

# Ortofoto verdadera (True-Ortho) y Lídár, el posible futuro de la cartografía catastral urbana

**Luis Julián Santos Pérez**

Ingeniero Técnico en Topografía  
Ingeniero en Geodesia y Cartografía  
D.G. del Catastro. Madrid

Las ortofotos fueron realizadas inicialmente a partir de película fotográfica utilizada para obtener imágenes mediante cámaras aéreas. Son por tanto uno de los productos que se pueden obtener de la fotogrametría. Vamos a abordar a continuación la evolución de la tecnología fotogramétrica a modo de presentación del estado actual del arte.

Como todas las técnicas relacionadas con la imagen, la fotogrametría ha evolucionado de forma drástica desde las imágenes analógicas a las digitales. En el campo de dicha técnica, se ha pasado en unos años desde las soluciones *optico-mecánicas* de tipo totalmente analógico a las *analíticas*, que significaban la entrada de la informática (hardware + software) combinada con imágenes analógicas pero la revolución real aparece en estos momentos actuales de la mano de la *imagen digital*.

Las principales ventajas de las técnicas digitales son, por un lado la *automatización de los procesos* –ya que desaparece la componente óptico-mecánica + electrónica que

son sustituidos por software– y por la posibilidad de identificar puntos homólogos en las imágenes, es decir de medir automáticamente, casi sin intervención humana, mediante los restituidores fotogramétricos digitales. Potencia, por tanto las herramientas matemáticas de la fotogrametría analítica y de los procesos digitales de imágenes, abriendo la técnica a la generación de diferentes tipos de cartografías y representaciones tanto en 2D como en 3D.

## Evolución histórica de la fotogrametría

Un buen punto de partida sería la definición aceptada hoy para la fotogrametría, según la ASP (*American Society of Photogrammetry*): “*La fotogrametría es el arte, ciencia y tecnología que permite extraer información exacta sobre objetos físicos y lo que les rodea a través de procesos de grabación, medición e interpretación de imágenes fotográficas*”.

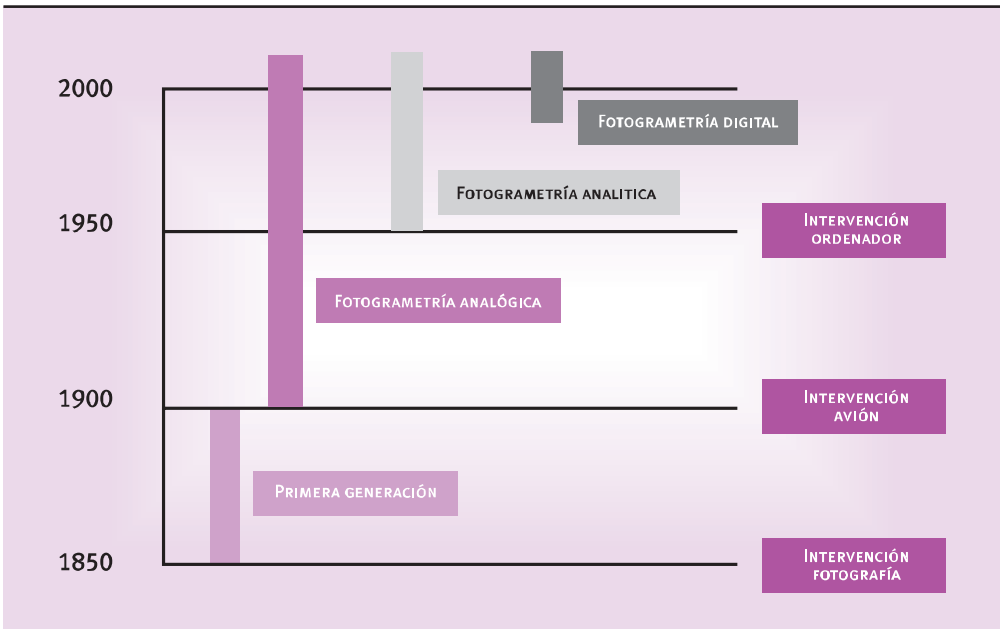
Remontándonos a los orígenes de la ciencia, Aristóteles en el 330 a.C, acometió el fenómeno de la proyección óptica de imágenes, en su evolución tuvieron un importante papel matemáticos como Lambert y Laussedat e inventores de la fotografía como Daguerre. Es Laussedat quien es considerado “Padre de la Fotogrametría” ya que en 1859 inventó un método para determinar las coordenadas del objeto mediante la intersección de rayos homólogos provenientes de un fototeodolito.

Las etapas históricas de la fotogrametría (fig. 1) se entiende que son:

**1. Periodo inicial.** Desde 1850 con el invento y perfeccionamiento de la fotografía hasta 1900. Se mejoró mucho la emulsión gelatinosa y se experimentó con fotos aéreas mediante globos aerostáticos y cometas.

**2. Periodo analógico.** Desde 1900 hasta 1960. Los tres hechos fundamentales en el comienzo de esta etapa fueron la invención del Avión (Hermanos Wright, 1903), la de la estereoscopia + índice flotante (Pulfrich y Stolze, 1900) y la posibilidad de obtener ortofotos a partir de fotos perspectivas (Sheimpflug, 1903). Las dos guerras mundiales dieron un impulso gigantesco a esta ciencia, tanto para tareas de reconocimiento como de ejecución de cartografía. Este periodo analógico, se puede decir que aún en nuestros días sigue persistiendo ya que en muchas zonas del mundo se utiliza, debido a su simplicidad y economía así como a la calidad de los aparatos realizados a lo largo de su duración. Hay que hacer constar que incluso estos aparatos se han modernizado mediante codificadores y ordenadores que permiten obtener un producto cartográfico informatizado a partir de tecnología analógica.

Figura 1  
Evolución histórica de la fotogrametría



**3. Periodo Analítico.** El hito fundamental que permite el desarrollo de esta nueva etapa, es la aparición y rápido desarrollo de los ordenadores. En el año 1959 U.V. Helava inventó el restituidor analítico. La rápida capacidad de cálculo de los ordenadores sustituyó a los componentes mecánicos y eliminaron las limitaciones ópticas de forma que podían manejar cualquier tipo de fotografía (aérea ó terrestre) y facilitar la aerotriangulación.

**4. Periodo Digital.** El desarrollo de los semiconductores y de la microelectrónica ha permitido el desarrollo de la fotografía digital. Una foto digital, por tanto no es ni más ni menos que una matriz matemática (formada por celdas ó posiciones) en la que cada elemento tiene un valor de nivel de gris ó de color, por tanto los ordenadores las manejan perfectamente. En un primer momento las fotos convencionales se escaneaban para pasarlas a formato digital, hoy en día la evolución técnica permite que las cámaras digitales, sean directamente situadas en el avión para evitar el posterior escaneo y ganar precisión y velocidad. Si esto se

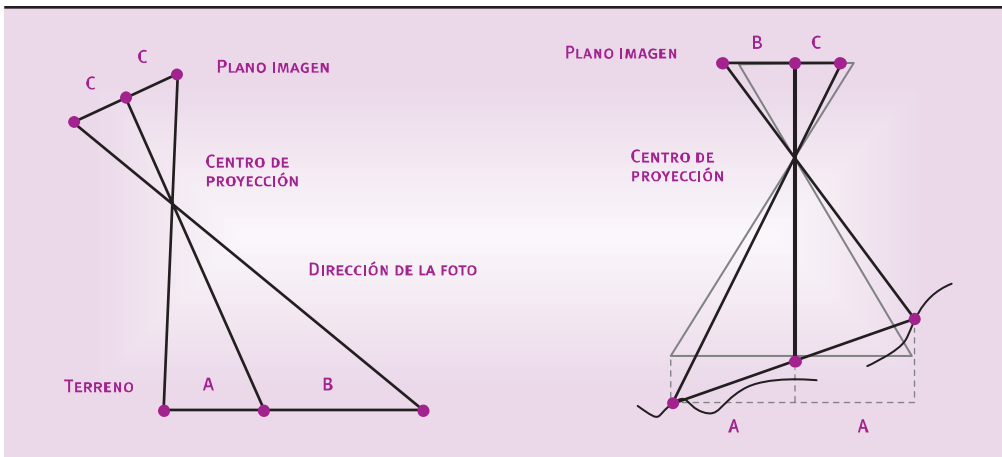
une a la posibilidad de obtener las coordenadas del punto de toma con alta precisión mediante GPS en el avión y al sistema de navegación inercial INS, las ventajas técnicas y económicas son enormes.

Por tanto la obtención de ortofotos ha ido pasando por cada una de estas fases, beneficiándose de los avances de cada una de las etapas.

## Ortofoto (analógica) y Ortoimagen (ortofoto digital)

La fotografía convencional –entre ellas la aérea– es una proyección perspectiva o cónica; el proceso de elaboración de ortofotomágenes consiste en pasar de este tipo de perspectiva a una proyección ortogonal, es decir con el punto de vista situado en el infinito (rayos perspectivos paralelos). Este proceso elimina también las deformaciones producidas por inclinación del eje de toma y las producidas por el relieve del terreno (fig. 2).

Figura 2  
Deformaciones por inclinación y relieve



Para utilizar una foto aérea como un mapa, se han de eliminar estos tres efectos:

- El producido por el sistema de proyección.
- Los producidos por la inclinación.
- Los producidos por el relieve del terreno (que darían varias escalas diferentes, dependientes de la cota).

La eliminación de estos efectos se conoce como "Rectificación diferencial". La ortofotografía, como en otros aspectos de la fotogrametría, también necesita un vuelo con solape estereoscópico (un detalle del terreno está al menos en tres fotogramas) pero en este caso el solape ha de ser mayor y pasar del 60% al 80 y al 90% para así poder elegir la mejor fotografía a rectificar.

En la actualidad las ortofotos analógicas están siendo desplazadas por las ortofotos digitales, ya que las primeras son más complejas de obtener y de almacenar. El principio consiste en crear a partir de un vuelo fotogramétrico un documento que se pueda utilizar como un mapa, es decir que se puedan medir distancias y superficies sobre él, aplicando el sistema de Rectificación diferencial.

### **Ortofoto analógica. Rectificación diferencial**

El sistema de generación de ortofotos analógicas consiste en formar un modelo tridimensional óptico del terreno en un aparato de restitución fotogramétrica. Si el terreno fuera completamente llano y horizontal y el eje de toma rigurosamente vertical, podríamos emulsionar un papel fotográfico con ese modelo y tendríamos un documento muy similar a una ortofoto y lo que es más, a un mapa. La imagen de la ortofoto sería similar al terreno, con razón de semejanza  $f/H$  (siendo  $f$  la distancia focal de la cámara y  $H$  la altura de vuelo sobre el terreno en el momento de la toma).

Pero el terreno no suele ser así, no es horizontal ni llano, y menos en nuestro país. Por tanto si ese terreno lo descomponemos en elementos muy pequeños mediante una ventana móvil (elementos diferenciales) cada uno tendría una inclinación y una escala (por estar a diferente altitud), eso se evitaría alejando o acercando la proyección e inclinando dicha ventana. Esta es la idea básica de la ortoproyección. El resumen de las operaciones sería:

- a. Recorrido continuo y automático del modelo mediante perfiles paralelos recorridos por una pequeña ventana, que el operador mantiene siempre "apoyada" en el terreno óptico 3D.
- b. Proyección y rectificación automática.
- c. Impresión simultánea de una película, que una vez compuesta por todos los perfiles y revelada dará lugar a la ortofoto.

En cuanto a la forma en que se corrigen las causas de error en lo que se refiere a la métrica de la imagen fotográfica, existen tres métodos para la generación de fotomapas de menor a mayor precisión (estamos hablando de fotogrametría puramente analógica, hoy día con la fotogrametría digital esto está superado):

- **Mosaicos fotográficos.** Se trata de uniones de fotografías aéreas directamente, a modo de puzle, no se aplica ninguna corrección y sólo se toma la parte central de las fotos aéreas para disminuir errores. (antiguas aplicaciones militares).
- **Rectificación.** Corrige sólo el error debido a la inclinación del eje de toma, enderezando todo el fotograma.
- **Ortoproyección.** Este sistema, el más sofisticado, corrige los errores por inclinación del eje de toma y relieve del terreno por unidades diferenciales, que ensambladas, dan una imagen métrica y fotográfica del terreno.

Es el único método riguroso de de obtención de fotomapas, siendo mejorado actualmente por la entrada de la imagen digital.

### Introducción a los usos catastrales de la TELEDETECCIÓN

La definición de teledetección (vocablo que es traducción del término compuesto inglés *remote sensing*) es la técnica que permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales.

Por tanto suponemos que entre la tierra y el sensor existe una interacción energética (si es reflexión de la energía solar), que sería recogida por *sensores pasivos*, o un haz energético artificial si es por emisión propia (rádar, lidar, etc...) caso en el que tendríamos *sensores activos*. También se necesitará, un sistema de transmisión de información a las estaciones terrestres en las que se van a tratar los datos así obtenidos.

Las imágenes normalmente utilizadas proceden de satélites artificiales y se utilizan para realizar cartografía temática, pudiendo obtener diversas escalas, sin poder mejorar en la actualidad el 1:5.000, pero en muy pocos años será una técnica de directa aplicación en catastro ya que existen empresas internacionales trabajando en obtener estos resultados. La aplicación directa sería la de obtener interpretaciones agronómicas (tipos de usos del suelo) y por tanto profundizar en el conocimiento de los recursos naturales, oceanográficos y medioambientales por un lado y por otro realizar estudios de evolución de los núcleos de población a escalas medias ya que se cuenta con imágenes de una misma zona cada poco tiempo (alta resolución temporal). Sería por tanto una buena fuente de datos para "actualizar" la cartografía catastral rústica y urbana y si no para actualizar sí para indicar de forma rápida y económica "donde" actualizar.

Las imágenes se obtienen a partir de la energía que recogen los sensores situados en las plataformas espaciales, bien reflejada del Sol o bien emitida por ellas mismas. Esta energía se convierte en un conjunto de valores numéricos (digital) que se envían al sistema de recepción.

La visualización de esta imagen se ha de realizar en un equipo que convierta la información de digital en analógica, de forma que se cree una imagen que presente anomalías en cuanto a la localización de los píxeles y su valor radiométrico (como en una foto digital actual, está compuesta por celdas en disposición matricial (píxel), cada una con un valor radiométrico (nivel de gris ó color). Los millones de celdas serán los megapíxeles de la imagen capturada.

Estas imágenes han de corregirse geométricamente siguiendo una función matemática para "ponerla en proyección" y georreferenciarse, es decir identificar objetos con coordenadas conocidas (puntos de control) para que la imagen tenga escala y pueda generar un documento cartográfico. Las propiedades de la imagen en teledetección son:

- a. **Contraste.** Diferencia de valor o tono entre las áreas más claras y más oscuras de la imagen. Relación entre el brillo de un objeto y el de su entorno.
- b. **Brillo.** Indica la medida de las variaciones de intensidad de radiación electromagnética captada por el sensor.
- c. **Resolución.** Mide la habilidad de un sistema sensor para discriminar información dentro de la imagen.
  - **Resolución Temporal.** Indica el tiempo transcurrido entre el paso del satélite por una zona en el momento  $t_1$  y el momento  $t_2$ .
  - **Resolución Radiométrica.** Da la capacidad el sensor para discriminar niveles de grises en cada una de las bandas.

- **Resolución Espacial.** Indica la unidad de información más pequeña que se puede discriminar en la imagen.
- **Resolución Espectral.** Informa del ancho de las bandas y el número de ellas registradas por el sensor. Una banda espectral es una selección de longitudes de onda con comportamientos electro-magnéticos similares. *(Por ejemplo si una cámara de las varias que un satélite porta, se dedica a la banda del “infrarrojo térmico”, tendrá un ancho de banda que irá desde las 10 a las 100 micras de longitud de onda).*

Antes hemos hablado de sensores, pero éstos van portados sobre plataformas, que según su movimiento se clasifican en “geo-estacionarias” si están sincronizadas con el giro terrestre situadas a gran altura (más de 20.000 km.) y observan siempre la misma zona o “heliosíncronas” que giran a una velocidad distinta a la de la tierra y siguen órbitas más bajas (menos de 20.000 km.).

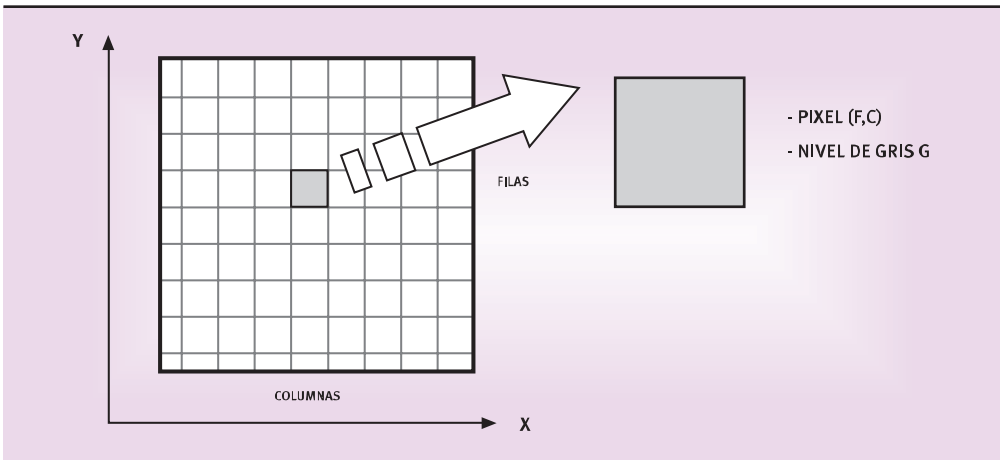
### Ortoimagen u ortofoto digital

Hasta ahora hemos visto como la fotogrametría analógica se basaba en instrumentación óptico-mecánica y métodos “artesanales”, la fotogrametría analítica medía coordenadas de la foto de forma óptico-mecánica, pero calculaba los procesos de forma matemática gracias a los ordenadores, sus métodos eran “semiautomáticos”. El gran salto de la fotogrametría digital es el empleo de fotografías digitales (matrices numéricas), ya realizadas con cámaras digitales (si no es así es necesario escanear las imágenes analógicas y convertirlas en matrices numéricas) y permiten una muy alta automatización.

Por tanto una imagen digital es una matriz bidimensional (fig. 3) de niveles de gris (o de valor de color) con elementos de información mínima (píxeles) que varían en función de la posición (fila-columna) que ocupan dentro de la matriz (J. L. Lerma 2002).

Las imágenes digitales se forman a partir de un proceso de muestreo, llamado digitalización. En él una zona pequeña del

Figura 3  
Detalle del formato matricial de fotografía digital



sensor registra de forma directa la información correspondiente a una zona del modelo registrado. (ya sea escaneo ó adquisición de la imagen mediante cámara digital).

Cada casilla se denomina píxel y viene definido por su índice píxel (i,j) ó (f,c), por su posición x,y en es sistema de coordenadas de la foto y por su nivel de gris (negro=0, blanco=255). El tamaño del píxel se suele definir por el número de ellos que caben en una pulgada (2,54 mm.) ó por su tamaño en terreno ó real.(un píxel puede medir 20 micras de lado ó representar, si la imagen es de escala 1:20.000, 20 cm. en el terreno).

Con la fotogrametría digital, aumenta la automatización de los procesos, todos los sistemas óptico-mecánicos e incluso electrónicos han sido sustituidos por programas informáticos. El *flujo de trabajo en fotogrametría digital* está compuesto por las fases que se detallarán posteriormente y que recoge el diagrama de la figura 4.

A continuación se describen detalladamente cada una de las fases del proceso.

### ***Vuelo fotogramétrico con GPS + Apoyo cinemático***

El verdadero salto tecnológico, sería la obtención de las imágenes digitales en el avión para evitar el largo proceso de escaneo de las imágenes analógicas. En estos momentos (finales del 2004) hay varias empresas que han conseguido fabricar cámaras digitales aéreas con la suficiente perfección como para evitar su posterior digitalización. En España existen varias ya adquiridas por organismos administrativos y por empresas privadas.

El problema fundamental que no permitía desarrollar cámaras digitales aéreas era la inestabilidad de la trayectoria del avión que provocaba movimientos y vibraciones del avión, esto producía complejos problemas de rectificación de las deformaciones de la imagen pero gracias a las nue-

vas tecnologías –sensor trilineal de barrido + sistema inercial– esto ha quedado superado, de forma que hoy en día, por ejemplo el *sensor digital ADS40* de Leica (fig. 5), hasta hace poco permitía resoluciones de 15 cm. llegando ahora a los 5 cm., por lo que se hace perfectamente apto para ser empleado en la obtención de cartografía a gran escala y es aceptado para ser utilizado en grandes proyectos de ortofotografía.

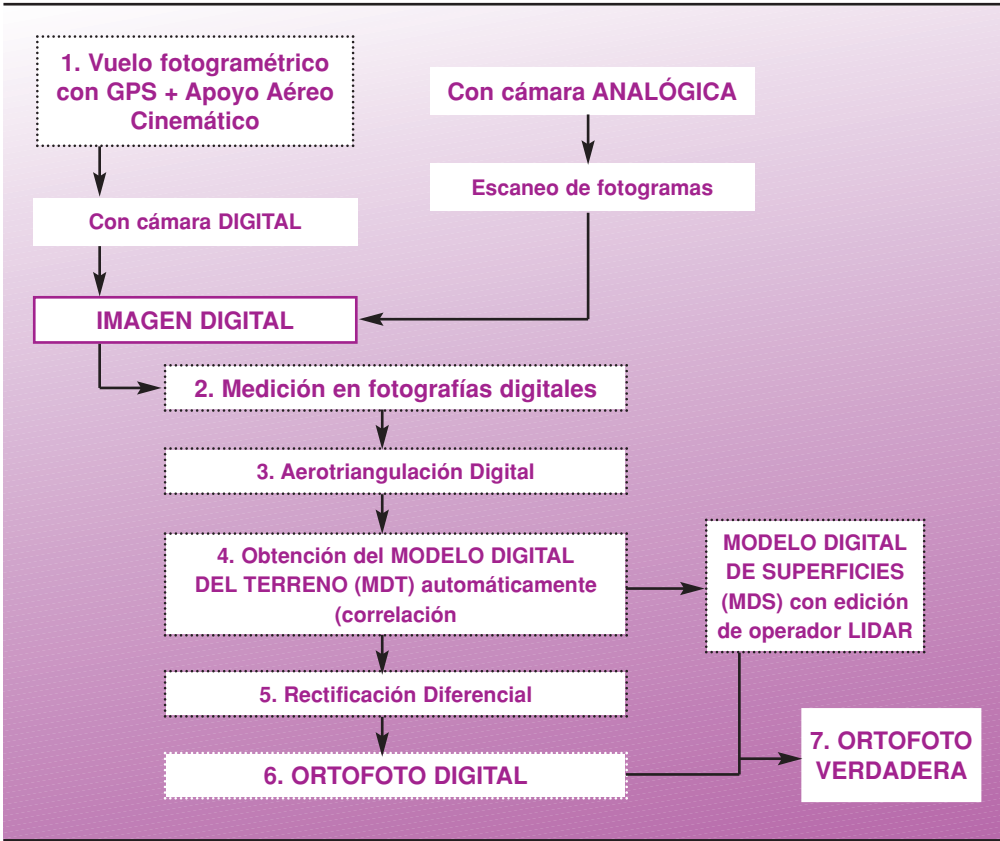
Hemos de tener en cuenta que para conseguir altas resoluciones hay que capturar en vuelo, en un intervalo menor a 2 segundos una matriz de 20.000x20.000 píxels, esto da idea de la complejidad del problema.

Estas cámaras digitales han supuesto una revolución ya que eliminan las fases de revelado y escaneo de negativos, lo que permite una reducción del tiempo necesario entre el vuelo y el tratamiento fotogramétrico de las imágenes, lo que provoca directamente una disminución de los costes así como de los tiempos de actualización de las cartografías.

Este sensor ya ha sido ampliamente utilizado en EEUU, ejecutando con él el levantamiento fotogramétrico para ortos de 1m. del estado de Nebraska (230.000 km<sup>2</sup>) en tres meses, contratando para este año 100.000 km<sup>2</sup> para el Departamento de Agricultura. Para ello, se han exigido unos requisitos que pasan por exigir la misma resolución para la imagen color e infrarroja que para la pancromática (b&w). También Rusia, ha adquirido dos sensores digitales para elaborar su catastro tras el largo periodo en que la propiedad privada no existió. En el resto de Europa se están incorporando sensores digitales para el catastro agrícola (ortofotos SIGPAC).

Para no exponer sólo las ventajas de los sensores digitales, podemos comentar su precio aproximado de un millón de euros y también el tamaño de los ficheros digitales obtenidos. Por ejemplo si se escaneara con las resoluciones previstas por el Plan Nacional de Ortofotografía (IGN-España),

Figura 4  
Diagrama de flujo de trabajo en fotogrametría digital



cada imagen ocuparía de 250 a 300 Mb; con las cámaras digitales, los tamaños serían menores, pero aún así muy grandes, más o menos cien veces superiores a los que produce una cámara digital doméstica de gama media.

La ventaja de conectar la cámara a un receptor GPS unido a un sistema de navegación inercial como el INS (*Inertial Navigation System*) permite obtener varias ventajas:

- **Planificación del vuelo y navegación.** Sin necesidad de salir de gabinete, sobre cartografía de la zona a

volar, se determinan las coordenadas teóricas de los puntos de toma de las imágenes (X,Y) y la altura de vuelo; también el horario de vuelo en función de las fechas, latitud, etc... Una vez en vuelo, conectados a un receptor GPS, el software calcula continuamente las diferencias entre la posición real con la teórica prevista y corrige la trayectoria, consiguiendo precisiones de 2 m. si se usa GPS diferencial (correcciones diferenciales radiodifundidas).

El sistema guía al piloto a la zona, le da la geometría de las pasadas y reali-





Figura 5. Sensor digital ADS40. Cortesía de Leica Geosystems.

za los disparos de las imágenes en función de las coordenadas de inicio y fin de pasada, de los recubrimientos y de la posición del avión en cada pasada.

- **Obtención de las coordenadas de los puntos de toma.** Cuando la cámara dispara (el avión puede llevar una  $v=250$  km/h) ésta emite una señales en las que se registra el *tiempo GPS* exacto del momento del disparo. Como el tiempo GPS se registra cada 0,5 ó cada 1 segundo –para esos momentos tenemos coordenadas X,Y,Z exactas– en gabinete se interpola para hallar la posición exacta del punto de toma de cada disparo.
- **Apoyo aéreo cinemático.** Al determinar en vuelo las coordenadas de los puntos de toma, disminuye sensiblemente la cantidad de apoyo terrestre necesario para aerotriangu-

lar (puntos de apoyo tomados en campo por topografía clásica ó GPS) y automatiza los procesos posteriores. Para realizar este tipo de apoyo, se necesita:

- Cámara fotogramétrica con conexión al receptor GPS del avión.
- Receptor GPS en la aeronave, que registre datos cada 0,5 seg. Así como conocer la posición relativa con alta precisión del centro óptico de la cámara con respecto a la antena GPS.
- Receptor GPS de referencia en suelo situado a menos de 500 km. del avión (para emitir correcciones diferenciales).
- Puntos de control en el suelo en cada esquina del bloque de fotos (muchos menos que si no existiera el GPS en avión) para transformar al sistema geodésico nacional.

De esta forma se potencia la eficacia de la aerotriangulación, reduciendo considerablemente el número de puntos de control, teniendo las posiciones de la cámara en el momento del disparo y usándolas como observaciones adicionales en el cálculo de la aerotriangulación mediante el software adecuado. (A. Gómez 1999).

### ***La medición en el proceso fotogramétrico digital***

En este momento del proceso y en otros cobra gran importancia la medición automática en fotogrametría digital. Todas las mediciones en fotogrametría analógica y analítica se hacían mediante el sistema de marca flotante –el modelo virtual 3D– que formaba el aparato fotogramétrico, era recorrido por un índice (a modo de pequeño globo) que el operador iba posando en el terreno y recorriendo todo lo que se quería dibujar –curvas de nivel si siempre sigue la misma cota ó detalles planimétricos– definiendo así de forma continua los puntos homólogos de ambos fotogramas.

En fotogrametría digital surge el concepto de medición automática mediante identificación de imágenes homólogas (*image matching*). Se basa en complejas técnicas de reconocimiento de patrones mediante el barrido de una determinada área de las imágenes.

En líneas generales se trata de encontrar de forma automática la imagen homóloga en un fotograma de la determinada en el otro. (Una misma imagen aparece en dos fotogramas contiguos, tomada desde dos puntos diferentes a lo largo de la trayectoria del avión). Se ha de partir de estar situados en las mismas zonas de búsqueda.

Los sistemas de reconocimiento de imágenes (correspondencia) en los que se basa este proceso son:

1. SBM (*symbolic based matching*) (*del inglés, to match.- emparejar*). Se basa en propiedades topológicas (de proxi-

midad, forma, etc...) definidas en BBDD con descripciones de objetos para identificar imágenes homólogas.

2. ABM (*area based matching*). Esta es la famosa correlación. Se estudia una ventana de píxeles de zonas similares en ambas imágenes intentando correlar el origen y el destino valorando los niveles radiométricos de cada píxel de la imagen (nivel de gris de cada píxel). El nivel de precisión de la correlación se estima por mínimos cuadrados. Es el sistema más extensamente utilizado.
3. FBM (*feature based matching*). Las ventanas de imagen y destino son agrupaciones de píxeles que representan formas (características) como puntos, líneas, etc...

### ***Aerotriangulación***

La aerotriangulación es la técnica fotogramétrica que permite determinar las coordenadas de los puntos de enlace entre pasadas y modelos así como los parámetros de orientación exterior (relativa y absoluta) de cada uno de los modelos fotogramétricos, a partir de un mínimo número de puntos de apoyo tomados en el campo y ayudados de mediciones hechas en los fotogramas.

La aerotriangulación digital es el proceso que más fácilmente se puede automatizar de todos los que componen el flujo de trabajo fotogramétrico digital.

Las ventajas de la aerotriangulación digital son el gran nivel de automatismo del proceso, su velocidad de ejecución (4 minutos por foto), alta precisión y economía. Tras obtener la orientación interna y externa de cada foto, se podrán visualizar en estación de trabajo digital de forma estereoscópica (3D) y obtener cartografía.

Las fases de la aerotriangulación digital son:

- Definición del bloque de fotos que ha de cubrir la zona a cartografiar.

- Medición automática de los puntos de control (con leve ayuda humana).
  - Elección de los puntos.
  - Numeración de los puntos.
  - Transferencia de los puntos a las fotos anexas.
  - Medición de coordenadas instrumentales de los puntos.
- Cálculo y compensación.

### Obtención del Modelo Digital del Terreno (MDT)

En las fases anteriores se ha abordado la realización de la orientación del modelo 3D y la aerotriangulación de todo el bloque. Un paso fundamental para la obtención de ortofotos es la obtención del MDT. Este se puede obtener manualmente –estableciendo una red de puntos con coordenadas X,Y,Z conocidas, mediante la continua intervención del operador–, pero no es lo usual, dado que el proceso es fácilmente automatizable, mediante técnicas de correspondencia automática de imágenes –valiéndonos de los sistemas de correlación automática (encontrar en una foto el detalle seleccionado de la anterior)–.

Otra forma de obtener el correspondiente MDT es mediante el *escaneado láser* (“*laser scanning*” ó LIDAR), valiéndonos de los grandes avances en esta técnica, que es el objeto de la segunda parte de este artículo.

La denominación más genérica de estos modelos es la de MDE (Modelo Digital de Elevaciones), de los cuales un caso particular es el MDT que describe la *superficie del terreno*, sin considerar lo que sobre él existe. Son un conjunto de datos (coordenadas X e Y de puntos) de las que se extrapola la coordenada Z en función de las Z de su alrededor. Está compuesto por una malla regular ó irregular con características diferenciadas al que se añade las líneas de cambio de pendiente. Un caso particular del MDT es el Modelo Digital de Edificios (en inglés DBM “*Digital Building Model*”) que representa la superficie 3D de objetos y detalles realizados por el hombre que están situados sobre el MDT (edificios y estructuras).

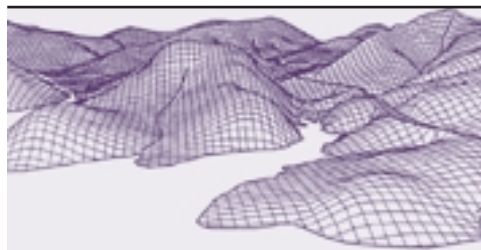
El modelo que completa la relación es el Modelo Digital de Superficies, (DSM “*Digital Surface Model*”) (ver cuadro 1) que es el más completo de todos ya que envuelve y modela por completo la superficie 3D de una zona (vegetación, edificios, mobiliario urbano, terreno, etc...).

Por tanto de un MDS podemos obtener un MDT eliminando todo lo que sobresale o penetra en el terreno (J. L. Lerma 2002).

Una vez elegido el tipo de modelo que hemos de utilizar, pongamos el más sencillo, el MDT, basándonos en la identificación automática de puntos homólogos en ambas fotos, y conocidos de la anterior fase las orientaciones de los modelos 3D, calculamos automáticamente, de forma analítica la Z del terreno. El paso siguiente sería definir la cuadrícula (paso), precisión altimétrica de la misma, escala de la foto y método de captura. Mediante el método elegido, primero el operador define las líneas de ruptura y cambios de pendiente, y luego mediante las técnicas comentadas FBM ó ABM partiendo de la selección de un detalle en la imagen original, se identifica el mismo en la imagen homóloga, se aplican ecuaciones de colinealidad y se obtiene la Z del terreno.

Este proceso se repite en todas las zonas del modelo 3D y a partir de estos puntos se

Figura 6  
Representación de Modelo Digital del Terreno



Cuadro 1  
Modelo Digital de Superficies

Nivel de detalle	Tipo de modelo	Siglas español	Siglas inglés
1 (máximo)	Modelo Digital de Superficies	M.D.S.	D.S.M.
2 (medio)	Modelo Digital de Edificios	M.D.Ed.	D.B.M.
3 (mínimo)	Modelo Digital del Terreno (ó de Elevaciones)	M.D.T. ó (M.D.E.)	D.T.M. ó (D.S.M.)

interpola una superficie del terreno para obtener la cuadrícula de puntos final.

Este método es uno de los utilizados, pero como ya se adelantó la tendencia actual es el uso del sistema LIDAR, por lo que un input para la rectificación de imágenes aéreas es el modelo de elevación. La forma tradicional de corregir la geometría de la imagen es mediante el uso de un modelo de suelo desnudo ó raso. (MDT). El resultado de este tipo de rectificación es aceptable para aplicaciones a pequeña escala, sin embargo, las imágenes a gran escala sufren del hecho de que los objetos en 3D tienen una “tendencia”.

Los objetos en 3D no están representados de forma geoméricamente correcta, ya que sus alturas no están tomadas en cuenta. En el caso de edificios, los desplazamientos de sus encuentros con el suelo (pies) y tejados es extremadamente inadecuado, cuando, por ejemplo, se mezclan las imágenes con otra información geográficamente correcta.

En el pasado, la información 3D de los objetos era extraída frecuentemente sólo de los objetos “relevantes”, tales como edificios, puentes, etc... Los objetos tales como árboles, coches, y otros irrelevantes, no eran considerados ya que era demasiado trabajo determinar sus alturas.

El escáner láser aerotransportado, es un medio para generar un modelo completo 3D de la superficie. Un LIDAR DSM (modelo digital de superficies obtenido por LIDAR aerotransportado) forma la base ideal para una rectificación muy perfecta, suponiendo que ambas escalas y resoluciones de las imá-

genes y de los datos de elevación del LIDAR estén armonizados (U. Lohr 2002)

*Utilización del sistema LIDAR para crear Modelos digitales*

Una vez orientado el par estereoscópico el siguiente paso para la obtención de la ortofoto verdadera (true-ortho), sería conocer con la mayor precisión posible el relieve del terreno, su forma topográfica, para poder adaptar a él, de esa forma el par estereoscópico y realizar las correcciones diferenciales, que conviertan en la fotografía aérea en un documento cartográfico que permita obtener mediciones fidedignas sobre él.

Tradicionalmente el modelo digital del terreno (MDT) se obtenía mediante correlación del par estereoscópico. Es decir una vez situado el par estereoscópico en la misma posición relativa con respecto al objeto (orientación relativa), reproduciendo los parámetros fotográficos de toma (orientación interna), y nivelado y escalado el modelo formado (orientación absoluta), los artilugios matemáticos desarrollados en el moderno software son capaces de ir correlando los puntos homólogos, es decir, posándose sobre el modelo 3D formado de forma automática y en tiempo real.

Esto permite ir registrando las cotas (coordenada Z) de todos los puntos del terreno, normalmente mediante una cuadrícula predefinida incorporando a ella los puntos que el operador seleccione para definir mejor las líneas importantes del terreno (una elevación, un borde de talud, etc...). Si hablamos

de cartografía urbana, sería necesario aumentar en gran manera la precisión de esta red, aparte de obtener puntos en el terreno, sería necesario, dar puntos de cota en los encuentros de los edificios con el terreno y en la parte superior de los mismo, para así definir un modelo 3D urbano en el que aparezcan todas las volumetrías de los edificios.

Este conocimiento de la forma del terreno así obtenido, adolece de diversas fuentes de error, sobre todo en la posición mal elegida de los puntos para los fines buscados. La llegada de un sistema de captación de datos sobre el terreno como el LIDAR, en los últimos años de la década de los 90 ha venido a cambiar de forma radical esta visión de los problemas que nos atañen y ha supuesto una verdadera revolución para las ciencias cartográficas y para la ingeniería.

### *Descripción del sistema LIDAR*

Las siglas LIDAR, significan **L**ight **D**etection **A**nd **R**anging. Consiste en un sensor láser transportado en avión que obtiene un modelo digital del terreno (MDT) por telemetría láser. Es decir, mide de forma extraordinariamente rápida y precisa distancias desde la posición del sensor hasta el objeto, en nuestro caso (aéreo) desde el sensor aerotransportado hasta el suelo, representando hasta los más pequeños detalles de su superficie. También se puede situar el sensor en el suelo y tendríamos un sistema similar.

#### **a. Orígenes**

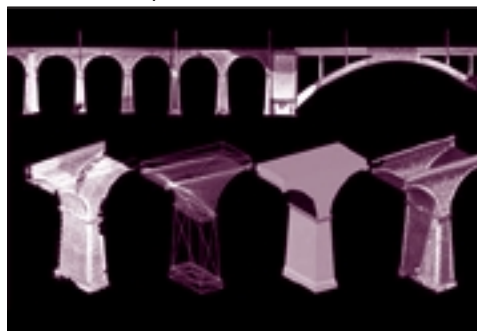
A modo de breve pincelada, la base en la que se funda el sistema es la medida de distancias mediante láser. Esto se ha venido usando desde hace tres décadas en los aparatos de medida electrónica de distancias, de forma que un distanciómetro electromagnético emitía un rayo láser de luz no visible que se reflejaba en un prisma reflec-

tor situado en el otro extremo de la distancia a medir. Conociendo la velocidad de la luz y midiendo el número entero de longitudes de onda así como la porción no entera, se calculaba la distancia con una precisión de pocos milímetros por km.

Este sistema tiene el mismo fundamento, pero en este caso el haz láser es muy condensado y visible (de hecho no se puede usar en determinados lugares habitados en determinadas frecuencias por si incide en los ojos de alguna persona) y mide cientos de distancias por minuto.

Si el sensor lo situamos en tierra en vez de en un avión, tenemos el sistema de medida láser escáner terrestre, con el mismo fundamento. En este caso crea un modelo tridimensional perfecto con perfecta definición, del objeto a estudiar. Cada uno de los puntos de la imagen tiene coordenadas X,Y,Z de alta precisión en función de la distancia a la que se encuentre el modelo (Fig. 7).

Figura 7  
Levantamiento de puente en 3D  
por láser scanner

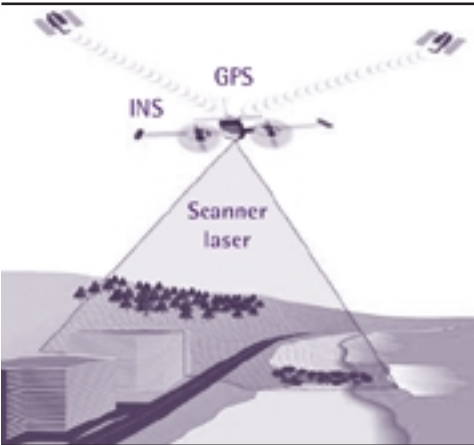


El origen del sistema es doble, por un lado se necesitaba una máquina que pudiera entrar en lugares de alta contaminación nuclear –fugas en centrales nucleares– tele-dirigido y que construyera un modelo perfecto, por ejemplo del interior del reactor. Por otro lado el ejército de USA buscaba un

vehículo militar no tripulado (carro de combate) que fuera tomando datos en tiempo del real del terreno por el que se fuera moviendo y comparándolo con la cartografía digital que transportaba, de forma que mediante inteligencia artificial, tomara decisiones sobre la ruta a seguir y lograra sobrevivir a eventuales ataques. Estos dos objetivos vinieron a dar con la idea del láser escáner.

En el caso del sistema LÍDAR aero-transportado, el modelo del suelo así formado posee un alto nivel de precisión, de forma que podemos conocer las coordenadas X,Y,Z de cualquier puntos de su superficie (figs. 8). Para ello tenemos que tener en nuestro poder las coordenadas de los puntos que el avión va recorriendo en su trayectoria de levantamiento, cosa que hoy en día es posible gracias al sistema GPS que nos da las coordenadas del punto de toma con gran precisión basándose en la posición conocido de al menos tres satélites de la constelación y a la plataforma giroestabilizada IMU que aporta la posición del punto de toma en los momentos de pérdida de señal del sistema GPS.

Figura 8  
Esquema sistema LÍDAR



## b. Fundamentos

Por tanto, con el sistema LIDAR se mide la distancia del avión (sensor) al suelo mediante un barrido continuo, conociendo el tiempo de retorno de un pulso láser (eco) basado en los principios de la MED (Medida Electrónica de Distancias).

Se necesita conocer la posición del sensor en el sistema de referencia WGS84 mediante GPS diferencial (se necesita un receptor GPS en tierra que envíe al avión correcciones diferenciales) y la orientación del sensor por la plataforma giroestabilizada IMU (Unidad de Medida Inercial) compuesta por una triada de acelerómetros y giróscopos en las direcciones de los ejes coordenados 3D. También es necesario conocer la refracción del rayo láser para aplicar las correcciones correspondientes a las distancias medidas y así tener constancia de la precisión y fiabilidad de los datos adquiridos.

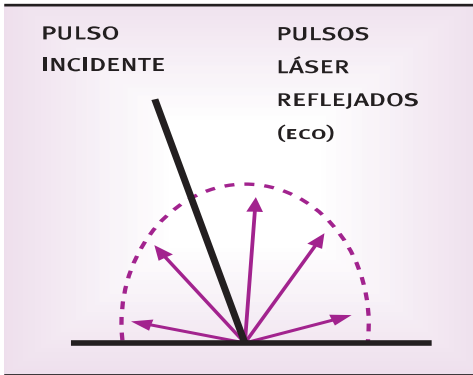
La captura del rayo láser reflejado (eco) se basa en la luz difusa reflejada en todas direcciones por los objetos:

- Sólo una mínima parte de la luz incidente vuelve al receptor.
- Materiales como el asfalto (negro) apenas refleja nada.
- Materiales de gran reflectividad (espejo) como agua en calma alejados de la vertical del avión pueden hacer que el rayo se pierda y no regrese al sensor ya que se refleja en una sola dirección.

Los múltiples reflejos de los rayos láser, cada uno con su intensidad propia se crean o generan al incidir el pulso láser en los distintos puntos de los objetos (árboles, edificios, etc...) ( Fig. 9). ecos en todas direcciones. Todas las superficies reflectoras, dentro de la huella del láser, generan la onda de retorno.

Los puntos recogidos, (patrón de escaneo del terreno), pueden conformar ó bien una red regular ó bien seguir patrones sinu-

Figura 9  
El láser incide en una superficie y se refleja en todas direcciones



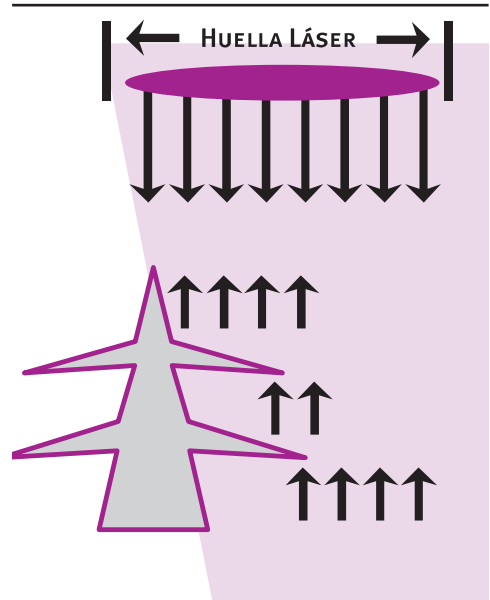
soidales. En cualquier caso no distinguen las características del terreno, es decir no definen los cambios de pendiente u otros detalles. En cualquier caso obtendríamos una “nube de puntos” con X,Y,Z, de los mismos en WGS 84.

Un análisis más sofisticado de la señal (Figs. 10) de retorno nos da información adicional

- multiples ecos
  - da la altura de árboles y objetos bajo ellos
- intensidad del eco
  - ayuda a la fotointerpretación

En la figura podemos apreciar la diferencia entre los ecos, en un terreno sin elementos verticales (suelo desnudo) tendrá un solo eco, pero si existen edificios ó vegetación, esos ecos serán múltiples, de forma que podremos discriminar entre ellos, seleccionando los que nos convengan y eliminando los otros. Por ejemplo, si seleccionamos un primer eco en un bosque tendremos la representación de las zonas más altas de la cobertura vegetal (copas de los árboles), si tomamos el 2º se nos representarán las ramas medias y si sólo el 3º, obtendremos el suelo sin cobertura vegetal.

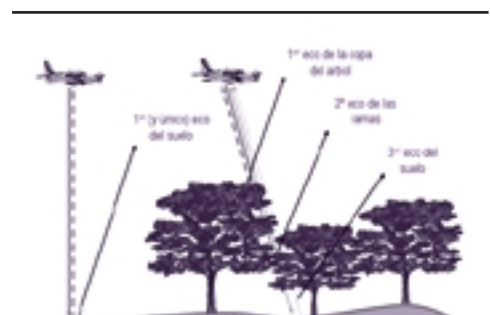
Figura 10  
Diferentes ecos producidos por un elemento vertical (árbol)



Por tanto, la imagen que nos muestra la figura 11 cómo sería la representación que se obtendría del terreno y los elementos situados sobre él.

Como hemos visto más arriba, podemos seleccionar qué eco (reflexión del rayo) nos interesa. Si seleccionamos el primer eco

Figura 11  
Obtención de ecos



(parte más alta de edificios y vegetación y el último (suelo) obtenemos un perfecto modelo digital de superficies tridimensional, con X,Y,Z de cada uno de los miles de puntos que lo componen. Sus aplicaciones, son tantas que se dejan a la libre imaginación del lector.

Aunque no sea de aplicación en catastro, es de gran importancia la aplicación hidrológica de los datos LIDAR. La aplicación de DTM's derivados de un levantamiento LIDAR (Láser escáner) produce enormes ventajas para modelizar áreas con riesgo de inundaciones. Con el fin de encontrar los requerimientos de la alta precisión que piden los hidrólogos, son necesarias cuidadosas aplicaciones de tecnología avanzada en el campo de los DTM. Hay que considerar, especialmente los siguientes puntos:

- Datos de escáner láser aerotransportados y georreferenciados.
- Interpolación de DTM's teniendo en consideración la información de las líneas de ruptura, extraídas automáticamente de los datos del láser escáner por medio de algoritmos matemáticos.
- Modelos derivados de edificios y de vegetación, que sirven para tomar en consideración superficies rugosas influenciadas por la "escorrentía" evitando así que existan datos que falseen la información hidrológica.
- Precisión de las cotas obtenidas de los DTM del escáner láser y precisión en la posición de los límites de las áreas inundadas, que fueron predichos por las riadas.

Uno de los productos más importantes es la previsión de áreas inundadas en caso de crecida para evitar daños humanos y materiales con la suficiente antelación.

Valiéndose de la gran precisión del sistema LIDAR, tanto en planimetría como en altimetría, se puede incluso determinar la profundidad del agua en las zonas inundadas (curvas batimétricas) (K.Kraus 2002).

### c. Precisión del sistema LIDAR

Fuentes del error posicional (x,y,z).

Las principales fuentes del error posicional en el proceso de toma de datos de LIDAR están asociadas con:

1. El equipo GPS a bordo del avión, para definir las coordenadas del punto de cada toma.
2. La unidad de navegación inercial (IMU) para estimar la posición entre los puntos fijos de GPS (puede ser un desplazamiento largo).
3. La unidad de medida inercial (IMU) para monitorizar la dirección en la que apunta el láser.

En líneas generales, el error horizontal (x,y) es mucho mayor que el error vertical (z). Valorar la precisión horizontal de las observaciones lidar es problemático. La mayoría de los láser usados en los sensores comerciales de lidar son similares y tienen una divergencia (diámetro de la base del cono que forma cada rayo láser) de entre 0.2 a 0.33 m. Esta divergencia en lo que respecta al ángulo de escáner y altura de vuelo define la huella (footprint) del lidar (típicamente entre 0.24 a 0.60 m.). Las huellas pequeñas son más adecuadas para pasar entre huecos de la cubierta vegetal.

- Cómo clasificar los errores en los puntos lidar

Un pulso lidar sencillo es emitido hacia una superficie (terreno) alrededor de 10.000 a 70.000 veces por segundo. La mayoría de los sensores lidar graban la energía devuelta en forma de onda de múltiples pulsos. Entonces sólo se identifican algunos retornos (por ejemplo 4 ó 5). En algunos casos la magnitud del pulso también se graba (*intensidad*). A partir de este grupo de retornos de lidar se usan métodos automáticos y manuales para identificar ó



etiquetar cada retorno como un retorno “de suelo”, ó de “vegetación”, ó “de edificio”, u otro. Mediante este proceso se puede eliminar la capa que se desee para filtrar información. Un operador humano analizará el grupo de candidatos de retornos de suelo para mejorar la precisión de la catalogación de puntos. El analista humano visualizará áreas pequeñas como una nube tridimensional de puntos lidar superpuesta a una ortofoto digital. Así, el proceso de etiquetado se va adaptando de forma local y subjetiva.

- Fuentes cartográficas de error

Una característica bien conocida del error de las cotas observadas para la cartografía del terreno es la relación con la pendiente del mismo (*Maling 1989*). El máximo valor del error de elevación es una función de la pendiente del terreno.

Por ejemplo, el error de cota introducido para un punto con 100 cm. de error horizontal en una pendiente de un 10 % puede aumentar a +/- 18 cm.

Algunos estudios anteriores en cartografía topográfica han demostrado la relación entre la densidad de puntos observados y la precisión del DEM derivado. Cuando la densidad de puntos observados crece, la precisión del DEM resultante también crece.

- Valoraciones empíricas de los errores lidar. Resumen de fuentes de error.

Los modelos digitales de elevaciones (DEM) producidos a partir de observaciones lidar, se crean desde retornos de los rayos láser desde el suelo. Estas cotas de “suelo” derivadas de lidar, contienen errores de tres fuentes:

- Errores de cota del sistema de medida del sensor.

- Errores horizontales del sistema de medida del sensor.
- Errores del proceso de etiquetado procedente de identificar un retorno de “suelo” confundiendo con otro tipo de retorno (parte superior de la cubierta vegetal, vegetación intermedia, tejados de edificios...).

El estado de Carolina del Norte, está recogiendo actualmente datos lidar aerotransportados para cartografiar su territorio. Los datos lidar se recogieron con un espaciamiento de 4.5 m. La precisión vertical para sus datos es de 20 cm. para condados costeros, compuestos principalmente por terreno llano y de 25 cm. para condados del interior, compuestos por terreno ondulado con colinas. Para estas zonas de Carolina del Norte, la precisión total basada en el 95% RMSE (error medio cuadrático) calculado, fue de 15,15 cm. en cota.

La peculiaridad de este estudio era que los datos lidar se tomaron en condiciones de árboles con hojas (verano). Este estudio encontró que la precisión era significativamente diferente en función de las coberturas de suelo. El error en cota con los datos lidar alcanzó desde los 33 cm. (hierba corta) hasta los 153 cm. con matorral.

El error en la medida de la cota de un punto lidar es de carácter acumulativo producido por varios factores. El error horizontal es una función de los mismo factores pero a menudo dominados por la altura de vuelo. El error horizontal a menudo se cuantifica en 1/1.000 de la altura de vuelo sobre el suelo. Es decir si se vuela a una altura ordinaria de 3.300 pies (1.000 m.) El error de posición en planimetría (x,y) puede oscilar alrededor de 100 cm. El error horizontal introducirá errores de elevación adicionales

La comprobación de resultados consistió en comparar los puntos lidar obtenidos con los mismo puntos, pero levantados topográficamente en el terreno mediante GPS de alta precisión. Basándose en el error obser-

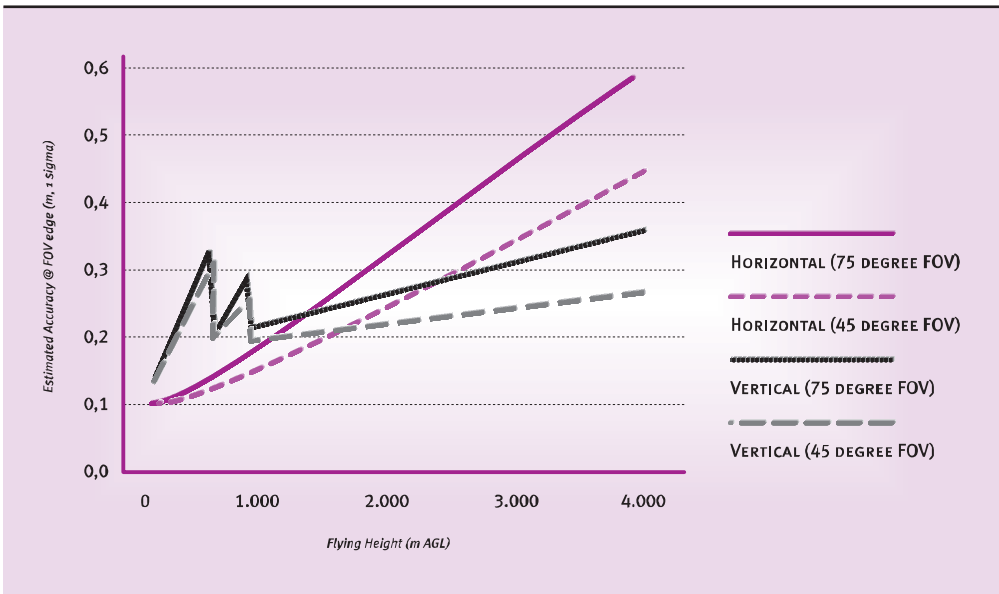
vado de los puntos lidar levantados topográficamente, el error para todos el conjunto de datos fue de 21.1 cm. (RMSE) en planimetría. El error de cota (RMSE) va de 17,2 a 25.9 cm entre las diferentes categorías de usos del suelo. Los errores más bajos se observaron en puntos bajo el bosque de hoja perenne, pavimento y hierba alta. El bosque de hoja caduca y los arbustos y árboles bajos mostraron los errores más altos(de 25,9 a 23.3 cm respectivamente).

En la actualidad los equipos han mejorado mucho y en la figura 12 se pueden

apreciar los errores en función de la altura de vuelo, y del FOV (Field of View) del sistema. [FOV es el ángulo de abertura del barrido del terreno]

En resumen, los errores vienen muy influenciados por los componentes del sistema de posicionamiento. El error GPS es relativamente constante en toda la operación. Los errores de IMU y codificador angular aumentan con la altura de vuelo y la divergencia respecto a la vertical. En breve se podrán obtener precisiones X,Y,Z con un RMSE mejores que 10 cm.

Figura 12  
Errores verticales y horizontales en función del campo de visión del LÍDAR



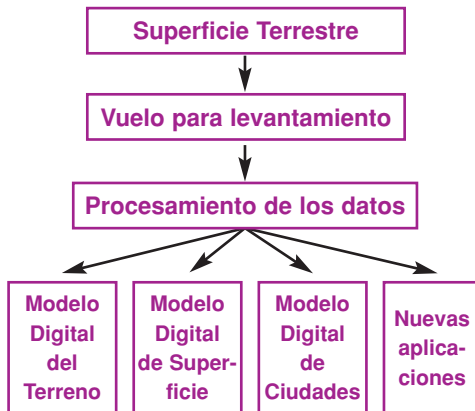
d. Generación de Modelos Digitales de Elevaciones (DEM). Métodos convencionales

- Superficie terrestre. Todo tipo de formas de estructuras y vegetación, objetos artificiales (puentes, carreteras, etc...), superficies temporales.

- Definición del modelo. Aquellas partes de la superficie terrestre que tienen que ser representadas en el modelo. Abstracción, idealización de la superficie terrestre. Paso de la superficie física a la superficie matemática.

- **Topografía.** Medición de puntos discretos y estructuras lineales que definen la superficie del modelo.
- **Modelo Digital de Elevaciones.** Descripción matemática de la superficie que define el modelo, mediante puntos discretos, estructuras lineales y algoritmos de interpolación apropiados a partir de modelos fotogramétricos 3D formados en aparatos restituidores.

#### e. Generación de Modelos Digitales del Terreno por LIDAR



#### f. Modelos Digitales de Ciudades (Modelos Urbanos)

Los modelos digitales de ciudades son uno de los productos directos LIDAR de gran aplicación en los catastros. Facilitan, gracias a la gran precisión de lidar combinado con algoritmos matemáticos de reconocimientos de formas, planos de ciudades en tres dimensiones de rigurosa precisión plani-altimétrica. Bien es verdad que es un producto no económico debido a que la edición humana es hoy por hoy todavía necesaria, pero en breve irá disminuyendo.

Con este sistema, se obtienen, a partir de un vuelo, gran densidad de puntos

(varios millones) en muy poco tiempo, con una gran precisión en XYZ (10-15 cm). Además tienen muy poca importancia la sensibilidad a condiciones de iluminación (día y noche) y ambientales (calima, humo, etc.) y es de rápida obtención.

Se pueden determinar tanto la altura de edificios (volumetría con poca o nula revisión de campo) y de vegetación gracias a los múltiples ecos. Se puede obtener una clasificación de usos del suelo trabajando con el parámetro “intensidad” que proporciona el sistema y por último se puede combinar con una cámara digital de pequeño formato para obtener ortofotos (más con fines de fotointerpretación que métricos). Por tanto el LIDAR puede sustituir a la Fotogrametría convencional en aquellas aplicaciones que requieren gran precisión con un esfuerzo inferior al requerido en Fotogrametría clásica sobre todo en zonas limitadas, dada la gran cantidad de puntos medidos. Este es el caso de los modelos urbanos, pero también de cuencas hidrográficas y áreas inundables, costas, gestión de obras lineales y corredores y evaluación de daños en desastres.

Además ofrece alguna posibilidad de utilización en aplicaciones fuera del alcance de la Fotogrametría, ya que gracias a la capacidad multi-eco (o multirretorno) permite determinar la altura de objetos que no cubren totalmente el suelo sobre el que están situados (determinados tipos de láser (verde) pueden penetrar varios metros en el agua). Por ello puede ofrecer grandes beneficios en el tema forestal (altura de árboles y MDT en zonas de árboles con hojas) y en líneas de alta tensión (modelización de catenarias).

#### g. Postproceso de los datos LIDAR

Una vez obtenidos los datos de retorno a partir de las emisiones de láser, hay que realizar una serie de operaciones en gabinete con esa ingente cantidad de información de forma que las fases del postproceso son:

- Proceso de datos GPS/INS: Determinación de posición y ángulos de actitud del avión.
- Obtención de nube de puntos XYZ.
- Filtrado y clasificación.
- Obtención de datos en formatos estándar.

El principal problema que presenta el postproceso de datos LIDAR es el gran volumen de puntos a manejar (10-100 millones de puntos). Se requiere filtrar la nube de puntos para poder pasar a un sistema CAD, aquí es necesaria la intervención humana para evitar errores y repeticiones.

#### h. Situación actual del mercado LIDAR en el mundo

En la actualidad sólo existen dos fabricantes comerciales: Leica Geosystems y Optech. Existen, eso sí, fabricantes artesanales que manufacturan equipos para uso propio o alquiler y servicios. Optech fue el primer fabricante en serie por lo tanto es el extendido, pero con el ritmo actual de ventas, Leica Geosystems igualará la cuota de Optech en poco tiempo. más de un año. En cuanto a equipos funcionando, han pasado, en todo el mundo de 41 en el año 2.000 a 110 en los principios del 2.005.

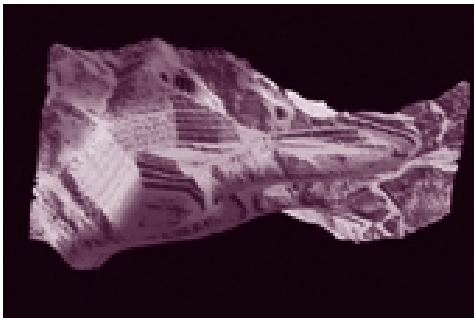


Figura 13. Estudio volumétrico de mina a cielo abierto.

#### **Métodos de producción de ortofotos digitales y ortofotos verdaderas (true-ortho) y su aplicación en el catastro**

La acepción de true-ortho (ortofoto verdadera (O.V.)) enfatiza el concepto anterior de ortoimagen y se asigna a la *ortoimagen que representa toda su imagen en proyección ortogonal*. Este concepto es utópico puesto que siempre existen pequeños objetos (árboles, arbustos, farolas, etc...) o grandes edificios, vegetación e infraestructura (puentes) que no están correctamente modelados ni cartografiados. En la práctica, las ortoimágenes convencionales presentan desplazados (en dirección radial) las imágenes de los objetos excluidos del modelo, mientras que las O.V. corrigen adicionalmente la situación de los objetos grandes, tanto artificiales como naturales (vegetación) (J. L. Lerma 2002).

Por tanto la O.V. se presenta como un nuevo sistema, revolucionario y preciso, para elaborar Cartografía Catastral Urbana con plenas garantías de capturar toda la información interesante para los fines del Catastro –precisión planimétrica, volumetría de edificios, actualización rápida, etc...–.

Hasta ahora las ortos de gran escala (500, 1000 y 2000) de ciudades han usado MDT's así como algoritmos y procedimientos estándar que producen los siguientes problemas:

1. Desplazamientos y ocultamientos que hacen difícil sobreimponer información vectorial para propósitos de actualización de cartografía.
2. La ortorrectificación es parcialmente imprecisa geoméricamente y/o incompleta (los edificios se distorsionan y se mueven de su localización verdadera debido a que no están modelados en el DTM).

Usando Modelos Digitales de Superficie (MDS) y considerando áreas ocultas es posible generar O.V. que no tengan los pro-



Figura 14. Imagen Izqda. Ortofoto tradicional. Es visible la fachada del edificio y la perspectiva hace que se oculte la calle opuesta. Imagen Dcha. Ortofoto verdadera, no se ven las fachadas y sí las calles

blemas mencionados. Como vimos, un primer paso, en el campo de la ortoproyección digital fue el uso de MDT (Modelos Digitales del Terreno) para generar ortos, pero el problema era que los MDT modelan la superficie del terreno sin objetos humanos.

La clave es utilizar Modelos Digitales de Superficies (MDS's), es decir un MDT pero con la captura de los datos que representen todos los objetos que hay sobre él, sean humanos (edificios, carreteras, puentes, etc...) ó naturales (vegetación). Las ortofotos generadas con estos modelos superan las anteriores deficiencias que surjan los siguientes problemas:

- a. Las ocultaciones que ocurren en las imágenes simples se tienen que rellenar con la combinación de la información situada en varias ortos adyacentes. Pero a menudo *no todas las áreas ocultas se pueden completar* por falta de recubrimientos.
- b. Los tejados tienen que ser modelados de la forma correcta, ya que de otra forma están distorsionados en las ortofotos o se muestran con bordes dentados. Modelar todo tipo de tejados con precisión y en detalle, puede

ser complicado si el cálculo es automático ó se dispone de poco tiempo.

#### a. Generación de ortofotos verdaderas

La generación de true ortos tiene que considerar la proyección ortogonal con un MDS, la detección de áreas ocultas y el relleno de las mismas se hará tomando las partes de imagen perdidas de las ortos conlindantes.

##### a.1. Proyección ortogonal con MDS

Partiendo de la base que la imagen fuente está correctamente georreferenciada, la ortoproyección es tan precisa como el modelo de superficie (MDT) que tiene debajo. Lo importante es contar un buen MDS, si es así, los objetos humanos serán proyectados a su verdadera posición geométrica. Veamos el esquema de la ortoproyección con un MDS (Fig. 15), que es una proyección ortogonal.

El problema es que las áreas ocultas por los objetos humanos no son visibles en la imagen. En la figura 16 el tejado del edificio también cubre el área de ocultación en la

imagen aérea original. Si tales áreas no son detectadas por el software de rectificación la ortoproyección la rellenará exactamente con contenido de la imagen, pero de la misma imagen. Esto entonces crea el llamado “efecto fantasma (*ghosting effect*)”. La ortofoto de la figura 17 muestra tal efecto. Podemos apreciar esa duplicación en todos los edificios altos imagen central, aparece la cumbrera del edificio sin realizar en él la rectificación y simultáneamente la rectificada.

### a.2. Detección de áreas ocultas

Con el fin de superar tales efectos fantasma hay que detectar las áreas ocultas. Esto se hace considerando la línea de vista desde el centro de proyección a un punto específico del objeto del MDS. Con una imagen fuente y un MDS es posible marcar las áreas de ocultación en la ortofoto.

### a.3. Relleno de las áreas ocultas

Combinando información de la imagen original con otra obtenida de varias imágenes fuente adyacentes, es posible rellenar las áreas ocultas.

Con un MDS e imágenes fuente con recubrimiento desde diferentes vistas (por ejemplo un bloque de imágenes aéreas) uno puede generar ortofotos con recubrimiento y obtener las zonas ocultas en una desde las otras. Fusionando las áreas con recubrimiento, todas las partes de esas áreas que sean visibles en una de las ortofotos se pueden rellenar con información real de la imagen. Este proceso debe ser muy inteligente ya que se han de considerar todas las imágenes con sus diferentes radiometrías (intensidades luminosas), las líneas de costura (uniones de las “piezas del puzzle”) se tienen que encontrar y disimular automáticamente y las ortofotos se tienen que fusionar de forma que más tarde no sea posible ver que el conjunto final está formado por

Figura 15  
Esquema de proyección true-ortho con un MDS

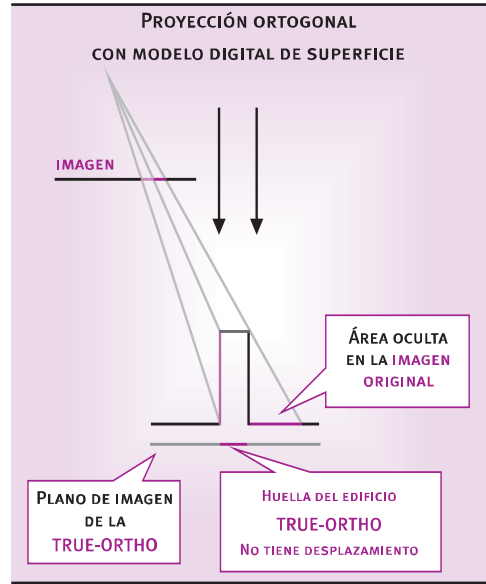
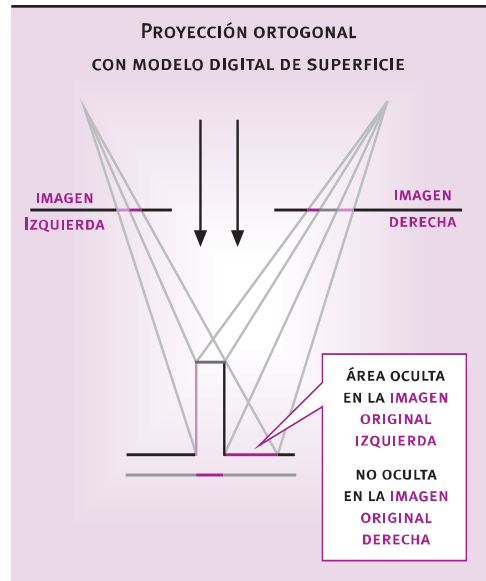


Figura 16  
Área de ocultación en imagen izqda. Se puede rellenar usando contenidos de imagen dcha.



contenidos que provienen de varias imágenes. De otra forma el mosaico parecería un tapiz hecho de recortes.

Una ortofoto basada en un DSM y con las áreas ocultas reemplazadas (fusionadas)

es conocido como “Ortofoto verdadera”. Es “verdadera” debido a que los objetos humanos son verdaderamente proyectados (edificios) en la dirección paralela y perpendicular sobre el plano de la ortofoto

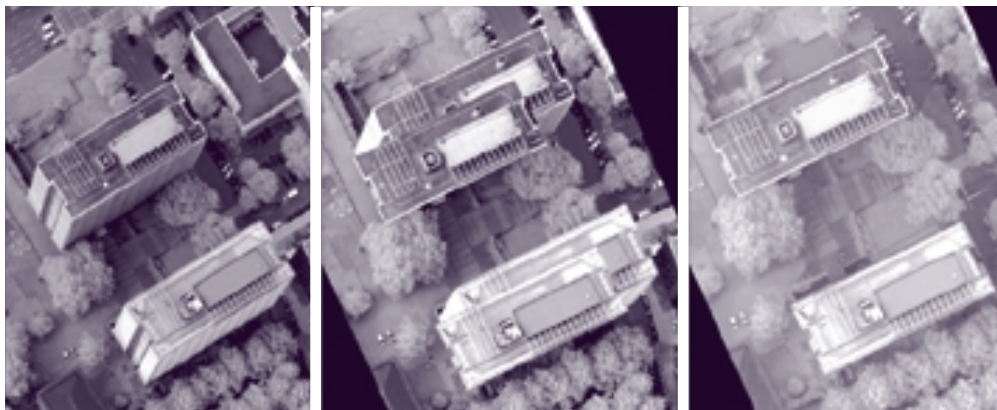


Figura 17. Izquierda. - Orto convencional (Existen zonas ocultas). Centro.- Paso intermedio (se aprecia el “efecto fantasma”). Derecha.- Orto verdadera ya corregida (áreas ocultas rellenas con información de ortos adyacentes)

En la imagen derecha (Fig. 17) podemos apreciar que los edificios se representan con una proyección perfectamente ortogonal (no se ven sus fachadas ni están distorsionados ni dejan áreas ocultas). Las áreas que antes estaban ocultas ahora están completamente cubiertas con información real obtenida de las imágenes adyacentes.

y no deja zonas ocultas además de conservar los edificios una proyección perfectamente ortogonal.

## Conclusiones

Como hemos visto, la ortofoto sigue siendo una gran herramienta para los usos catastrales en el ámbito rústico. La irrupción de la ortofoto verdadera en combinación con el sistema LÍDAR, puede suponer que esta técnica entre de forma definitiva también en el ámbito urbano. La información que suministra una ortofoto verdadera (Fig. 18), es infinitamente más rica que la de la cartografía convencional



Figura 18. Ortofoto verdadera de área central de una ciudad

El modelo digital de ciudad que es necesario para la elaboración de O.V. se puede obtener con gran facilidad gracias a la tecnología LÍDAR que suministra una ingente cantidad de puntos con coordenadas X,Y,Z de alta precisión. Por tanto tendremos la información altimétrica necesaria para describir la volumetría de los edificios (además de vegetación, mobiliario urbano, etc...). Pudiéndose utilizar, tras la edición correspondiente para conocer con precisión los edificios, como inventario y multitud de otras aplicaciones.

### **Bibliografía**

JOSEF BRAUN, INPHO GMBH, Stuttgart, *Aspects on True-Orthophoto Production* (2003).

MIKAEL HOLM, Espoo, *An integrated approach for orthoimage production* (2003).

GIS/LIDAR/Survey: LIDAR. [www.Merrick.com/servicelines/gis](http://www.Merrick.com/servicelines/gis) (2004).

UWE LOHR, Toposys, Ravensburg, *Precise LIDAR DEM and True Ortho Photos* (2002).

KARL KRAUS, Vienna University of Technology. *LaserScan DTMs for Modeling Flood Risk Areas*(2002).

LERMA GARCÍA, J. LUIS, Universidad Politécnica de Valencia. *Fotogrametría moderna; Analítica y Digital* (2002).

UWE LOHR, Toposys, Ravensburg & MAX EIBERT, Friedrichshafen. *The Toposys Laser Scanner-System* (2002).

TODD A. STENNETT, Airborne 1 Corporation, Michigan USA. *Lidar: Strap in Tight and prepare to go vertical* (2004).

GÓMEZ, ALFONSO. Stereocarto España. *Proceso digital en fotogrametría* (2000)

MICHAEL E. HODGSON & PATRICK BRESNAHAN. University of South Carolina. *Accuracy of airborne Lidar-Derived elevation: Empirical Assessment and error budget.* (2003) ■