



## Herramientas para la Modernización de Catastro y Registro

### Módulo 5: Aspecto Tecnológico I

#### 1. Introducción

Siendo el catastro fundamentalmente un inventario de la propiedad inmobiliaria, es muy importante considerar que debido al enorme volumen de datos (gráficos y alfanuméricos) a considerar, se hace necesaria la utilización de la mejor tecnología posible para el tratamiento de los mismos. Esta tecnología no solo se aplica en el almacenamiento y posterior gestión de los datos, sino desde el mismo momento de su adquisición.

Veíamos en el tema sobre el aspecto físico del catastro la importancia que tiene no solo el levantamiento topográfico de la parcela (predio), sino que también se consideraban las condiciones en las que ese levantamiento y el acta de deslinde apropiada debían ser tenidas en cuenta.

Con la tecnología actual, estas operaciones de levantamiento se pueden agilizar y en algunos casos mejorar, abaratando los costos de producción. Describiremos a continuación algunas de las tecnologías utilizadas actualmente encaminadas a la producción de cartografía catastral, teniendo en cuenta que estos sistemas en ningún caso suplirán los procedimientos reglados que hubiere en cada lugar para obtener la validez jurídica del levantamiento catastral si estuviera reglamentada. Toda esta tecnología es un apoyo para los mismos.

De la misma forma, una vez obtenidos los datos del terreno que permitirán construir el plano parcelario y los datos de las propiedades, se hace necesaria una gestión eficaz de esta información, pues este es, al fin y al cabo, el objetivo perseguido. Para ello, los



Sistemas Gestores de Bases de Datos Relacionales (RDBMS), junto con los Sistemas de Información Geográfica (SIG), son las herramientas consideradas como imprescindibles para un buen tratamiento y gestión de la información catastral.

## 2. Instrumentos topográficos

### Introducción.

La finalidad de todo trabajo topográfico es la observación en campo de una serie de puntos que permitan posteriormente la obtención de unos datos para:

- Hacer una representación gráfica de una zona (Plano).
- Conocer su geometría.
- Conocer su altimetría.
- Calcular una superficie, una longitud, un desnivel, etc.

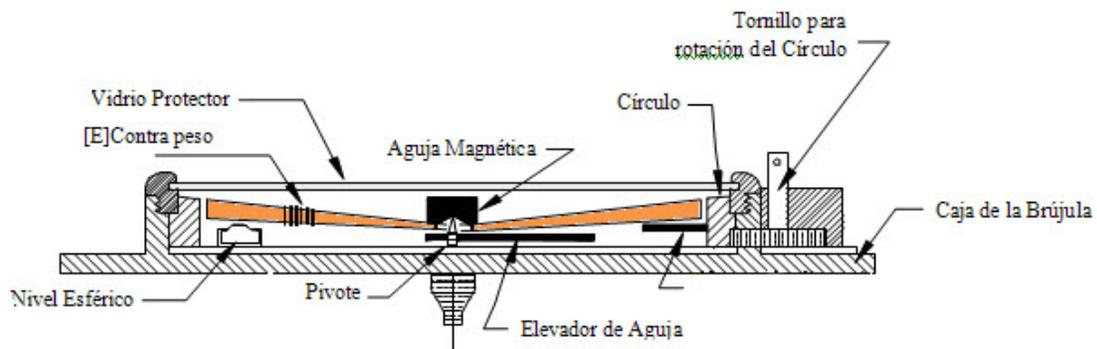
Cuando únicamente se desea conocer la planimetría, el levantamiento se llama planimétrico. Cuando sólo interesa la altimetría, se llama altimétrico. Y cuando se toman datos de la geometría y de la altitud, el levantamiento se llama topográfico, taquimétrico o completo.

Todas las operaciones llevadas a cabo en el proceso del levantamiento topográfico se realizan con una serie de instrumentos especializados e idóneos para estas funciones, a saber: medición de ángulos, de distancias y de desniveles; estos tres tipos de mediciones (que podemos dejar reducidos a dos, ya que los desniveles no dejan de ser distancias en el plano vertical), se realizan en primera instancia con dos tipos de instrumentos: Teodolitos y Brújulas Topográficas e instrumentos de medida de distancias (no hay nombre genérico para ellos dada su enorme variedad, aunque la tecnología electrónica ha dado en llamarlos Distanciómetros o EDM –*Electro Distance Measure*-).

## Instrumentos topográficos.

### Brújula Topográfica.

La brújula topográfica surgió como evolución natural de la brújula convencional. Si a una brújula con un limbo graduado con gran precisión se le acopla una plataforma niveladora con un anteojo reticulado para hacer punterías de precisión y medir distancias con la mira, obtenemos una brújula topográfica.



La figura muestra el corte esquemático de una brújula. La brújula consiste en una aguja magnética que gira sobre un pivote agudo de acero duro, apoyado sobre un soporte cónico ubicado en el centro de la aguja.

La aguja magnética está ubicada dentro de una caja, la cual, para medir el rumbo, contiene un círculo graduado dividido en grados sexagesimales de 0 a 360°, con subdivisiones de medio grado.

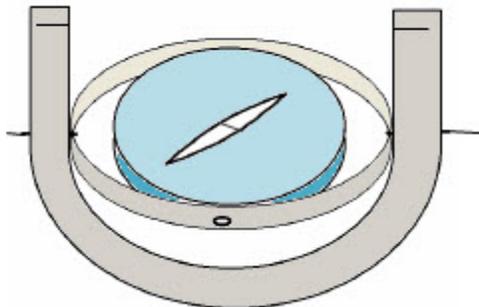


A fin de contrarrestar los efectos de la inclinación magnética, la aguja posee un pequeño contrapeso de bronce y su ubicación depende de la latitud del lugar. En zonas localizadas al norte del ecuador, el contrapeso estará ubicado en el lado sur de la aguja, y en zonas localizadas al sur del ecuador el contrapeso estará ubicado en el lado norte de la aguja.

Para proteger el pivote sobre el cual gira la aguja, las brújulas poseen un dispositivo elevador que separa la aguja del pivote cuando no están siendo utilizadas. En el interior se ubica un pequeño nivel esférico de burbuja. Un vidrio en la parte superior de la caja sirve para proteger la aguja, el círculo y el nivel esférico.

En labores angostas se emplea la brújula colgada o brújula de minero. Esta brújula se cuelga de un punto intermedio de una cuerda tendida entre los dos puntos extremos de la alineación a medir. Va montada sobre una suspensión cardán, de manera que puede nivelarse a pesar de la inclinación de la cuerda de la que cuelga.

Para evitar que la brújula se deslice sobre la cuerda, si ésta está muy inclinada, se utilizan pinzas o se hacen nudos.



Las brújulas colgadas suelen ir divididas en medios grados. Para mejorar la apreciación se toma la media aritmética de las lecturas tomadas con las dos puntas de la aguja, previa corrección de la de espaldas. Suelen ser de limbo móvil y graduación inversa.

La brújula colgada sólo debe emplearse cuando no sea posible utilizar un instrumento más preciso. No mide ángulos verticales por lo que debe usarse acompañada de un eclímetro.

Como sabemos, la ventaja fundamental de la brújula es que se orienta al norte magnético una vez liberada la aguja. Como inconvenientes podemos mencionar:

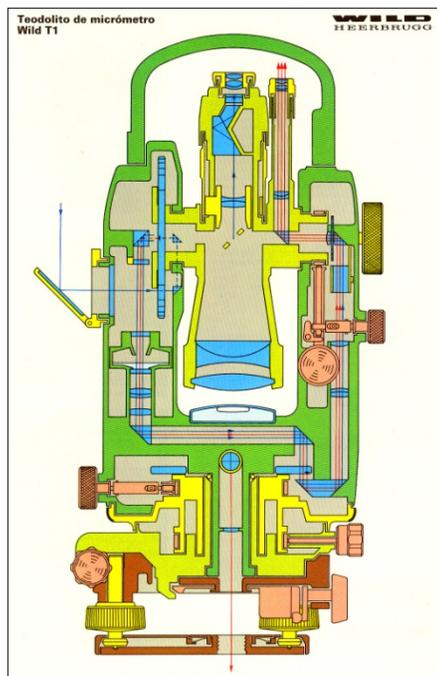
- Menor precisión.
- La declinación magnética varía continuamente.
- Pueden existir anomalías en el campo magnético provocadas por minerales metálicos, maquinaria, vías, líneas eléctricas, etc.

### Teodolitos óptico-mecánicos.

El teodolito es un instrumento óptico-mecánico cuya misión principal es la de medir ángulos con gran precisión, desde 1 minuto centesimal ( $1^c$ ) como el Wild T1 de la década de los 50 del siglo pasado, hasta centésimas de segundo centesimal, ( $0.01^{cc}$ ), como el Wild T4 de la misma época.



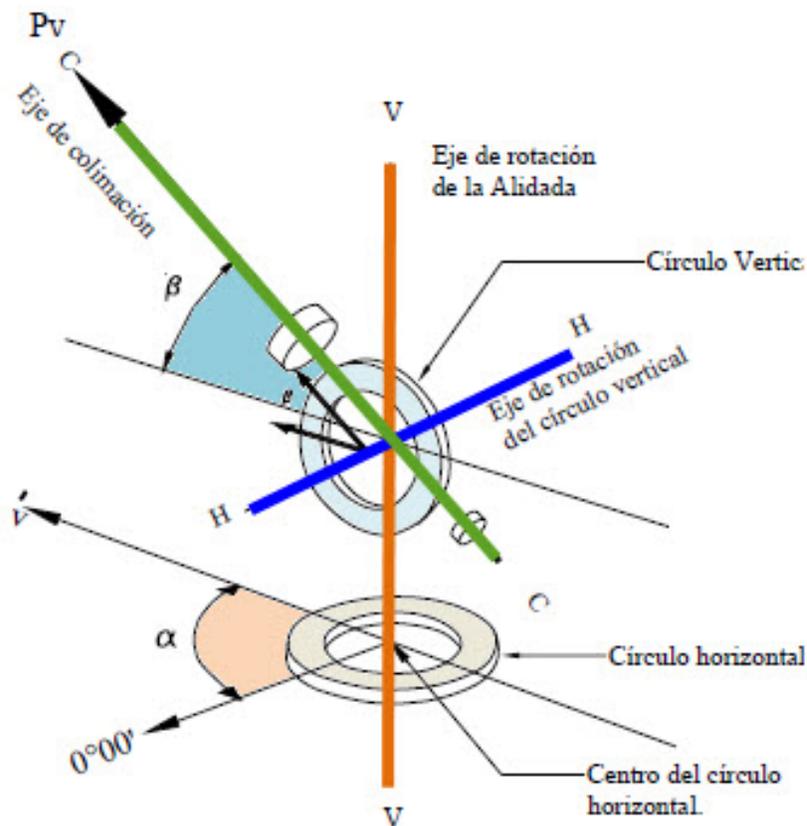
Teodolito de 1910	Wild T1 (1950)	Kern K1A (1950)	Zeiss T0 (1950)	Teodolito para minas



El conjunto es una máquina de muy alta precisión mecánica y con una compleja y exquisita óptica. No en vano, los grandes fabricantes mundiales de instrumentos

topográficos han sido (y son) los mejores fabricantes de instrumentos ópticos de todo tipo, como Kern, Zeiss y Wild (Leica).

La geometría en la que se basa un teodolito es extremadamente sencilla: tres ejes perpendiculares entre sí y que se cortan en un punto. Alrededor de dos de ellos (uno en el plano vertical y otro en el plano horizontal) gira todo el bloque en dos movimientos, uno horizontal y otro vertical. Estos dos movimientos nos permiten definir, sobre sus respectivos planos, los ángulos de giro representados en dos círculos graduados, uno en cada plano.



Esquema geométrico de un Teodolito.



**Ejes:**

- Eje principal del aparato. Eje Vertical.
- Eje Secundario. Eje Horizontal. Eje de Muñones
- Eje de colimación del anteojo. Eje óptico.

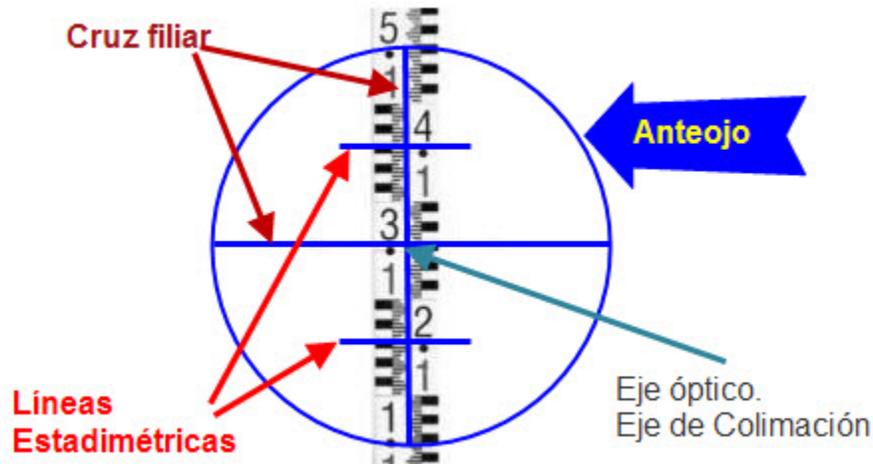
Alrededor del **eje principal** (VV) se producen movimientos de giro en el plano horizontal, lo que permite medir ángulos horizontales.

Alrededor del **eje secundario** (HH) (eje de muñones) se producen movimientos de giro en el plano vertical, lo que permite medir ángulos verticales.

Alrededor del **eje de colimación** (CC) no se produce ningún movimiento de giro. Este eje es el soporte del elemento de puntería (anteojo) que permite apuntar a los objetos con gran precisión y calidad de visión.

El anteojo de los teodolitos dispone de un retículo denominado “**cruz filiar**”, formado, en su versión más simplificada, por dos líneas perpendiculares que se cortan en el centro del mismo. Estas líneas materializan los ejes vertical y horizontal del instrumento. El punto de corte de las mismas materializa el eje óptico del anteojo.

A su vez, algunos teodolitos también disponen de dos líneas horizontales más, equidistantes del centro, llamadas “**líneas estadimétricas**”, que permiten medir “*distancias*” por mediación de una mira.



NOTA: Los teodolitos que disponen de estas líneas estadimétricas pasan a denominarse **Taquímetros** puesto que ya es posible medir distancias con ellos.

### Teodolitos electrónicos.

Con el desarrollo de la electrónica, a mediados de los años 80 aparecieron los primeros teodolitos electrónicos, ofreciendo como principales virtudes la medición electrónica de los ángulos y el almacenamiento automático de los datos, evitando así la complicada tarea mecánica en la fabricación y en la grabación sobre círculos de cristal de cuarzo de las divisiones angulares de los limbos horizontal y vertical, y la lectura de ángulos mediante micrómetros ópticos.

En los teodolitos electrónicos los limbos utilizados suelen ser los llamados limbos incrementales. Estos llevan divisiones sin números, y van alternando divisiones transparentes y opacas que detectan la luz de un emisor cuya señal es recogida por un sensor.



Por otra parte, al hacer las mediciones angulares mediante sistemas digitales, estos nuevos teodolitos disponen de sistemas de almacenamiento de datos, de tal forma que se elimina la transcripción al papel de los datos observados, agilizando el trabajo de campo y mejorando la fiabilidad de los datos al quedar eliminada la posibilidad de errores en la escritura manual de los mismos.

Todas las propiedades geométricas de los teodolitos electrónicos, así como los mecanismos de giro, permanecen iguales que en los teodolitos mecánicos.



Un Teodolito–EDM integrado se llama **Estación Total**, o estación integrada, ya que permite obtener singularmente todas las mediciones del levantamiento topográfico como los ángulos, distancias, coordenadas, etc. Los datos pueden ser registrados en un dispositivo de memoria, denominado habitualmente “libreta electrónica”, con lo que se evitan los posibles errores de transcripción y se aceleran las operaciones de medición.

A su vez, las Estaciones Totales disponen de una gran variedad de programas internos para facilitar y automatizar el trabajo, tales como programas de replanteo, de mediciones excéntricas, de cálculos de coordenadas, etc.



El principio de inspiración de estos sistemas es automatizar las operaciones repetitivas de levantamiento topográfico como las lecturas angulares y de distancia, el registro de datos, el ingreso de detalles de estaciones, etc.

			
Leica TC-407	Topcon GPT-7500	Pentax	Geodimeter- 600M

### Niveles.

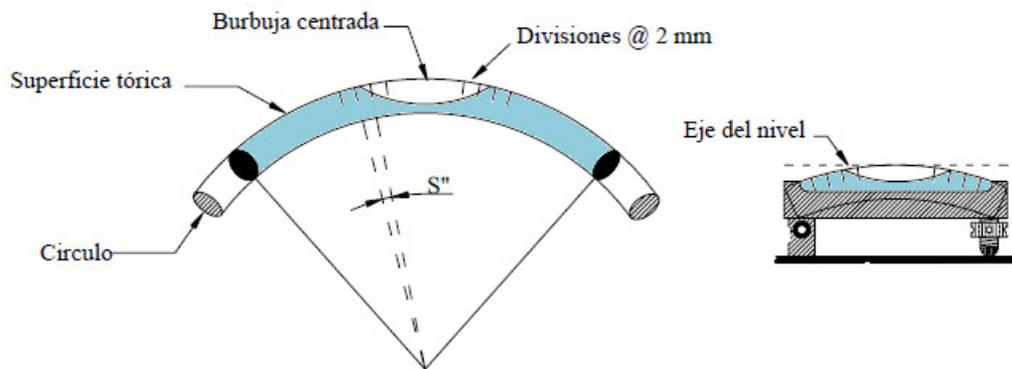


El Nivel Topográfico es un instrumento óptico-mecánico cuya misión principal es la de materializar un plano perfectamente horizontal.

Puesto que el plano horizontal obtenido con un instrumento de este tipo es un plano de gran precisión métrica, el Nivel Topográfico es idóneo para medir desniveles.

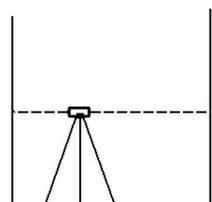
La geometría del Nivel topográfico es muy básica. Consta de un elemento que permita definir un plano horizontal, y alrededor de él se monta un anteojo perfectamente alineado.

Para definir un plano horizontal con gran precisión se utiliza un nivel tubular o nivel tórico, que no es más que un tubo de vidrio de sección circular, generado, al hacerlo rotar, un círculo alrededor de un centro. La superficie se sella en sus extremos y su interior se llena parcialmente con un líquido muy volátil (éter sulfúrico, alcohol etc.) que, al mezclarse con el aire del espacio restante, forma una burbuja de vapores cuyo centro coincidirá siempre con la parte más alta del nivel, lo que ocurre cuando este está perfectamente horizontal.



Se define la sensibilidad de un nivel (S) como el ángulo de giro correspondiente al desplazamiento de la burbuja en una división, dado en segundos.

A mayor radio de curvatura del nivel, mayor es la sensibilidad.



El uso del nivel siempre (o casi siempre) requiere de algún elemento auxiliar sobre el cual materializar el plano horizontal; el más utilizado es la mira vertical graduada sobre la que se determina la altura de ese plano horizontal al suelo.



			
Nivel Fortech	Nivel Pentax	Nivel Wild NK1	Nivel Topcon

### 3. Fotogrametría Digital

La fotogrametría digital es una técnica que se utiliza para extraer información geométrica, de radiometría y semántica de objetos del mundo tridimensional, a partir de imágenes digitales bidimensionales de esos objetos.

La fotogrametría digital busca la automatización de los procesos fotogramétricos y las orientaciones como primera operación dentro de la fotogrametría, y por la obligatoriedad de realizarlas, siempre es uno de los procesos que más se beneficiaría de esta automatización.

Sin embargo, dentro de los sistemas fotogramétricos se incluyen equipos que no contemplan ningún proceso automático. Su desarrollo se realiza igual que en fotogrametría analítica, pero cambiando el restituidor por el ordenador. Desde este punto de vista, las orientaciones en estos sistemas son completamente manuales. Existen ayudas en la posición dentro de las imágenes, pero no automatismo.

Los otros sistemas cuentan con la correlación como procedimiento de cálculo. Pero hay que distinguir claramente dos posibilidades dentro de estos sistemas, mirando solo los

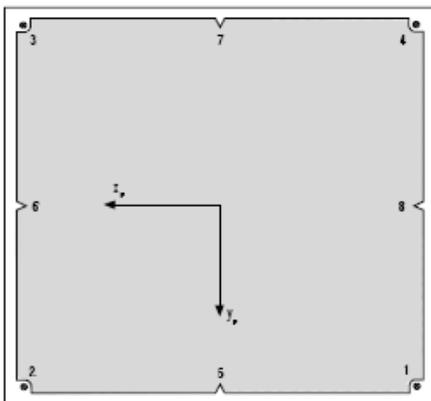


procesos de orientación. Cuando la correlación es un apoyo, o cuando la correlación supone la automatización del proceso.

La diferencia es muy importante; la segunda posibilidad consigue que, por decirlo fácilmente, la orientación se realice sola, mientras que la primera posibilidad hace que sea el operador el que realice las orientaciones, y que solamente en la materialización del punto sobre el terreno se considere la correlación; la eliminación de la paralaje en cada punto es automática. Podemos hablar de procesos semiautomáticos.

Dentro de los casos de procesos automáticos, veremos que no se puede hablar de automatización completa ya que la orientación absoluta no es totalmente automática. Sin embargo, la orientación interna es completamente automática hasta el punto que existen sistemas de escáner que realizan la orientación interna a la vez que escanean las fotografías, por lo cual el operador se olvida completamente de la orientación interna.

Respecto a la orientación relativa, también se puede hablar de ella como un proceso automático que exige un tiempo de cálculo dependiendo de la resolución de las fotografías y de la capacidad de proceso del ordenador, que puede llegar a ser importante y que en ordenadores bastante potentes queda reducido a 1 ó 2 minutos por par



estereoscópico. Un aspecto importante y causante de este tiempo es el elevado número de puntos conjugados que es necesario utilizar para llegar a orientar el modelo, como se verá en el proceso explicado más adelante.



### Orientación automática

A continuación se estudiarán cada una de las fases del proceso de orientación (interna y externa), desde el punto de vista de la automatización de cada una de ellas.

### Orientación Interna

En una fotografía métrica aérea existen ocho posibilidades dentro de las zonas donde se encuentran las marcas fiduciales. Las cámaras convencionales tienen cuatro marcas fiduciales diametralmente dispuestas, aunque existen cámaras que disponen de las ocho marcas. Nuestro planteamiento se basa en la localización de estas marcas, en su medición y en el conocimiento de la focal de la cámara.

Por la disposición de las marcas fiduciales también existirá una rotación de  $90^\circ$  si existe una mala posición de la fotografía en el momento del escaneo, teniendo en cuenta que dentro de la misma pasada, las fotografías están dispuestas en la misma dirección. Por lo tanto, existe la posibilidad de necesitar una rotación previa a la orientación interna para corregir este error.

Como las marcas fiduciales son objetos bidimensionales con una geometría y radiometría particular, que no difieren en rotación más de  $10^\circ$ , la correlación es la opción más válida para la medición de las marcas. Si tenemos en cuenta la homogeneidad tanto en la forma como en la radiometría de estas marcas, la correlación presenta en esta detección una aceptación máxima en la medición. Si a este aspecto añadimos técnicas de segmentación por binarización, se consigue una correlación muy eficiente.





El proceso de cálculo tiene las siguientes etapas:

- **Reconocimiento del patrón**, mediante la identificación del tipo de marca fiducial que contenga la fotografía.
- **Tratamiento de imágenes piramidales**. El uso de imágenes piramidales ayudará a una rápida localización de la zona en que se encuentra la marca fiducial.
- **Localización robusta marcas**. Esta etapa incluye el reconocimiento de positivo/negativo de la fotografía digital mediante el cálculo de la media de los niveles de grises de la imagen. El proceso de localización comprende:
  - **Definición del espacio de búsqueda**, utilizando las imágenes piramidales para una localización más rápida de las marcas fiduciales.
  - **Binarización**. Este paso comprende la segmentación de la imagen de búsqueda.
  - **Correlación binaria**. La correlación es en niveles de grises; las imágenes difieren en geometría por una traslación  $T(u, v)$  y en radiometría por una transformación lineal en brillo y contraste. Además de funcionar sólo con imágenes binarias, también habrá que tener en cuenta la única posibilidad de medir blanco o negro. Usando una correlación binaria para localizar una marca fiducial, el patrón se traslada por  $T(u, v)$ .
- **Test de consistencia**. El resultado de las localizaciones individuales en cada nivel piramidal es chequeado usando un criterio para detectar afloramientos. Se hará una búsqueda de la mejor solución, que se define por una transformación tomando los **errores remanentes más pequeños**.
- **Auto-diagnóstico**. Es necesario para un sistema automático poderse auto diagnosticar. Será necesario realizar este tipo de operaciones para detectar errores ocultos o sistemáticos. Analizando la precisión y sensibilidad de las mediciones se podrán realizar métodos de auto-diagnóstico.



- **Estimación de los parámetros de transformación 2-D afín.** Una vez realizadas las mediciones de las marcas fiduciales, se realizarán los cálculos de la transformación y después se obtendrán los parámetros que permiten pasar al sistema de coordenadas imagen.
- **Auto-diagnóstico.** Otro auto-diagnóstico permitirá realizar comprobaciones finales de precisión y sensibilidad de los resultados.

### Orientación relativa

Para la realización de esta fase de orientación es necesario disponer de los siguientes datos:

- Los parámetros de orientación interna de la cámara.
- Las relaciones entre los sistemas de coordenadas de imagen y píxel.
- El orden de las imágenes.

Las operaciones se inician en el nivel piramidal mayor y con el tamaño de imagen y resolución más baja. El proceso se subdivide en dos partes: la primera corre desde el nivel piramidal mayor hasta el llamado intermedio; la segunda, llamada rastreador de puntos, corre a través de los niveles remanentes. Al criterio para definir el nivel intermedio se llega por la óptima combinación del uso de la cantidad posible de información y del tipo de cálculo.

Durante el enfrentamiento de puntos, se determinan puntos conjugados. Para cada nivel, las características del punto son extraídas y separadas en cada imagen usando un operador de interés. Ellos son entonces enfrentados de acuerdo con un criterio de geometría y radiometría, resultando una lista de candidatos a puntos conjugados.



Esas parejas de puntos se introducen en un robusto procedimiento de ajuste de rayos con el que se determinan tanto los parámetros de orientación relativa como las coordenadas tridimensionales de los puntos conjugados del modelo. El enfrentamiento de puntos para en un nivel intermedio, y allí es donde se calculan los parámetros de la orientación relativa y de las coordenadas tridimensionales de los puntos.

El segundo paso o rastreador de puntos es una medición fina de las coordenadas de la imagen, de los puntos conjugados en el nivel intermedio por mínimos cuadrados a través de los niveles piramidales. Con una ventana de búsqueda se calculan los seis parámetros afines y dos radiométricos entre las dos ventanas, y por métodos iterativos. Para cada punto enfrentado, el coeficiente de correlación cruzada se calcula entre dos ventanas. Si el coeficiente es mayor que el permitido, el enfrentamiento se declara correcto. El operador de interés se usa otra vez en la ventana de referencia para encontrar un punto para transferir el siguiente nivel piramidal más bajo. Este punto es entonces transformado a la ventana de búsqueda para encontrar los parámetros y definir el punto. Esos dos puntos son marcados en el siguiente nivel y se repite el cálculo de mínimos cuadrados. Al final del enfrentamiento de puntos, los puntos conjugados, correctamente enfrentados a las imágenes originales, entran en un ajuste robusto para el cálculo final de los parámetros de la orientación relativa y sus coordenadas.

El enfrentamiento de puntos tiene la ventaja de la velocidad y de no tener pérdida de precisión. Asegura que los puntos conjugados son hechos en zonas bien definidas y en los que se pueden esperar buenas características.

### **Orientación absoluta.**

En el caso de un apoyo pre-señalizado, sí es posible realizar la orientación absoluta automáticamente. El caso queda inscrito en la búsqueda de un patrón en otra imagen. En casos de urbana sería más fácil, y existe algún trabajo al efecto, definir un patrón y



ayudarse del conocimiento de su posición para lograr una orientación absoluta automática.

El desarrollo del GPS y su aplicación, junto con el INS (Sistema Inercial de Navegación), en la determinación de las coordenadas de los centros de perspectiva, ha llevado a mejorar y reducir la necesidad del control de campo, pero no a eliminarlo.

Sin embargo, sí se han desarrollado sistemas con una orientación absoluta semiautomática consistente en definir el punto de apoyo sobre una imagen y dejar que sea el ordenador el encargado de localizar el mismo punto en el resto de las imágenes, con el consiguiente ahorro de tiempo.

Se dice que la orientación es semiautomática cuando la orientación interna y relativa son automáticas y la absoluta es semiautomática o manual. También, y como es lógico, existen multitud de particularidades ya que hay sistemas con procesos semiautomáticos en todas las orientaciones.

Por último, existe la posibilidad de confirmar la correlación en cada punto encontrado. Hasta aquí se ha visto la orientación relativa, y a continuación se verá la absoluta, es decir, la orientación clásica en dos pasos. En caso de realizarse la orientación externa simultáneamente por medio de la condición de co-linealidad, orientación en un paso, ocurren los mismos problemas que en la orientación absoluta al identificar los puntos de apoyo y al utilizar los mismos puntos para corregir paralaje, escala y giros. Si no se llega a realizar automáticamente la identificación de los puntos no hemos orientado ninguna de las dos, mientras que de la forma tradicional estarían realizadas la orientación interna y la relativa, a falta de la absoluta.



### Comparación de los dos procesos, convencional analítico y digital

Los métodos fotogramétricos pueden ser clasificados en función de la forma de su resolución. Así, se puede distinguir entre Fotogrametría Analógica, resolución mediante analogías mecánicas, y Fotogrametría Electrónica, en la que los sistemas óptico-mecánicos se sustituyen por un sistema informático encargado de la realización de los cálculos. Con la Fotogrametría Electrónica mediante la sustitución realizada se consigue una importante mejora en cuanto a la precisión de los resultados y flexibilidad del equipo, pudiendo utilizar fotografías de muy distinto origen (desde fotogramas de rango cercano a fotogramas aéreos) y diferentes características de toma (inclinación, base, focal, etc.).

Dentro de los métodos fotogramétricos electrónicos se pueden distinguir la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital.

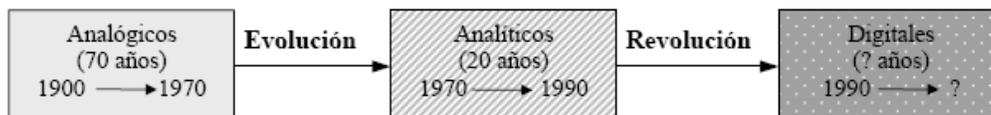
- **La Fotogrametría Analítica** aborda la resolución informatizada de los cálculos fotogramétricos, utilizando como información de entrada las medidas realizadas sobre la fotografía (en formato analógico). La utilización del apoyo informático permite la rápida obtención de las relaciones existentes entre los puntos del objeto y sus correspondientes imágenes, así como los errores del sistema (Gosh, 1988).
- **La Fotogrametría Digital** se caracteriza por utilizar información (imágenes) en formato digital. Este aspecto va a determinar muchas de las ventajas e inconvenientes que tienen estas técnicas, definidos por los importantes cambios conceptuales y metodológicos que serán analizados en los capítulos sucesivos. Así, Ackermann (1991) indica que "con las cámaras digitales y el procesamiento de imágenes digitales, la Fotogrametría trabajará en un entorno completamente diferente, caracterizado por diferentes equipos, técnicas, oportunidades y por una forma distinta de pensar".



Así, una de las polémicas más vigentes en los últimos años dentro del mundo de la Fotogrametría es si la Fotogrametría Digital se puede plantear en la actualidad como una digna sucesora en cuanto a rendimiento y precisión de la Fotogrametría Analítica, o si aún le faltan muchos años para alcanzar los niveles de los métodos analíticos.

Al respecto es importante tener en cuenta que el cambio de la fotogrametría clásica analógica a la fotogrametría analítica no supuso ningún tipo de modificación en cuanto a principios ni resultados, consistiendo en una lógica evolución de los aspectos relacionados con la precisión y la productividad de los métodos fotogramétricos. Se trata por tanto de una evolución metodológica.

La transición entre la Fotogrametría Analítica y la Fotogrametría Digital se presenta como la aplicación de unos procedimientos clásicos a una plataforma nueva. Así, todos los procesos fotogramétricos convencionales continúan aplicándose y se producen básicamente los mismos productos: coordenadas de los objetos, mapas e imágenes orto-rectificadas. No obstante, esta situación aparente oculta una perspectiva de modificación de toda la estructura como apuntó Ackermann, por lo que podríamos hablar de revolución tecnológica.



La evaluación del estado actual y del desarrollo de la Fotogrametría Digital debe tener en cuenta diversos aspectos y consideraciones de diferentes naturaleza (Ackermann, 1996):

1. Como mínimo, la Fotogrametría Digital debe proporcionar al menos el nivel de rendimiento de la Fotogrametría Analógica y Analítica. Las estaciones de trabajo digitales deben tener al menos las prestaciones de los restituidores analíticos de imágenes digitales. Alcanzar estos mínimos no supone ninguna ventaja por parte de la



Fotogrametría Digital con respecto a los anteriores métodos, debido a la inercia de los sistemas productivos, salvo que sean considerablemente más rápidos y más baratos.

2. La ventaja esencial de las nuevas tecnologías radica en la posibilidad de alcanzar mayor rendimiento y productos que con las técnicas existentes. En la Fotogrametría Digital, esta se centraría en la automatización de los procesos fotogramétricos. Los primeros ejemplos de tareas susceptibles de ser automatizados son la aerotriangulación digital, la generación de modelos digitales de terreno mediante la aplicación de técnicas de correlación de imágenes, y la generación de ortofotografías, sin olvidar diversas medidas y funciones de orientación. Esta automatización será la que supondrá el auge o no de la Fotogrametría Digital con respecto a la Fotogrametría Analítica. La calidad y economía de los productos obtenidos será decisiva para marcar la aceptación de las nuevas técnicas por parte de los usuarios.
3. La cartografía digital y la extracción de objetos a partir de las imágenes digitales necesitará de la intervención humana durante algún tiempo. Por ello, en una primera aproximación no parece presentar ninguna ventaja particular con respecto a las técnicas analíticas; sin embargo, es necesario tener en cuenta que aunque los procesos no sean completamente automáticos, sí lo son muchas de las tareas que, junto con las herramientas de procesamiento de la imagen y edición, son una gran ayuda y contribuyen a acelerar el proceso.
4. Otra ventaja importante en favor de los sistemas digitales es su concepción como sistemas totales, lo que permite el tratamiento de imágenes de muy diversa procedencia en un sólo equipo, desde imágenes de rango cercano (cámaras digitales) hasta imágenes aisladas en plataformas espaciales (imágenes satelitales).



5. Como se indicó en el punto 2, la aceptación de la Fotogrametría Digital pasa por el rendimiento técnico y cualitativo de los productos que de ella se deriven. No obstante, existe un factor que es de gran importancia, siendo un valor añadido: los sistemas digitales pueden integrar, fusionar y comparar conjuntos de datos de diferentes procedencias, dando lugar a un abanico muy amplio de operaciones dentro y fuera del contexto cartográfico. Así, el sistema fotogramétrico se puede considerar como un elemento básico en los sistemas de información geográfica tridimensional.

### Sistema fotogramétrico digital

La Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) define un Sistema Fotogramétrico Digital como ***“el conjunto de hardware y software cuyo objetivo es la generación de productos fotogramétricos a partir de imágenes digitales mediante técnicas manuales y automatizadas”***. Estos productos pueden ser utilizados directamente o bien ser la fuente de información de entrada para un Sistema de Información Geográfica (SIG) o un Sistema de Diseño Asistido por Computador (CAD). Un sistema fotogramétrico digital incluye todos los elementos necesarios, tanto a nivel de software como de hardware, para obtener los productos fotogramétricos a partir de las imágenes digitales, incluyendo también sistemas de captura de imágenes (interfaces de conexión con cámaras digitales o sistemas de digitalización de imágenes en formato analógico [escáner]). El elemento fundamental del sistema fotogramétrico digital es la estación fotogramétrica digital *-Digital Photogrammetric Workstation-* (conocida también como restituidor digital o estación fotogramétrica digital, si bien este nombre no es adecuado puesto que sólo hace referencia a una de las tareas de la estación, el proceso de restitución).



### Características de las estaciones de trabajo

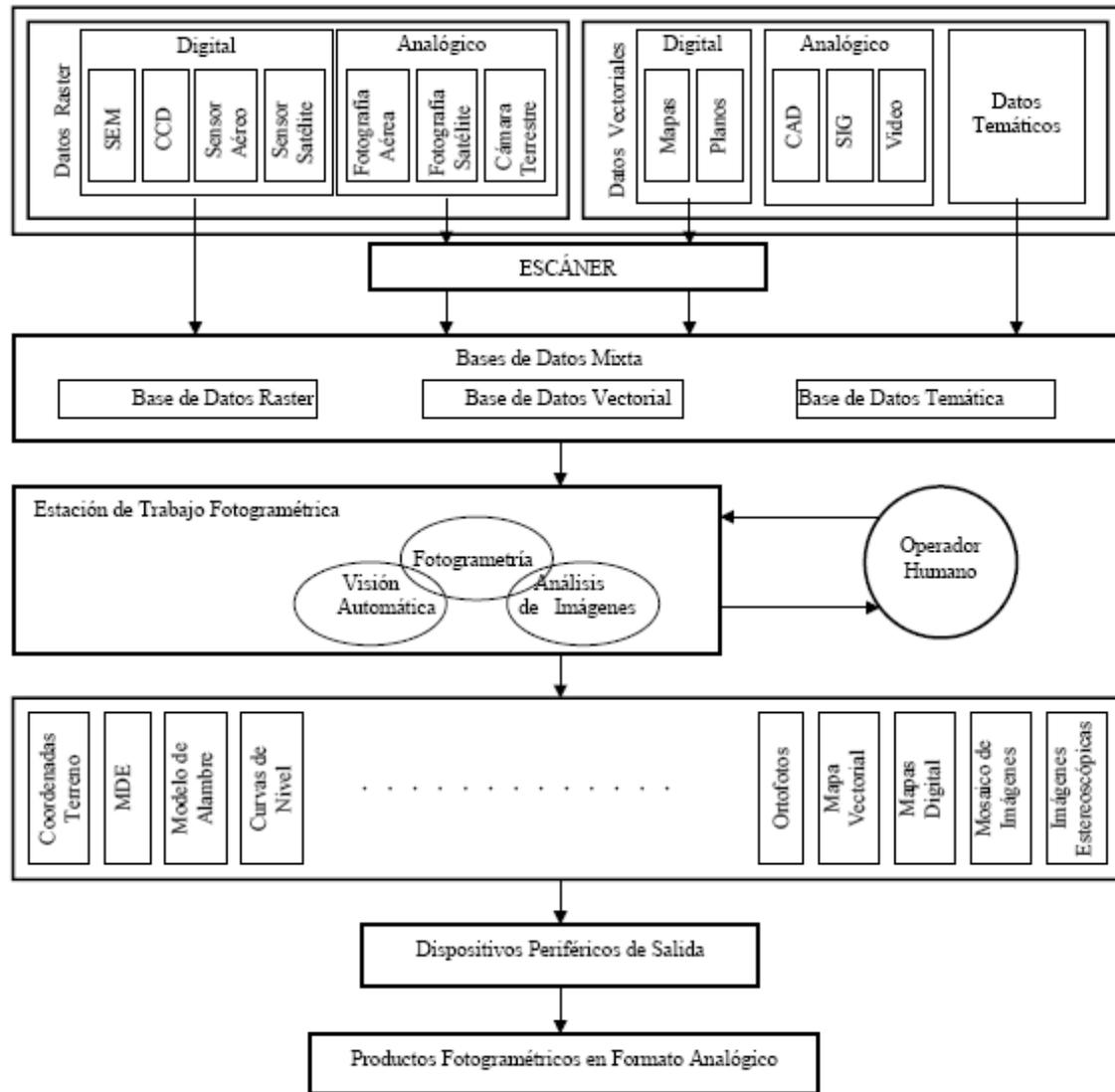
- La entrada de datos es siempre en forma digital, de manera que la información es estable y siempre se puede editar.
- El entorno de trabajo es automático e interactivo.
- La base matemática es la misma que en los restituidores analíticos, pero con la ventaja de que no existen problemas de desgaste, calibración, ajuste, etc., al carecer de elementos ópticos o mecánicos, siendo siempre constante el proceso de medida en cuanto a precisión y fiabilidad.
- La universalidad es total, pudiéndose utilizar todo tipo de escalas de imagen con independencia de fotos terrestres o aéreas.
- El empleo es más cómodo para el operador (mayor ergonomía) y al tener un elevado grado de automatización es más fácil su manejo, requiriéndose menor experiencia.
- Permiten, desde el mismo entorno de trabajo, la realización de distintas tareas fotogramétricas y cartográficas, lo que aumenta la producción y eficacia en los flujos de trabajo, que a veces sobrepasan los estrictamente fotogramétricos.
- Admite la posibilidad de que varios usuarios puedan acceder simultáneamente a la estereoscópica, pudiendo contrastar criterios.
- El principio de superposición, más efectivo que en los restituidores analíticos, los hace muy interesantes en los trabajos de actualización y control de calidad.

### Componentes de un Sistema Fotogramétrico Digital

El objetivo fundamental de un sistema fotogramétrico, cualquiera que sea la metodología empleada para su construcción, es la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes de los mismos. En el caso concreto de los Sistemas Fotogramétricos Digitales, a partir de imágenes en formato digital.



El primer aspecto a tener en cuenta es la gran variedad de datos de entrada, desde imágenes obtenidas con microscopios electrónicos de barrido (SEM -*Scanning Electron Microscope*-), hasta imágenes obtenidas mediante sensores remotos instalados en satélites, pasando por fotografías de rango cercano y fotografías aéreas convencionales. Además, es absolutamente necesario disponer de un sistema de importación de ficheros en formato vectorial, el cual se utiliza en los procesos de actualización y verificación de la información extraída, mediante superposición de los elementos gráficos. Por último, el sistema debe contar con periféricos adecuados para la impresión de los resultados en formato analógico, en función de las necesidades de los usuarios.





### Sistema físico (Hardware)

Teniendo en cuenta dichas necesidades, un sistema fotogramétrico digital debe cumplir los siguientes requerimientos en cuanto al **sistema físico**:

- Un sistema de digitalización de imágenes analógicas (escáner)
- Una CPU rápida dotada de memoria suficiente, y cuyo procesador en tiempo real ha de ejecutar dos tareas: el procesamiento de la imagen (zoom, movimientos de la imagen en pantalla, etc.) y la correlación automática de las imágenes que formen el modelo estereoscópico.
- Posibilidad de entrada directa de datos en formato digital (por ejemplo, desde una cámara digital) para la realización de aplicaciones fotogramétricas en tiempo real.
- Un sistema de control para la captura de datos, orientaciones y medida tridimensional de imágenes digitales de diferentes fuentes y geometría.

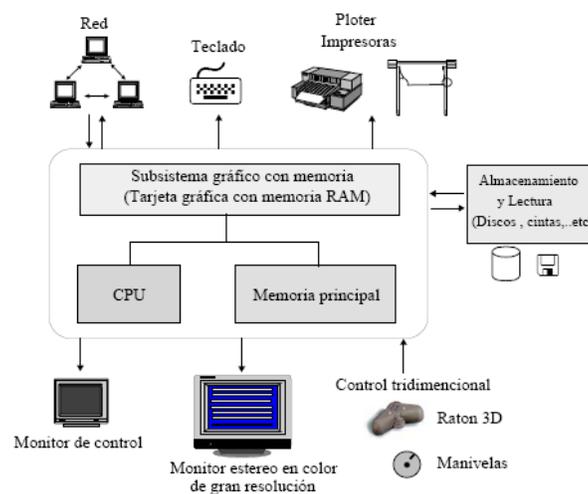
### Un subsistema gráfico que incluya:

- Memoria de imagen en color verdadero (24 bits) que permita la visualización de las imágenes estereoscópicas en color real.
- Una unidad rápida de procesamiento para cálculos (deslizamiento continuo a nivel de sub-píxel, zooms continuos) que permita la manipulación y procesamiento de imágenes de gran tamaño en un tiempo razonable.
- Un monitor estereoscópico en color de gran resolución.
- Obtención de ortofotografías digitales en un tiempo de proceso aceptable.
- Canalizaciones (buses) rápidas para asegurar buenas prestaciones en las transmisiones de datos.

**Sistemas para el almacenamiento** de información, acceso a red, teclados y otros periféricos.

**Interfaz con Sistemas de Información Geográfica** con superposición monoscópica y estereoscópica de elementos gráficos y con funciones de edición para la modificación de dichos elementos.

**Impresoras de imágenes y trazadores gráficos** para la impresión analógica de los resultados.



La tendencia actual de diseño de los sistemas fotogramétricos digitales es la utilización de una concepción modular que ofrezca grandes posibilidades para la expansión del sistema, tanto a nivel de software como de hardware. Además, cada vez es más frecuente la utilización de hardware estándar dentro de las posibilidades, debido a las características particulares de este tipo de sistemas, para lograr compatibilidad con otros sistemas, facilitar las tareas de mantenimiento y reducir los costos de los equipos.

Las peculiaridades más importantes de un restituidor fotogramétrico se encuentran en la interfaz con el usuario: necesidad de visión estereoscópica, obtención de coordenadas en tiempo real, precisión del sub-píxel.

### Sistema de visión estereoscópica

El sistema de visión estereoscópica es indispensable para la mayoría de los trabajos fotogramétricos. Requiere la separación de las dos imágenes del par estereoscópico, y dicha separación se puede realizar de varias formas:

- Separación temporal: se basa en la presentación alternativa de ambas imágenes.
- Separación radiométrica: utiliza la polarización (pasiva o activa), o el sistema de anaglifos.
- Separación espacial: consiste en partir la pantalla y utilizar un estereoscopio.

En algunos casos se utilizan varios métodos combinados, siendo los más frecuentes hoy en día la combinación de la separación temporal con la polarización pasiva o activa.



**Polarización con gafas pasivas (*passive flickler*).** En este tipo de polarización las imágenes se muestran de una forma alternativa en la pantalla. Consiste en superponer al monitor un modulador de cristal líquido que actúa como filtro de células polarizadoras, de manera que cada 1/120 de segundo cambia la polarización, proporcionando diferente polarización para la imagen izquierda que para la derecha. Unas gafas especiales (pasivas) decodifican las imágenes y proporcionan la vista relativa al ojo correspondiente. De esta manera el operador ve alternativamente la imagen izquierda y derecha.

La polarización es circular y el refresco de la pantalla es de 60 Hz. La modulación del cristal líquido se sincroniza con el procesador gráfico, de manera que cambia la polarización con la misma frecuencia y al mismo tiempo que las imágenes son representadas en la pantalla. Las gafas están polarizadas en sentido vertical y horizontal.





**Polarización con gafas activas (*active flickler*).** En este caso, las imágenes se editan en la pantalla de una manera alternativa y secuencialmente con una frecuencia de 120 Hz. Las gafas (activas) en este caso usan unos cristales con un obturador (*LCS - Liquid Crystal Shutter*) que separan las imágenes ofreciendo alternativamente al operador la imagen izquierda y la derecha (incluyendo la marca flotante), a tal velocidad que se produce la fusión de imágenes y por tanto el efecto estereoscópico. La pantalla y el obturador están separados mediante un emisor de rayos infrarrojos que se suele colocar encima del monitor. Este sistema es comercializado por la StereoCorporation bajo el nombre de CrystalEyes.

Los dos métodos anteriores tienen las siguientes ventajas:

- Permiten la visión de imágenes en color.
- Permiten el principio de superposición.
- Permiten que varios operadores puedan ver el modelo simultáneamente.
- Permiten a los operadores libertad en los movimientos de la cabeza.

En cuanto al principal inconveniente, hay una reducción del brillo en comparación con un monitor normal debido a la doble frecuencia y a la absorción de la luz por la polarización de la pantalla (caso de gafas pasivas) o por el obturador en el caso de las gafas activas.

<i>Gafas pasivas</i>	
<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>☛ Bajo peso de las gafas (como cualquier gafa de corrección óptica)</li> <li>☛ Bajo precio unitario de las gafas.</li> <li>☛ Libertad de movimientos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☛ Precio del sistema completo.</li> <li>☛ Pérdida de luminosidad.</li> <li>☛ Ghosting (separación incompleta entre imagen izquierda y derecha).</li> </ul>
<i>Gafas activas</i>	
<i>Ventajas</i>	<i>Inconvenientes</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>☛ Precio del sistema completo.</li> <li>☛ Mejor luminosidad.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>☛ Elevado precio de las gafas.</li> <li>☛ Sensibilidad a condiciones de iluminación (parpadeo producido por tubos fluorescentes).</li> <li>☛ Aparatosidad de las gafas.</li> <li>☛ Visión del monitor no estéreo con parpadeo..</li> </ul>

**Método espacial (división de la pantalla - *split*).** El método consiste en montar un estereoscopio de espejo frente a la pantalla y editar cada imagen (izquierda y derecha) en media pantalla. Las dos imágenes que integran el modelo se visualizan de una forma simultánea en el monitor (o monitores).



Figura 5. Sistemas de visualización por división en pantalla (*DIP de Leica*).

Tiene el inconveniente de que al partir el monitor se reduce el área observable del modelo, pero en cambio tiene la ventaja de que se crea un entorno de trabajo muy similar al de los restituidores analíticos. Pueden utilizarse monitores y adaptadores gráficos más simples. Una solución a este método es la utilización de dos monitores, uno para cada imagen, incrementando de esta manera el área observable.



Es posible editar imágenes en color y aplicar la superposición, pero el modelo estereoscópico solamente puede ser observado por un operador y no por varios simultáneamente.

**Anaglifo.** Es una técnica de costo muy reducido, pero que no se emplea debido a la gran fatiga del observador y a las dificultades para lograr el posado en el modelo.

**Por último, una de las características más importantes de un Sistema Fotogramétrico Digital es la posibilidad de trabajar con precisión de sub-píxel.** Esta precisión puede ser lograda durante el proceso de medida interactiva. Si las imágenes son fijas, la función de zoom aumenta el tamaño de los píxeles que componen la imagen, pero no el del cursor. El cursor entonces se desplazará de un píxel de la pantalla al otro, lo que supone un desplazamiento en la imagen a escala inferior al píxel. Si el cursor está fijo, las imágenes ampliadas se desplazarán con un intervalo de píxel de pantalla.

### Modo de trabajo

En las Estaciones de trabajo consiste en ejecutar una serie de operaciones de una manera más o menos sistemática. Las funciones más usuales son las siguientes:

1. Creación de los ficheros necesarios para el funcionamiento de las aplicaciones (para la adquisición y carga de las imágenes, puntos de apoyo, cámara, modelos, bloque, etc.).
2. Para la observación correcta del modelo estereoscópico y la realización de los cálculos necesarios para las distintas aplicaciones, es necesario hacer:
  - Orientación Interna (automática) por correlación de las marcas fiduciales.
  - Orientación Relativa (automática) por correlación de puntos homólogos.
  - Aero-triangulación del bloque.
  - Orientación Absoluta.



Al final de este paso todos los modelos del bloque han sido calculados y almacenados en el disco.

3. Para la captura de datos el operador elegirá el modelo a restituir y el sistema presentará en pantalla de forma automática dicho modelo y cargará los ficheros relacionados con él.

Se pueden generar ahora, a partir de las imágenes tridimensionales, los ficheros de puntos o en conexión con un GIS, hacer una captura de datos vectorial en su base de datos gráfica. En paralelo, se pueden superponer los datos vectoriales a la imagen tridimensional de la pantalla para controlar mejor la restitución.

4. La captura de datos altimétricos se hace a partir de un modelo digital de terreno generado automáticamente por correlación; este servirá para generar las curvas de nivel (también de forma automática) del modelo. El operador puede controlar su precisión de distintas maneras:
  - Situando el índice sobre el MDT superpuesto al modelo estereoscópico y comprobando que el valor de Z es el correcto. Para cada valor de X e Y, el valor de Z se lee del fichero del MDT.
  - Generando las curvas de nivel; al superponerlas al modelo estereoscópico se podrá comparar el cálculo con la realidad del terreno representada en el modelo estereoscópico.
  - Calculando las ortoimágenes izquierda y derecha, presentándolas en la pantalla en estereoscopia y verificando que no exista relieve (como comprobación).

**Para la ejecución de estas operaciones, el software ha de ser capaz de:**

- Manipular las imágenes (funciones de estereoscopia y estereocomparador).
- Mantener el ciclo en tiempo real. Función que conecta el movimiento del ratón 3D (modelo) con los dos cursores o índices del monitor estereoscópico



$X_m, Y_m, Z_m \Rightarrow x' y', x'' y''$

- Procesar coordenadas. Rutinas fotogramétricas de orientaciones (interna, relativa, absoluta, generación de valores aproximados, ajuste bloques).
- Usar módulos de gráficos en la captura de datos para la digitalización de puntos, líneas, símbolos y superposición estereoscópica de vectores.
- Intercomunicarse con sistemas de información geográficos o de tipo CAD.
- Crear Modelos Digitales de Terreno (MDT): captura, comprobación de errores, cuadrículas, curvado, visualización y edición.
- Manejar módulos de automatización para correlación de imágenes, seguimiento automático de líneas y texturas, y clasificación de imágenes.
- Rectificar imágenes: creación de puntos nodales a partir de MDT.
- Re-muestrear la imagen: creación de una ortoimagen a partir de las imágenes de entrada (sin refinar) y los puntos nodales.
- Efectuar las operaciones necesarias para mejorar la calidad de las imágenes y realizar determinados análisis.

**Factores que han producido un rápido desarrollo en la Fotogrametría Digital**

Entre las razones que acreditan el gran interés por esta tecnología, pueden citarse, entre otras:

- La disponibilidad de imágenes digitales y el continuo progreso de la informática en el tratamiento de imágenes.
- Las posibilidades que tiene la fotogrametría digital para la automatización de buena parte de la cadena del proceso de datos.
- El abaratamiento de costos debido a la utilización de equipos más económicos y personal menos calificado ha jugado un papel importante en su desarrollo.



- El desarrollo de sistemas de visión artificial para generar descripciones de objetos a partir de imágenes "visuales" (sobre todo en el ámbito de la fotogrametría de objeto cercano).
- El progreso en el desarrollo de los escáneres y en la rapidez y capacidad de procesamiento de los ordenadores.
- La utilización de imágenes digitales procedentes de satélites en aplicaciones topográficas.
- La creación de modelos digitales del terreno (MDT) y a partir de ellos la formación de ortofotografías y la extracción de información altimétrica del terreno (curvas de nivel).

### El proceso de adquisición digital de imágenes

La característica fundamental de la fotogrametría digital es la utilización de imágenes en formato digital. Para la adquisición de imágenes digitales fotogramétricas se emplean dos procedimientos básicos:

- **Utilización de sensores digitales**, o bien sensores analógicos dotados de un convertidor analógico-digital.
- **Digitalización de imágenes** analógicas adquiridas con cámaras fotográficas convencionales.

La captura de imágenes mediante técnicas fotográficas es un proceso que en los últimos años ha alcanzado unos niveles de calidad muy elevados, tanto en rendimiento como en producción. Así, en el período de 1960 a 1994 se redujo la distorsión radial de las cámaras en más de tres veces, pasando de valores en torno a 10 micras a cifras inferiores a 3 micras, mientras que la resolución espacial ponderada en función del área (AWAR) casi se ha duplicado, pasando de 63 a valores superiores a 94 lp/mm.



En la actualidad, las cámaras métricas analógicas utilizadas suelen tener una distancia focal de 152 mm y un formato de 230 x 230 mm, registrándose la imagen de forma instantánea en la película fotográfica. La película fotográfica puede ser considerada como una matriz prácticamente infinita de elementos sensibles a la luz, motivo por el cual se puede considerar que son los elementos de captación de imágenes remotas con mayor resolución. Sin embargo, la resolución efectiva de una cámara está en función de la calidad del lente, la definición de la película, los desplazamientos en la imagen debido al desplazamiento del avión, el desplazamiento angular, y la calidad de la película empleada para la copia, junto con otros factores independientes del diseño de la cámara, como por ejemplo el estado de la atmósfera en el momento de la toma y el nivel de contraste del terreno a fotografiar, que reducen la calidad del fotograma real a una cifra en torno a 40 lp/mm.

Este nivel de resolución práctica de 40 lp/mm implica unas necesidades de almacenamiento en vuelo difícilmente alcanzables con la tecnología actual. Así, una imagen de 23 x 23 cm tendría un tamaño de 23.000 x 23.000 píxeles, lo que resultaría un tamaño de fichero de la imagen digital de 500 Mb (en 256 tonos de gris) o 1.500 Mb (en color real, 16,7 millones de colores). Este volumen de datos debe ser capturado, transferido y almacenado en el escaso tiempo disponible entre tomas, que suele ser inferior a 10 segundos.

Todo lo anterior ha determinado que, en la actualidad, el procedimiento básico para la obtención de imágenes fotogramétricas en formato digital sea la captura mediante una cámara métrica analógica convencional y la posterior digitalización mediante un escáner fotogramétrico, con el objeto de garantizar la calidad geométrica de las imágenes. Así, la utilización de imágenes obtenidas en formato digital se ha limitado a las imágenes de



satélite que incorporan posibilidades estereoscópicas (SPOT), o algunos trabajos experimentales realizados en fotogrametría aérea (King et al., 1994; Maas y Kersten, 1997).

No obstante, la tendencia actual viene marcada por la aparición de nuevos sensores y sistemas que permiten la captura de imágenes de alta resolución espacial (hasta 1 m de tamaño de píxel sobre el terreno como, por ejemplo, el IKONOS de SpacelImaging) y espectral (multi-espectrales e híper-espectrales), que han vuelto a revitalizar la posibilidad de la captura directa de las imágenes en formato digital.

Por otro lado, la aparición de los sistemas fotogramétricos digitales ha permitido la "democratización" de la fotogrametría, acercándola a usuarios que hasta hace poco estaban alejados de ella, bien por motivos económicos (el costo de los sistemas fotogramétricos para la generación de MDE y ortofotografía se ha reducido de 50.000 Euros en 1990 a 5.000 Euros en la actualidad, con importantes mejoras de rendimiento), por motivo de los bajos rendimientos de los sistemas anteriores, o por el complicado manejo de éstos.

Esta apertura a otros sectores origina demandas de productos no convencionales que, a menudo, se basan en la utilización de imágenes de tipo multi-espectral, que sólo pueden ser suministradas con facilidad por sensores de tipo digital.

A finales de la década de los ochenta, Hartl (1989) planteó que las cámaras digitales sustituirán progresivamente la adquisición de la imagen por métodos fotográficos convencionales, aunque indicaba que este cambio sería complejo. La situación actual viene marcada por un gran esfuerzo de investigación por parte de las dos marcas líderes en el mercado (LH Systems y ZI

Imaging) que están inmersas en el desarrollo de sensores digitales para su aplicación en trabajos de tipo fotogramétrico.

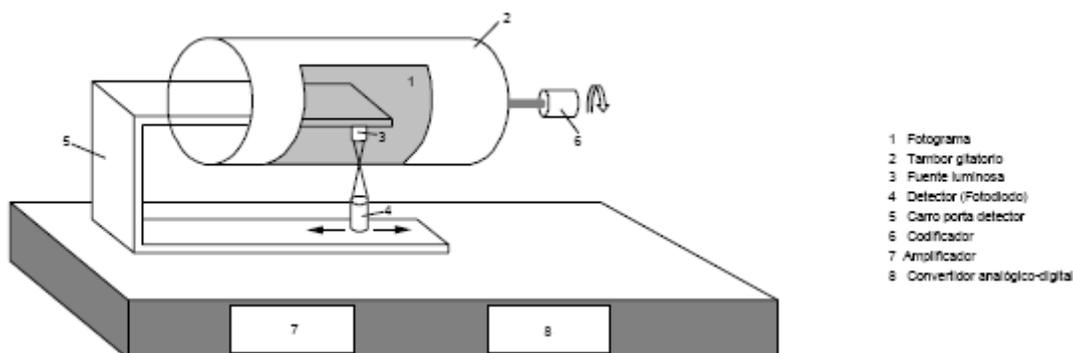


### Escáner

El sistema más empleado para la captación de imágenes digitales en fotogrametría digital es la digitalización de las imágenes obtenidas mediante una cámara analógica convencional ya que se requiere que el intervalo de digitalización (tamaño del píxel) sea igual a la resolución de la fotografía, con el objeto de evitar pérdidas de información y para conservar la precisión.

La configuración de un escáner depende del tipo de foto-detector utilizado. Los tipos de foto- detectores empleados son **foto-multiplicador** y **CCD** (*Charge Couple Devices*). Los primeros solo pueden utilizarse como elemento simple (lineal) mientras que los CCD se agrupan formando matrices lineales o rectangulares.

**Los escáneres de tambor (*drum scanners*)** (Fig. 1), basados en el principio de los foto-multiplicadores, son utilizados en artes gráficas. La película se monta sobre el tambor giratorio, el foto-multiplicador está montado fuera del tambor y la imagen es barrida punto a punto siguiendo una línea. Cuando se utilizan diapositivas, la imagen es barrida desde el interior del tambor con una iluminación directa de un gran margen de rango dinámico, tipo láser. (D). Estos escáneres ofrecen un nivel extraordinariamente alto de trabajo en cuanto a la resolución y al rango dinámico de densidad. En cambio, presentan la desventaja de montar la película sobre el tambor, lo cual no garantiza la estabilidad geométrica; por ello, la mayoría de los escáneres utilizados son planos.



- 1 Fotograma
- 2 Tambor giratorio
- 3 Fuente luminosa
- 4 Detector (Fotodiodo)
- 5 Carro porta detector
- 6 Codificador
- 7 Amplificador
- 8 Convertidor analógico-digital

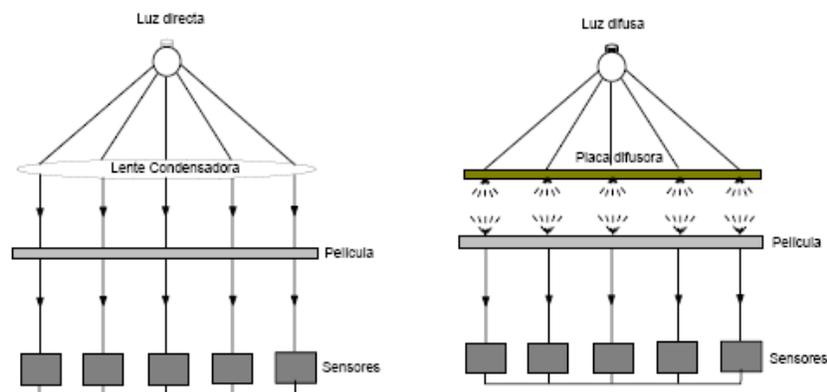
En los escáneres planos (*flat bed scanners*) la película se coloca entre dos cristales asegurando el mantenimiento de la planicidad de la misma y una mejor protección. La película se coloca en una plataforma móvil movida por motores, desplazándose con respecto al sensor y a la iluminación, o bien sobre una plataforma fija, desplazándose en este caso el sistema de iluminación y captación. Los sensores utilizados en este tipo de escáneres planos son CCD, los cuales pueden ser lineales o matriciales.

**El Sistema de Iluminación** es un elemento de gran importancia, pudiéndose distinguir dos sistemas: luz directa o difusa.

- **En la luz directa** (Fig. 2) se utiliza un condensador para ampliar la fuente de luz más o menos, antes de que incida en la lente de proyección. Una ventaja de este tipo de iluminación es que es bastante económica; no obstante, una limitación a tener en cuenta en el uso tan económico de la fuente de luz es que produce una difusión de calor bastante importante, pudiéndose producir deformaciones en el original. Para reducir este efecto se utilizan frecuentemente fibras ópticas para transmitir la luz desde una lámpara lejana. La fuente de luz directa genera un haz de luz con una apertura muy pequeña; de esta manera se obtiene una gran profundidad de

campo, lo cual hace que este sistema sea poco sensible a los problemas de desenfoque.

- **La luz difusa** (Fig. 2) se obtiene utilizando placas de vidrio difusoras, utilizando una luz fluorescente que tiene un efecto difusor, o bien utilizando un canal de luz y una esfera de vidrio vacía y recubierta en su exterior por dióxido de magnesio.



### Tipos de escáner

Los escáneres disponibles actualmente en el mercado responden a los siguientes tipos, según las características del trabajo y de la calidad y precisión requeridas:

- **Sensor simple.** Barre una línea recorriéndola mediante un mecanismo de rotación.
- **Sensores de banda** (lineal). Barren la fotografía en bandas paralelas.
- **Sensores de matriz cuadrada.** Digitaliza zonas del fotograma y posteriormente las une numéricamente; para ello tiene un caneavá de cruces de coordenadas conocidas. (Fig. 3).

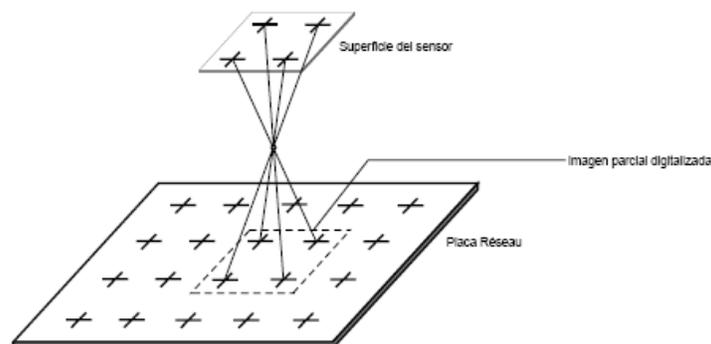


Figura 3. Principio de los sensores de matriz cuadrada.

### Problemática de los escáneres

Los principales problemas para conseguir imágenes con la calidad geométrica y radiométrica que exige el desarrollo de la Fotogrametría digital son:

- **Iluminación:** uniformidad, estabilidad y estricto requerimiento de generar luz blanca. Control M, calentamiento en partes sensibles. Todo el sistema está diseñado para que la iluminación sea la mínima posible, fundamentalmente en transparencias.
- **Resolución radiométrica:** aumento de la escala de grises en la captura y posterior reducción mediante software apropiado a la escala estándar de 256 valores. Esta mejora de la resolución radiométrica se realiza ampliando el número de bits a 10 - 12 (1024-4096) y posteriormente mediante tratamiento, reduciéndose a 8 bits (256). La finalidad de aumentar la resolución radiométrica es ampliar el rango dinámico a intervalos 0,1 - 2,5 D (B y N) y 0,2 - 3,5 D (Color).
- **Velocidad:** la velocidad definida por el usuario según la calidad y requerimientos de la imagen debe presentar alta sensibilidad. El polvo, los defectos de engrase, el mal funcionamiento mecánico,...etc., deben ser controlados mediante pruebas periódicas. Dentro de este apartado tienen gran importancia las vibraciones.
- **Captura para formación de imágenes a color:** La formación del color se consigue definiendo tres niveles mediante el correspondiente filtraje: CYR (*Cyan - Yellow - Red*). Un problema importante, soslayado en muchos escáneres de la última

generación, es la triple pasada, es decir, la repetición del proceso de barrido con distintos filtros. En ese tipo de escáner es imprescindible la eliminación mediante calibraciones periódicas de los errores sistemáticos que se producen en el barrido. Los escáneres modernos realizan una pasada única captando la información y dividiéndola en las tres bandas en la misma pasada.

- **Calibración:** Los procedimientos de calibración tanto para la mejora de la calidad geométrica como radiométrica de la imagen son imprescindibles con el fin de conseguir que estas calibraciones se incorporen a la unidad de barrido.

### Pruebas de calibración

Las pruebas de calibración se realizan mediante placas cuadrículadas (*grid plate*). Generalmente se miden dos placas, según muestra la figura 4. La figura 4-a contiene dos columnas en los bordes de la placa y se aplica a todos los fotogramas; su calibración permite controlar los errores debidos a la variación de frecuencias (posición mecánica). La figura 4-b se utiliza de forma independiente, es decir, sin fotograma incorporado, y se usa para calibrar el sistema y ajustar las imágenes obtenidas con sus resultados. Estas placas, en su versión más difundida, presentan una cuadrícula de 25 x 25 cm, con un espaciamiento de 1 cm, mientras que la precisión exigida a la definición de su malla es del orden de 2-3  $\mu\text{m}$ .

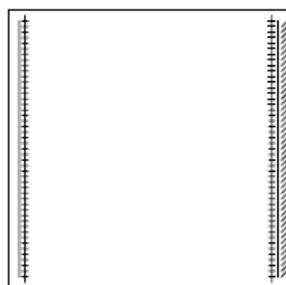


Figura 4-a

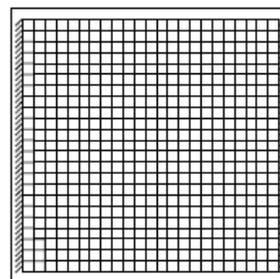


Figura 4-b



### Problemática radiométrica de las imágenes obtenidas con escáner

En la fotogrametría no digital la diferenciación de zonas oscuras, minas, arbolado, etc., e incluso la de zonas de pocos contrastes, es complicada. Estos problemas tienen mayor importancia dentro de la fotogrametría digital porque, aunque la medición radiométrica sea correcta, esta, unida a la geométrica en tareas como la detección de objetos, puede alterar la precisión de las mediciones. Si a esto se añade la automatización, se hacen todavía más complicados algunos procesos de detección automática o medición automática de puntos.

La calidad radiométrica dentro de los procesos fotogramétricos en técnicas digitales tiene una importancia vital, ya que cualquier operación automática necesita de la información que contienen los píxeles. Podemos agrupar dichas técnicas en tres mediante los errores que generan:

- **Técnicas de medición individualizadas:** zonas oscuras e incluso homogéneas dentro de la fotografía llevarán a una mala determinación de puntos en objetos. Por lo tanto, una mayor diversidad radiométrica en la imagen logrará mejores resultados. Algunos procesos influidos de esta forma son: correlación, triangulación aérea, modelos digitales del terreno, etc.
- **Técnicas de medición por grupos:** algunas fases se realizan mediante técnicas de agrupamiento de zonas o píxeles. En casos donde estas zonas no lleguen a contrastes importantes, no será posible realizar mediciones. Ejemplos: procesos de segmentación y técnicas de imágenes piramidales.
- **Procesos con imágenes derivadas:** se pretende poner de manifiesto que fotografías con una amplitud de contrastes escasa o con zonas oscuras homogéneas llevarán, dejando la medición a un lado, a la obtención de imágenes



derivadas con los mismos defectos. En estos casos, las imágenes finales se podrán tratar con el fin de mejorarlas mediante técnicas de tratamiento radiométrico de imágenes. Casos prácticos: problemas de imágenes normalizadas o las ortofotografías.

Estos defectos o errores vienen inducidos por la radiometría en el escáner. La medición radiométrica es un punto clave en el tratamiento de estos errores, y contar con un escáner que posea un rango de densidades alto disminuirá estos errores.

### Características generales de los escáneres

#### Fotogramétricos:

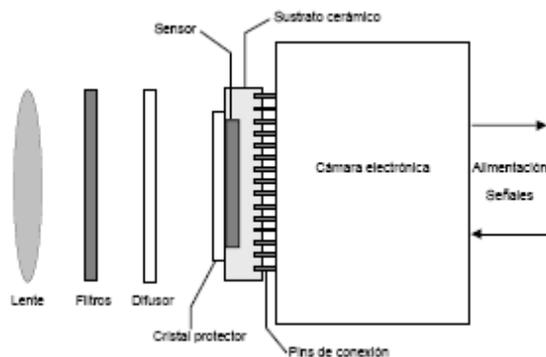
- Tamaño de píxel = 10 micras (mínimo).
- Rango dinámico: 0.1 - 2.5 (B/N) y 0.1 - 3.5 (Color).
- Ruido de imagen: 0.02 - 0.03 D.
- Precisión geométrica: 3 micras mínimo.
- Resolución radiométrica (sensibilidad): 8 bits (B/N) y 24 bits color.
- Superficie mínima de escaneo: 23 x 23 centímetros.
- Correcta calidad en la formación del color.

#### Artes gráficas:

- Tamaño de píxel de hasta 12.5 micras.
- Rango dinámico: 0.1 - 2.5 D (B/N) y 0.2 - 3.5 D (Color).
- Permiten mayor ruido que los fotogramétricos.
- Alta resolución radiométrica.
- Baja precisión geométrica.

### Cámara digital.

La cámara digital difiere de la de fotografía convencional en que ésta sustituye el plano focal de la película por un CCD.



En un futuro inmediato las cámaras aéreas seguirán siendo indispensables en todos aquellos campos en los que se requieran resoluciones de 1 metro o menos. Sin embargo, ya se perfila que el desarrollo de las cámaras digitales es el eslabón que falta en la cadena de producción digital desde la toma de imágenes hasta la elaboración de los productos finales, tales como impresiones o filmaciones.

La ventaja más destacable de este tipo de cámaras es la rapidez en la disponibilidad de los datos, pudiendo analizarlos incluso durante el vuelo. En aplicaciones tales como tareas de reconocimiento en trabajos militares es fundamental; en el campo civil su importancia no es tan inmediata, pero sí muy destacable en análisis de desastres naturales tales como inundaciones, erupciones volcánicas, terremotos, etc.

En aplicaciones industriales se puede monitorear el desarrollo en la construcción de una vía de comunicación, un movimiento de tierras o unas excavaciones, comparando las imágenes que se van adquiriendo en el momento con material ya almacenado, y analizando los cambios más recientes.



Un campo nuevo que se abre con este tipo de cámaras es el estudio de la vegetación, daños, enfermedades, variaciones y clasificaciones de la agricultura, dado que este tipo de cámaras de nueva generación llevan CCD con sensibilidad espectral, de manera que alcanzan hasta el infrarrojo cercano.

La mayor sensibilidad de los sensores CCD y sus ventajas radiométricas sobre la película permiten marcar mayores contrastes dentro de las imágenes. En zonas urbanas es muy útil para las zonas más oscuras de las edificaciones dado que en estas áreas la película cubre un campo de 6 bits y los chips CCD llegan hasta 10 y 12 bits.

Desde sus inicios, los sensores digitales el mercado se han centrado en dos configuraciones diferentes:

- Sensores lineales**
- Sensores matriciales**

### Requisitos

La primera dificultad que enfrenta una cámara digital es conseguir -como mínimo- los mismos tiempos e intervalos de exposición de una cámara convencional. Para hacer un esbozo en cifras, esto significa que para obtener una resolución de 10 cm en el terreno a una velocidad de avión típica de 50 m/sg, el tiempo de exposición máximo es de 2 msg para cada CCD. Si el tiempo de exposición aumenta, esto se ve reflejado en una peor resolución en la calidad de la imagen. También hay que tener en cuenta que en este tipo de cámaras influye enormemente la sensibilidad de los chips CCD, que suele ir de 100 a 1000 ASA, lo cual requiere, en la mayoría de los casos, aplicar una compensación en el movimiento de la imagen, sobre todo si las condiciones de iluminación son muy pobres.



### Sensores digitales aerotransportados. (ADS).

El diseño de los sensores digitales aerotransportados debe tener en cuenta las necesidades de los usuarios que los demandan, para tener oportunidades con respecto a las cámaras convencionales de película. Las características fundamentales demandadas a dichos sensores aerotransportados son:

- **Gran ángulo de campo** y anchura de barrido, para economizar al máximo el número de pasadas necesarias para cubrir un área.
- **Alta resolución y precisión**, tanto de carácter geométrico como radiométrico, con el objeto de satisfacer al mayor número posible de usuarios que requieran dichas resoluciones y precisiones.
- **Capacidad de proporcionar imágenes multi-espectrales**, cada día más utilizadas, con aplicación en la elaboración de cartografía ambiental y de recursos naturales
- **Capacidad de proporcionar imágenes estereoscópicas**, que encuentren su adecuado tratamiento en los sistemas fotogramétricos digitales actualmente existentes, facilitando la extracción de información de las mismas por su carácter estereoscópico.

La primera característica está fuertemente condicionada por la disponibilidad en el mercado de matrices CCD capaces de realizar adquisiciones de imágenes de precisión en un período de tiempo reducido. En la actualidad, la mayoría de las matrices disponibles tienen tamaños en torno a 4.000 × 4.000 píxeles en el caso de matrices cuadradas y en torno a 12.000 píxeles en el caso de matrices lineales. La elección entre estos tipos es un hecho determinante que condiciona todo el diseño posterior del sensor, así como sus características tanto geométricas como radiométricas.

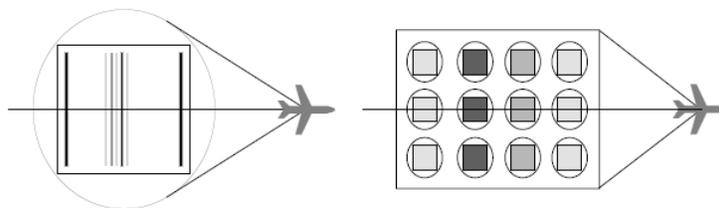


Figura 6. Izquierda: sensor CCD lineal compuesto por tres líneas pancromáticas y de 3 a n líneas multispectrales ; Derecha: matrices cuadradas múltiples RGB-IR para la mejora del ángulo de campo.

### Sensores lineales

El planteamiento teórico de los sensores lineales es bastante simple. El método consiste en la captura, en forma simultánea, de tres líneas del terreno transversales a la dirección del vuelo, utilizando para ello tres sensores de tipo lineal con diferentes inclinaciones (frontal, nadiral y trasero), de forma que, en realidad, tras la realización de una pasada lo que se obtiene son 3 bandas de imágenes, compuestas por cada una de las líneas capturadas por los sensores (Fig. 7). La estereoscopía en este tipo de sensores se consigue combinando las imágenes proporcionadas por cada uno de los sensores (frontal-nadiral, trasero-nadiral, frontal-trasero) presentando tres importantes características, que van a condicionar el tratamiento necesario para la extracción de la información de la misma mediante la aplicación del método fotogramétrico.

- Todos los puntos del terreno aparecen en las tres imágenes
- Para cada una de las bandas existen tantos centros de proyección como líneas componen la banda
- En cada una de las líneas nadirales existe un píxel (píxel central) en el cual el desplazamiento debido al relieve es nulo.

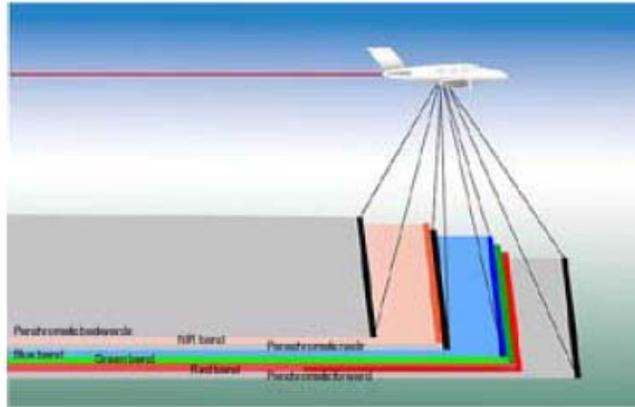


Figura 7. Captura de imagen mediante sensor lineal. Obtiene de forma simultánea las tres bandas (frontal, nadiral y trasera) apareciendo todos los elementos del terreno en las tres imágenes.

La aparición de todos los puntos del terreno en las tres bandas de imágenes (frontal-nadiral-trasera) representa una importante ventaja, al proporcionar una mayor robustez a los resultados obtenidos de la correlación cuando se utiliza el método de identificación automática de puntos homólogos en múltiples imágenes (*multiple image matching*). Por el contrario, la utilización de las imágenes fotográficas clásicas limita la zona de puntos triples a tan sólo el 60% de la superficie total del fotograma, en caso de emplear valores de solape longitudinal habituales.

La segunda característica, que en principio podría parecer que representa un inconveniente al necesitar el cálculo de un mayor número de incógnitas en los sistemas de ecuaciones de la orientación, se resuelve con la información complementaria al proceso de orientación, dado que la cámara posee sistemas de posicionamiento GPS/INS. Esto permite contar con unas aproximaciones de alta calidad en el proceso de resolución de los sistemas planteados, con valores de aproximación en navegación mediante técnicas diferenciales cinemáticas de código de 1 a 10 m, y en posicionamiento mediante técnicas diferenciales de fase de 1 a 10 cm. En este tipo de sensores se introduce el sistema de compensación TDI (*Time Delayed Integration*).

Por último, la presencia del píxel central nadiral con desplazamiento nulo debido al relieve en la banda de imágenes captada con el sensor en posición nadiral, permite una aplicación en la elaboración de ortofotografías de una forma sencilla (Fig. 9).

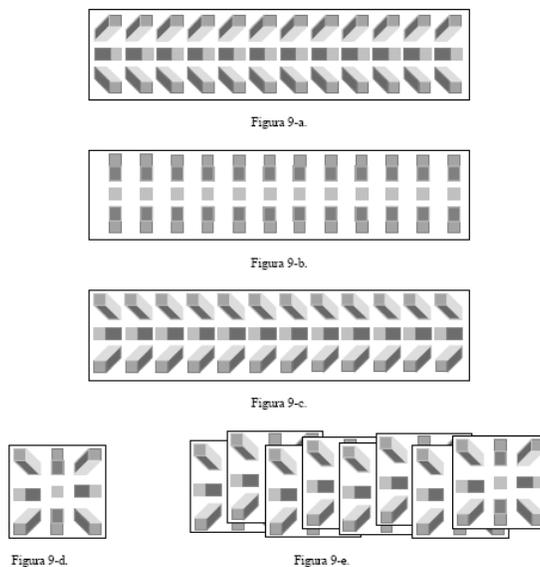


Figura 9. Características geométricas de las imágenes. 9-a. Imagen frontal del sensor lineal. 9-b. Imagen nadiral del sensor lineal. 9-c. Imagen trasera del sensor lineal. 9-d. Imagen fotográfica convencional. 9-e. Pasada de fotografías convencionales.

### Sensores matriciales

La técnica que utiliza este tipo de sensores es la misma que la de las cámaras aéreas convencionales basadas en película; para eliminar los errores geométricos se utiliza un pulsador central. Se utilizan diferentes cámaras compactas que toman la fotografía simultáneamente con unos pequeños ángulos de inclinación, cubriendo un mayor campo. El funcionamiento de una Cámara Digital Modular, basada en una tecnología matricial, consiste en un conjunto de módulos CCD que actúan en paralelo. La mayor resolución de la cámara CCD se debe a que se compone de 4 módulos pancromáticos y cuatro multi-espectrales. Las imágenes ligeramente divergentes que cada una de ellas captura se



componen en un post-proceso, el cual se lleva a cabo en el mismo avión y genera, a partir de cuatro imágenes, una única imagen virtual con un centro de proyección.

A este tipo de sensores también se les aplican sistemas de posicionamiento GPS e INS, pero no son imprescindibles como en el caso anterior. La sensibilidad es de 1000 ASA, muy superior a las películas convencionales. El movimiento en el momento de la toma de la imagen se compensa, como en el caso anterior, con técnicas TDI.

Cuando se utilizan lentes de captura muy rápida y las condicionales ambientales de iluminación son muy buenas, a veces se puede prescindir de este tipo de correcciones si la pérdida de calidad es aceptable.

Sin embargo, en los sensores en color la sensibilidad de la película disminuye dado que se aplican filtros a los elementos del CCD. La luz capturada por la lente se distribuye a los CCD por diferentes canales ópticos, cada uno de ellos precedido por un filtro de color (cámaras multi-chip), o se aplica una matriz de diferentes píxeles de color a cada CCD. Ambos diseños conllevan una pérdida de la iluminación, lo que hace que se incremente el tiempo de exposición y esto da lugar a diferentes correcciones.

#### Una cámara matricial aporta las siguientes ventajas:

- Geometría estable y bien definida.
- FMC (*Forward Motion Compensation*), para compensar el movimiento en la toma de la imagen.
- Punto de Perspectiva central.
- Tratamiento on-line.
- Tratamiento similar a las cámaras convencionales.

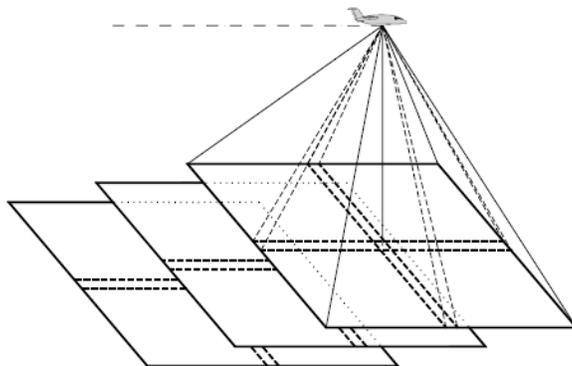


Figura 10. Captura de imagen mediante sensor matricial.

Este tipo de dispositivos permiten capturar las imágenes en una única dimensión, a muy alta resolución. Durante el vuelo se captura la segunda dimensión como resultado del propio movimiento del avión. Sin embargo, no existe una orientación relativa fija para cada foto, debido precisamente a este movimiento. Para unir estas pasadas individuales se necesita un sofisticado y preciso sistema de posicionamiento que se aplica en post-procesos a estas imágenes. Estos sistemas suelen ser sistemas GPS y Sistemas de Navegación Inercial (INS), los cuales aportan no sólo gran precisión sino también gran rapidez en el cálculo del ángulo y la posición espacial de la cámara en el momento de la toma de la escena.

El mayor problema de este sistema radica en las precisiones radiométricas en cada foto a lo largo y ancho de la pasada. Muchas aplicaciones de reconocimiento no necesitan llegar a este tipo de resoluciones, pero otras sí. En estas segundas tendríamos que introducir un concepto nuevo, ya incluido en el diseño matricial multi-línea, que es la compensación TDI, una compensación electrónica en cada fila de píxeles, al movimiento del avión.



La capacidad para capturar imágenes en color es simple. Es una extensión a las cámaras lineales en las cuales se añaden diferentes líneas en los lentes a diferentes longitudes de onda para capturar imágenes multi-espectrales y en color.

Para mayor información sobre las actividades de catastro de la OEA haga clic [aquí](http://www.oas.org/es/sap/dsmg/catastro/) o visítenos en <http://www.oas.org/es/sap/dsmg/catastro/>

Visítenos también en

