información *a priori*.

El método de clasificación bayesiana se basa en el teorema de Bayes, cuya expresión matemática es la siguiente:

$$P(\theta_i/\mathbf{x}) = \frac{P(\theta_i) \cdot P(\mathbf{x}/\theta_i)}{\sum_{i=1}^n \{P(\theta_i) \cdot P(\mathbf{x}/\theta_i)\}}$$

Donde, $P(\theta_i/\mathbf{x})$ es la probabilidad a posteriori o probabilidad de que la hipótesis sea verdadera dada por cierta la evidencia; $P(\theta_i)$ es la probabilidad a priori o probabilidad de que la hipótesis sea cierta sin tener en cuenta la evidencia; $P(\mathbf{x}/\theta_i)$ es la verosimilitud o probabilidad del vector \mathbf{x} supuesto que \mathbf{x} pertenece a la clase θ_i de la

leyenda (también definida como la probabilidad de encontrar la evidencia cuando la hipótesis es cierta) (Eastman, 1997). El denominador es simplemente un factor de normalización.

En la expresión matemática del teorema de Bayes mostrada anteriormente, la verosimilitud procede de la información suministrada al sistema a través de las áreas de entrenamiento, frente a la probabilidad a priori, que es suministrada al sistema directamente por el experto y que procede del conocimiento externo. Una mayor probabilidad *a priori* para la clase ' θ_i ' en comparación con la clase ' θ_j ' implica que, a igual verosimilitud, el pixel será asignado a la clase ' θ_i ', caracterizada por un mayor peso (Mather, 1999).

Finalmente, conviene tener en cuenta qué ocurre cuando se emplean valores extremos de probabilidad *a priori*. Una categoría de la leyenda con una probabilidad *a priori* muy pequeña prácticamente quedará eliminada del mapa final (Strahler, 1980). Por el contrario, una categoría con probabilidad *a priori* extrema prácticamente eliminará la información proporcionada a través de las áreas de entrenamiento.

Clasificación blanda o difusa

Los métodos duros o rígidos de clasificación digital de imágenes (clasificación por paralelepípedos, mínima distancia o máxima probabilidad) asignan cada pixel a una y solo a una de las categorías definidas en la leyenda. Este planteamiento está muy extendido aunque resulta algo limitado ya que asume algunas hipótesis que no siempre se ajustan a la realidad (Fisher y Pathirana, 1990): (i) todos los píxeles representan de forma pura las distintas categorías, es decir, son homogéneos y (ii) todas las categorías de la leyenda generan una signatura espectral distinta y propia.

Frente a éstos métodos de clasificación surgen toda una serie de procedimientos con un denominador común: expresar grados de pertenencia de cada pixel a las distintas categorías de la leyenda. Estos métodos generalmente se denominan métodos de clasificación blandos, difusos o borrosos. En la literatura inglesa se les conoce como métodos '*fuzzy*' o métodos '*soft*'. Los clasificadores blandos pertenecen al grupo de los métodos de clasificación supervisada puesto que emplean áreas de entrenamiento como fuente de información.

Anteriormente se ha hecho alusión a la idea de pixel homogéneo. Asumir que un pixel es homogéneo es tanto como asumir que la radiancia que procede de dicho pixel corresponde a un único tipo de cubierta (Chuvienco, 1996). Sin embargo, en la mayoría de los casos ocurre que dicha energía es en realidad una mezcla de la energía reflejada y/o emitida por las distintas cubiertas que se sitúan dentro y alrededor del pixel que se está observando. Al clasificar el pixel en estas circunstancias, se está optando por la cubierta 'energéticamente' dominante que suele coincidir con la que ocupa mayor extensión. Sin embargo, existen ciertos fenómenos, como los incendios, cuya presencia puede ser detectada aun cuando ocupen tan solo un 5-10% de la superficie del pixel, siempre que se utilice la banda apropiada del espectro.

Para los investigadores Fisher y Pathirana (1990) dos son las causas fundamentales que originan el fenómeno de los 'píxeles con mezcla'. Por una parte, el hecho de que los píxeles pueden caer en zonas de límites entre cubiertas, y por otra, el fenómeno subpixel, como la presencia de un árbol o arbusto en medio de un herbazal, o la existencia de una edificación aislada.

También conviene introducir el concepto de homogeneidad o regularidad de la escena y decir que ésta es una propiedad del territorio estrictamente vinculada con la escala geográfica (Woodcock y Strahler, 1987), escala que suele estar definida por el experto en función de los objetivos del estudio. El grado de homogeneidad de la escena va a estar condicionado por dos factores interrelacionados: (i) las características intrínsecas de la zona de estudio y (ii) el tamaño de la unidad de muestreo, es decir, la resolución espacial o tamaño del pixel de la imagen digital que se utilice.

Como es de esperar, difícilmente una imagen NOAA AVHRR², con un pixel de tamaño 1.1 km (supuestos: vista nadir y HRPT³ o LAC⁴ data), tendrá muchos píxeles sin mezcla. Para resoluciones más pequeñas, como los 20 o 30 m del SPOT-XS o Landsat-TM (Landsat-4,-5) respectivamente, la posibilidad de encontrar píxeles puros mejora pero sigue dependiendo de cómo son y se distribuyen las teselas del territorio dentro de la zona de estudio (Mather, 1999). Afortunadamente, el problema de la

² AVHRR: Advanced Very High Resolution Radiometer

³ HRPT: High Resolution Picture Transmission

⁴ LAC: Local Area Coverage

resolución espacial es cada vez menos limitante gracias a los sensores de nueva generación, con los que pueden alcanzarse resoluciones de hasta 1 m (Ikonos, OrbView3).

En términos generales puede decirse que los ‘pixeles con mezcla’ representarán un problema en la clasificación de la cubierta cuando: (i) el sensor utilizado se caracterice por una baja resolución espacial (pixel de gran tamaño), (ii) cuando el área de estudio presente alta variabilidad, (iii) cuando la escala de variación del elemento de interés sea menor que el tamaño del pixel (Mather, 1999), o bien, (iv) cuando las categorías sean variables continuas, como por ejemplo la temperatura o el NDVI (Foody y Cox, 1994).

Una vez el fenómeno de ‘pixeles con mezcla’ es analizado y considerado de suficiente entidad como para no poder ser obviado, se puede optar por varias soluciones. Una de las posibles opciones sería seguir utilizando un clasificador rígido pero variar la leyenda, en cuyo caso tendríamos a su vez dos posibilidades (Chuvieco, 1996): (i) agrupar aquellas categorías entre las que exista mezcla, reduciendo por tanto la confusión entre categorías, o bien, (ii) crear nuevas categorías que sean en realidad categorías intermedias o mezcla entre dos o más de las primigenias.

Por su parte, Foody y Cox (1994) señalan la presencia de ‘pixeles con mezcla’ como una de las más comunes causas de imprecisión en las clasificaciones por métodos rígidos, por lo que seguir utilizando cualquiera de los clasificadores clásicos puede no ser la opción más acertada.

Como alternativa a los clasificadores rígidos se han desarrollado durante los últimos años dos grupos de técnicas: (i) modelos de mezclas espectrales y (ii) clasificadores blandos o difusos propiamente dichos. Ambos serán explicados a continuación.

Por último, conviene mencionar que las técnicas de clasificación difusa han contribuido a mejorar la calidad de la clasificación final en la elaboración de mapas temáticos. Igualmente estos métodos han demostrado ser de gran eficacia en la elaboración de inventarios forestales y de vegetación que resultan de gran interés en la estimación de variables continuas como las densidades y las superficies (Chuvieco, 1996).

Modelos de mezclas espectrales

El modelo de mezclas espectrales parte de la premisa de que la energía que llega al sensor procedente de una parcela de la superficie terrestre, es mezcla de la energía emitida y/o reflejada por las distintas cubiertas que en realidad constituyen la parcela. El objetivo del modelo de mezclas es obtener información sobre las coberturas que aparecen en cada pixel así como su grado de presencia (Mather, 1999).

El modelo lineal de mezclas espectrales propuesto por Mather (1999) consiste en asumir que si cada fotón llega al sensor lo hace directamente desde la superficie terrestre, es decir, sin haber interactuado con ningún otro elemento, la totalidad de fotones procedentes a un pixel y que interactúan con el sensor pueden ser descritos por un modelo lineal. Es decir, si se asume que ‘la radiancia de un determinado pixel con mezcla es una combinación lineal de la radiancia de cada cubierta en proporción equivalente a la superficie que ocupan’ (Chuvieco, 1996).

Matemáticamente la relación descrita se expresa de la siguiente forma: la radiancia total en la banda i -ésima del espectro (r_i) es la suma de las radiancias de las ‘ m ’ cubiertas presentes ($r_{i1}, r_{i2}, \dots, r_{ij}, \dots, r_{im}$) multiplicadas por los porcentajes de área que

ocupa cada cubierta ($a_1, a_2, \dots, a_j, \dots, a_m$) más un cierto error (e_i). Dicha relación se expresa a continuación (a partir de Mather, 1999):

$$\begin{cases} r_1 = a_1 \cdot r_{11} + a_2 \cdot r_{12} + \dots + a_j \cdot r_{1j} + \dots + a_m \cdot r_{1m} + e_1 \\ r_2 = a_1 \cdot r_{21} + a_2 \cdot r_{22} + \dots + a_j \cdot r_{2j} + \dots + a_m \cdot r_{2m} + e_2 \\ \dots \\ r_i = a_1 \cdot r_{i1} + a_2 \cdot r_{i2} + \dots + a_j \cdot r_{ij} + \dots + a_m \cdot r_{im} + e_i \\ \dots \\ r_n = a_1 \cdot r_{n1} + a_2 \cdot r_{n2} + \dots + a_j \cdot r_{nj} + \dots + a_m \cdot r_{nm} + e_n \end{cases}$$

O de forma matricial, completa y abreviada:

$$\begin{bmatrix} r_1 \\ r_2 \\ \dots \\ r_i \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} & \dots & r_{1m} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} & \dots & r_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{i1} & r_{i2} & \dots & r_{ij} & \dots & r_{im} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} & \dots & r_{nm} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \dots \\ a_j \\ \dots \\ a_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \dots \\ e_i \\ \dots \\ e_m \end{bmatrix} \quad \boxed{\mathbf{r} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{a} + \mathbf{e}}$$

En la ecuación matricial mostrada, ' \mathbf{r} ' es la respuesta espectral de cada pixel, \mathbf{R} es la matriz de dimensión ' $n \times m$ ' de las radiancias espectrales de las distintas categorías de la leyenda en las distintas bandas, ' \mathbf{a} ' es el vector incógnita de las proporciones ocupadas por cada categoría presente en el pixel y ' \mathbf{e} ' es el vector error medio. La matriz \mathbf{R} puede obtenerse de diversas formas (Foody y Cox, 1994): (i) a partir de datos radiométricos medidos en campo, (ii) a partir de librerías, o bien, (iii) a partir de pixeles puros.

Para poder resolver este sistema de ecuaciones y conocer las áreas ocupadas por cada cubierta (incógnitas del sistema), es necesario, en términos generales, que el número de bandas (n) sea mayor o igual que el número de cubiertas (m). Por lo que el modelo lineal de mezclas espectrales puede beneficiarse de los sensores multispectrales de nueva generación (con gran número de bandas, como las 36 del EOS-MODIS) o los hiperspectrales que serán lanzados en un futuro próximo como los sensores Hyperion y Atmospheric Corrector (ambos a bordo del satélite estadounidense EO-1) capaces de almacenar la radiancia emitida por un cuerpo en varios cientos de bandas simultáneamente.

Habitualmente, el sistema de ecuaciones visto anteriormente suele resolverse por el método de los mínimos cuadrados. Dicho de otro modo, la resolución de este sistema implica calcular la inversa de la matriz \mathbf{R} con todo lo que ello conlleva.

Mather (1999) advierte sobre los posibles errores en el cálculo de la inversa de la matriz \mathbf{R} , cuyo éxito va a estar condicionado por el grado de interdependencia de las columnas de la matriz \mathbf{R} . Conviene tener en cuenta que cada columna de \mathbf{R} representa la

radiancia de un tipo de cubierta en las distintas longitudes de onda o bandas en la que opera el sensor. Si R es una matriz ortogonal, todas las columnas son independientes, la inversión no plantea ningún problema y el sistema de ecuaciones se puede resolver. En cambio, cuanto mayor sea el grado de correlación entre columnas (es decir, entre cubiertas), mayores errores aparecerán en el cálculo del vector 'a'. En el caso extremo de existir columnas que pueden expresarse como combinación de otras, no existirá inversa de la matriz R , y por tanto el sistema no tendrá solución.

Los modelos de mezclas espectrales, como el visto anteriormente, no siempre proporcionan resultados fiables ya que no siempre la realidad se ajusta a las hipótesis y condicionantes sobre los que se desarrolla este método. Algunos de los inconvenientes y limitaciones del método se citan a continuación:

- Ocurre que no siempre se conoce *a priori* el número de clases o cubiertas presentes en la escena, de forma que pueden existir componentes o coberturas presentes pero no tenidas en cuenta en el modelo (Mather, 1999). De forma que, será necesario acudir a fuentes adicionales de información.
- Este tipo de modelos asumen que la energía procedente de cada pixel es proporcional al área ocupada por cada cubierta, cosa que de acuerdo con Chuvieco (1996) solo es cierta en la región óptica del espectro electromagnético.
- Generalmente, para poder introducir un grado más de libertad en el sistema, se asume que la suma de los porcentajes de las distintas áreas suma un 100%, hipótesis que no se cumplirá en caso de haber dejado un tipo de cubierta fuera de la leyenda de clasificación.
- En el caso de utilizar pixeles puros como fuente de información que caracterice las distintas categorías podrá ocurrir que dichos pixeles no sean suficientemente puros o homogéneos o suficientemente representativos de la zona de estudio (Mather, 1999). Es posible, por ejemplo, que la zona de estudio esté compuesta por una mezcla continuamente cambiante de los tipos de cubierta considerados como ideales, por lo que resultará particularmente difícil el encontrar pixeles puros, o bien, que la unidad de muestreo sea demasiado grande (Mather, 1999). A este respecto, Chuvieco (1996) recomienda introducir las radiancias de la matriz R a partir de medidas de campo o laboratorio, de forma que pueda controlarse mejor la pureza espectral de cada cubierta. El inconveniente a esta última alternativa, señalado por diversos autores, es que es necesario equiparar estas medidas a las de los valores de radiancia de las imágenes.
- Finalmente es necesario mencionar que la hipótesis del fotón que únicamente ha colisionado con un objeto sobre la superficie terrestre no siempre será asumible.

Siempre que se construye un modelo es necesario realizar ciertos controles de calidad y comprobar si el modelo se ajusta o no a la realidad. Mather (1999) propone comprobar la bondad del método utilizando un par de métodos: (i) el tamaño de los residuos y (ii) el número de pixeles para los que se producen porcentaje de área fuera del rango (0-100%). El residuo, en cada banda, representa la diferencia entre el valor

real para el conjunto del pixel y el calculado a partir del modelo lineal de mezclas de radiancias.

A parte del modelo lineal de mezclas espectrales existen otros modelos como el modelo de regresión basado en funciones de pertenencia borrosa desarrollado por Foody y Cox (1994). Dicho modelo se basa en el algoritmo de clasificación de las c-medias borrosas desarrollado por Bezdek *et al.* (1984, citado en Foody y Cox, 1994). Foody y Cox (1994) encontraron una fuerte correlación entre las funciones de pertenencia borrosa y las áreas ocupadas por las distintas categorías dentro de un pixel. Dicha correlación ocurrió para distintos tipos de imágenes y distintas zonas de estudio.

Clasificadores difusos

Los clasificadores difusos o blandos constituyen la segunda de las alternativas propuestas a los métodos de clasificación tradicionales.

Las técnicas de clasificación difusa abordan el problema de la asignación considerando la pertenencia borrosa a una clase, es decir, considerando que existen grados de pertenencia a una clase (Mather, 1999). Estos grados de pertenencia serán tanto más altos cuanto mayor sea la semejanza espectral con la clase. En general, el grado de pertenencia tomará valores comprendidos entre 0 (no pertenece) y 1 (pertenece) de forma continua o, más frecuentemente, de forma discreta con un mínimo de dos valores: 0 y 1 (Foody y Cox, 1994). Mather (1999) menciona la similitud entre los grados de pertenencia de los clasificadores blandos y las probabilidades usadas en la clasificación por máxima probabilidad.

Los clasificadores difusos producen una medida de la pertenencia borrosa de cada pixel a cada categoría de la leyenda, generalmente a través de una familia de imágenes, una para cada una de las categorías de la leyenda (figura 3). En cada imagen está representado el grado de pertenencia de cada pixel a la categoría que representa dicha imagen (Fisher y Pathirana, 1990). El mapa o clasificación final se obtendría a partir de esta familia de imágenes. Para Mather (1999) este hecho constituye un problema ya que al no proporcionarse un mapa final sino una medida del grado en que un pixel pertenece a una categoría, corresponde al experto tomar una decisión sobre la asignación final, introduciéndose de este modo otro grado de subjetividad. Para otros autores (Eastman, 1997) esta circunstancia representa, en cambio, una ventaja. Eastman (1997) entiende que los clasificadores blandos proporcionan una herramienta que ayuda en la toma de decisiones sobre la asignación de un pixel a una categoría.

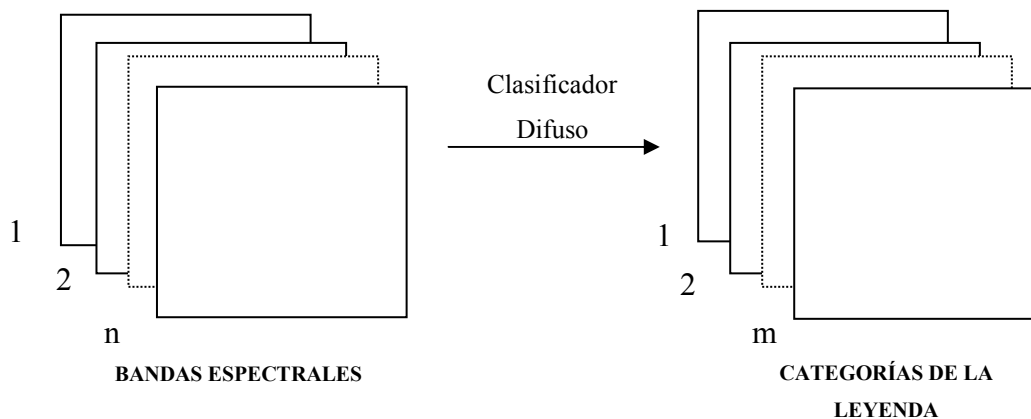


Fig. 3.- Clasificación difusa
(Fuente: Fisher y Pathirama, 1990)

En la figura 4 aparece, para la misma zona de estudio mencionada anteriormente, uno de los mapas de probabilidad de pertenencia o pertenencia borrosa. En concreto, se representa la probabilidad de pertenencia a la categoría de los enebrales. La imagen aparece representada utilizando una escala de grises ligeramente retocada para no resultar demasiado oscura. Los valores más claros representan mayores probabilidades de pertenencia.

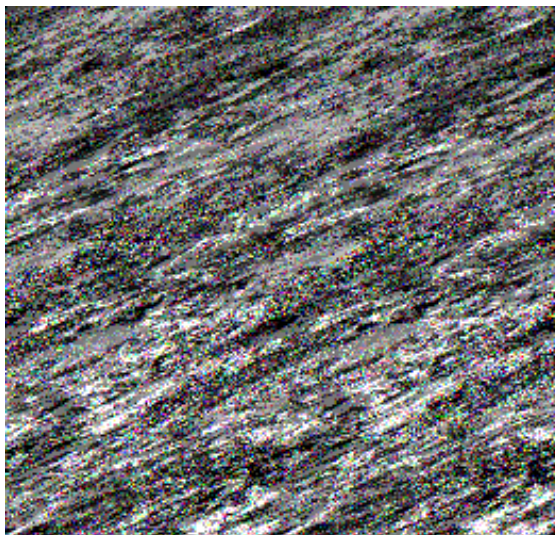


FIG. 4. PROBABILIDAD DE PERTENENCIA A LA CLASE 'ENEBRALES'

Los métodos más habituales de clasificación borrosa son los derivados de los clasificadores por máxima probabilidad y los bayesianos descritos anteriormente y los derivados del algoritmo de los grupos borrosos, algoritmo en directa conexión con el de las c-medias borrosas.

Los métodos derivados de los clasificadores por máxima probabilidad se basan en la distribución normal de los datos espectrales para calcular el grado de pertenencia a una determinada categoría (Chuvieco, 1996). Dicho grado de pertenencia se calcula a partir del vector media y de la matriz de varianza-covarianza, ambos definidos no estrictamente sino en un espacio difuso (Chuvieco, 1996). Es decir, de cada valor espectral suministrado al sistema mediante las áreas de entrenamiento, se calcula su grado de pertenencia a cada categoría de la leyenda. Cada valor espectral es entonces multiplicado por el correspondiente grado de pertenencia de forma previa al cálculo del vector media y de la matriz de varianza-covarianza de cada categoría, quedando vector media y matriz de varianza-covarianza 'difusamente' definidos (Mather, 1996).

El algoritmo de los grupos borrosos, por su parte, crea una partición borrosa de los datos espectrales en las categorías de la leyenda mediante la minimización de la distancia entre el pixel y el centroide de la clase. Para calcular dicha distancia se utilizan las funciones de pertenencia borrosa (de un pixel con respecto a cada categoría de la leyenda) para un cierto grado de 'borrosidad global' definido por el experto (Foody y Cox, 1994; Foody, 1992).

Bibliografía

- AHEARN, S.C., WEE, C. 1991. Data Space Volumes and Classification Optimization of SPOT and Landsat Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(1): 61-65.
- BOLSTAD, P.V., LILLESAND, T.M. 1991. Rapid Maximum likelihood Classification. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 57(1): 67-74.
- CHUVIECO, E. 1996. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Rialp, Madrid. [3].
- CIHLAR, J., XIAO, Q., CHEN, J., BEAUBIEN, J., FUNG, K., LATIFOVIC, R. 1998. Classification by progressive generalization: a new automated methodology for remote sensing multichannel data. *International Journal of Remote Sensing*, 19(14): 2685-2704.
- CORTIJO, F.J., PÉREZ DE LA BLANCA, N. 1998. Improving classical contextual classifications. *International Journal of Remote Sensing*, 19(8): 1591-1613.
- CORTIJO, F.J., PÉREZ DE LA BLANCA, N. 1999. The performance of regularized discriminant analysis versus non-parametric classifiers applied to high-dimensional image classification. *International Journal of Remote Sensing*, 20(17): 3345-3365.
- CURRAN, P.J., ATKINSON, P.M. 1998. Geostatistics and remote sensing. *Progress in Physical Geography*, 22, 61-78.
- EASTMAN, J.R. 1997. *Idrisi for Windows, User's Guide*. Clark University, USA.
- FISHER, P.F., PATHIRANA, S. 1990. The Evaluation of Fuzzy Membership of Land Cover Classes in the Suburban Zone. *Remote Sensing of Environment*, 34: 121-132.
- FLYGARE, A.M. 1997. A comparison of contextual classification methods using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing*, 18(18): 3835-3842.
- FOODY, G.M. 1992. A Fuzzy Sets Approach to the Representation of Vegetation Continua from Remotely Sensed Data: an Example from Lowland Heath. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 58(2): 221-225.
- FOODY, G.M., COX, D.P. 1994. Sub-pixel land cover composition estimation using a linear mixture model and fuzzy membership functions. *International Journal of Remote Sensing*, 15(3): 619-631.

- LILLESAND, T.M., KIEFER, R.W. 1994. *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York. [1].
- MATHER, P.M. 1985. A computationally-efficient maximum-likelihood classifier employing prior probabilities for remotely-sensed data. *International Journal of Remote Sensing*, 6(2): 369-376.
- MATHER, P.M. 1999. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. John Wiley & Sons, England. [2].
- SMITS, P.C., DELLEPIANE, S.G., SCHOWENGERDT, R.A. 1999. Quality assessment of image classification algorithms for land-cover mapping: a review and a proposal for a cost-based approach. *International Journal of Remote Sensing*, 20(8): 1461-1486.
- STRAHLER, A.H. 1980. The use of prior probabilities in maximum likelihood classification of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 10, 135-163.
- WOODCOCK, C.E., STRAHLER, A.H. 1987. The factor of scale in remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 21, 311-322.