

# **Cámaras fotogramétricas digitales, altímetros láser y captadores hiperspectrales: una nueva generación de sensores aerotransportados para la geoinformación**

José-Luis Colomer Alberich  
Institut Cartogràfic de Catalunya  
08038 Barcelona - España

## **Resumen**

La exigencia de disponer de geoinformación actualizada, en el momento preciso, y a costes razonables, es fundamental para los procesos de toma de decisiones o para establecer sistemas sostenibles de observación y control del territorio, y ha propiciado el desarrollo de una nueva generación de sensores de observación remota de la tierra desde aeronaves y satélites. En combinación con sistemas GPS e inerciales de orientación directa, dichos sensores permiten capturar datos de forma eficaz, a la vez que combinarlos con otros de forma sinérgica para mejorar los métodos automáticos necesarios para la generación de información en intervalos de tiempo adecuados.

La ponencia presenta las experiencias del Institut Cartogràfic de Catalunya en el uso de una cámara fotogramétrica digital, un altímetro láser y un captador hiperspectral aerotransportado desde el punto de vista de las posibles utilizaciones para la generación de geoinformación.

## **Abstract**

The request for updated geoinformation at reasonable cost has grown for just in time decision making processes for establishing sustainable monitoring systems have fostered the development of a new generation of Earth observation satellite and airborne sensors. In combination with GPS and INS direct orientation devices, these sensors make possible to capture of data efficiently and to combine them together synergistically so to improve the automatic processes required for the generation of information in a timely manner.

The paper presents the experiences of the Institut Cartogràfic de Catalunya using a digital photogrammetric camera, a laser altimeter and an airborne hyperspectral scanner from the point of view of the applications.

## **1. Introducción**

En los últimos años, la demanda de geoinformación ha crecido exponencialmente impulsada por los Sistemas de Información Geográficos, las aplicaciones de localización basadas en las tecnologías de la comunicación, y las aplicaciones orientadas a la protección del medio ambiente y a la prevención y mitigación de riesgos naturales. Al mismo tiempo, ha aumentado muy significativamente la demanda de geoinformación actualizada y en el momento justo para facilitar la toma de decisiones, y todo ello a costes razonables para facilitar el establecimiento de sistemas sostenibles de observación y control del territorio.

Dichos requerimientos han propiciado el desarrollo de una nueva generación de sensores de observación remota de la tierra instalados en aeronaves y satélites. En combinación con los instrumentos necesarios para conocer su orientación directa, dichos sensores permiten capturar datos de forma eficaz, a la vez que combinarlos entre sí para hacer más fiables y robustos los métodos automáticos imprescindibles para la generación de geoinformación en intervalos de tiempo adecuados.

La ponencia presenta las experiencias del Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) en la operación y uso de dichos sensores desde el punto de vista a las aplicaciones posibles. En el primer capítulo, se describe brevemente la cámara fotogramétrica digital DMC y los resultados de las pruebas de aceptación de

dicho sistema. En el segundo, se describen una serie de aplicaciones derivadas de datos tomados con el altímetro láser ALTM 3025 y finalmente, en el tercero, se habla de aplicaciones del captador hiperespectral *Casi*. Cierra el artículo un comentario breve de las posibilidades de combinar datos de dichos sensores para la extracción de geoinformación.

## 1. La cámara digital

A finales de 2004 el ICC adquirió una primera cámara digital DMC de la compañía Z/I Imaging para iniciar la sustitución paulatina de las cámaras analógicas RC30 y RMK TOP con las que ha operado en los últimos años. Con la adquisición de dicho sensor, el ICC reemplaza la última pieza analógica en sus cadenas de producción de fotogrametría por tecnología completamente digital.

Además de una mejor integración con las cadenas de producción digitales ya existentes gracias a la eliminación de pasos de trabajo analógicos, el uso de una cámara digital redonda en un aumento demostrable de calidad radiométrica debido a la mejor relación señal/ruido y a los 12 bits de resolución radiométrica por cada píxel de la imagen (Figura 1). Al mismo tiempo, se consigue un notable ahorro de tiempo y dinero gracias a la eliminación de las fases de revelado y el escaneado de la película, y al aumento de las horas de vuelo por día y de los días útiles de vuelo por año.



Fig 1. Comparación de dos fotografías de la misma escena, tomadas simultáneamente durante el mismo vuelo con una cámara RC30 (izquierda) y DMC (derecha) durante los vuelos de aceptación en Diciembre del 2004. Nótese el aumento de la nitidez de la imagen digital y la práctica ausencia de ruido. La imagen digital es de 8 bits.

### 1.1. Breve descripción de la cámara DMC

La cámara DMC usa CCDs de matriz de 12 micras de tamaño y 12 bits de resolución radiométrica. Consta de 8 cabezales montadas de forma ligeramente convergente (Figura 2), 4 cabezales para imágenes pancromáticas de alta resolución de 7K x 4K píxeles con focal de 120 mm y 4 cabezales para imágenes RGB e infrarrojo cercano (NIR) de 2K x 3K píxeles con focal de 25 mm. La cámara compensa el efecto del movimiento de avance del avión electrónicamente. La velocidad de toma es de 0,5 imágenes/segundo y la capacidad de almacenamiento de 840 GB, suficiente para 2100 tomas.

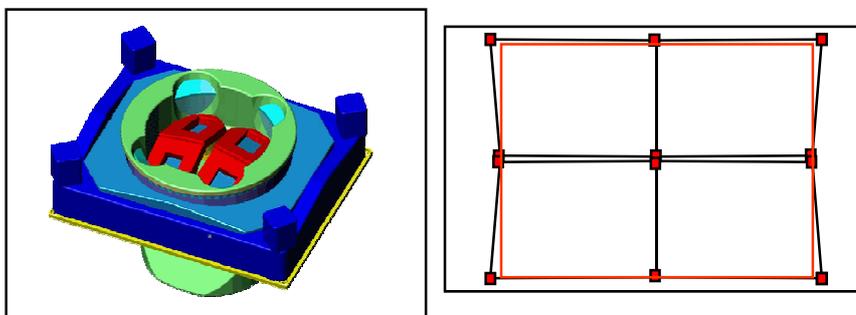


Fig 2. Carcasa de montaje de los cabezales de la DMC (izquierda). El montaje ligeramente convergente genera imágenes no rectangulares y con solape entre las imágenes de cada cabezal (derecha).

La instalación de la cámara digital en las aeronaves es idéntica a la de las cámaras tradicionales, e incluso puede aprovecharse la misma plataforma de estabilización y usar el mismo sistema de navegación que se utilizan para las misiones fotográficas analógicas. El ICC usa el sistema de navegación CCNS-IV de la compañía alemana IGI y una plataforma estabilizada Zeiss T-AS.

Una vez finalizada la toma de imágenes, hay que procesarlas para su posterior explotación. En este post-proceso se corrigen píxeles defectuosos, se normaliza la imagen radiométricamente, se corrigen deformaciones provocadas por distorsiones de las lentes, y se ensamblan las cuatro imágenes pancromáticas en una única imagen en blanco y negro de alta resolución. Dicho ensamblaje, totalmente automático, se basa en la identificación puntos en las áreas de solape. Con las imágenes de los 4 cabezales pancromáticos de alta resolución se sintetiza una imagen de 13824 x 7680 píxeles, que puede usarse para convertir las imágenes RGB e infrarrojo color (IRC) de baja resolución en imágenes de alta resolución en un proceso de mejora de imagen conocido como “*pan sharpening*” y que es el mismo que se utiliza para las imágenes de satélite. El proceso se describe someramente en la figura 3.

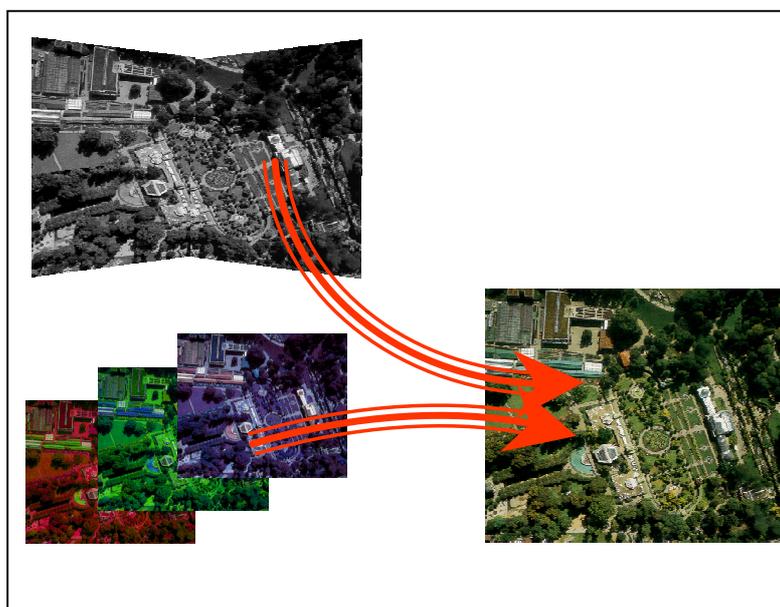


Fig. 3: Generación de una imagen en color de alta resolución mediante el ensamblaje de una imagen pancromática (arriba a la izquierda) y la fusión de las bandas color de baja resolución con la pancromática de alta resolución.

Dependiendo de la configuración informática, el tiempo de proceso varía entre 4 y 5 minutos por imagen. En este post-proceso se pueden seleccionar las fotografías o pasadas que interesen y definir el formato de salida de las imágenes (TIFF, JPEG o JPEG 2000), la generación o no de pirámides de imagen, el factor de compresión y cualquier información adicional que pueda resultar de utilidad.

### 1.2. Los resultados de las pruebas de aceptación de la cámara

Para la aceptación de la cámara, el ICC realizó pruebas de resolución, de precisión geométrica, de generación automática de elevaciones y de restitución con vuelos simultáneos en el mismo avión con la cámara DMC y una RC30. Los resultados y una discusión completa pueden encontrarse en (Alamús 2005). Las principales conclusiones de dicho estudio son:

- Resolución: del orden de dos veces la de una foto aérea analógica escaneada a 15 micras
- Precisión de la medida: ha pasado de  $\frac{1}{4}$  de píxel en la RC30 a  $\frac{1}{10}$  de píxel en la DMC
- Precisión en la generación automática de elevaciones: menor que la precisión de un foto aérea (35%) debido a la peor relación base/altura (la mitad) para el mismo solapamiento
- Ruido: del orden de  $\frac{1}{10}$  de el de una foto aérea analógica escaneada a 15 micras (Kölbl 2005)

En resumen, la cámara digital DMC mejora notablemente aspectos críticos de un flujo fotogramétrico gracias a la mejor radiometría de las imágenes digitales, mientras que mantiene precisiones comparables a las cámaras fotogramétricas analógicas. Los procesos automáticos de correlación son los

más beneficiados de dicha mejora radiométrica. Vistos los resultados, la cámara fue declarada apta para la producción y en estos momentos está en operación en proyectos ortofotográficos y de restitución.

### 1.3. Nuevos productos

Como se ha visto, en un mismo vuelo pueden obtenerse productos diferentes: blanco/negro, color e infrarrojo color de alta resolución, y color e infrarrojo color de baja resolución, y todos ellos a 12 o 8 bits por píxel. La geometría de las imágenes es cónica con lo cual son directamente utilizables en todos los sistemas fotogramétricos digitales. Los primeros productos entregados por el ICC continúan siendo de 8 bits a pesar de que las cadenas de producción estén preparadas para utilizar los 12 bits en todos los pasos de trabajo y convertir de 12 a 8 bits antes de la entrega en vez de realizar dicha conversión durante el post-proceso. Tampoco se ha empezado a distribuir el producto infrarrojo color, aunque ya se intuye que dicho producto será de gran interés para aplicaciones forestales y agrícolas.

## 2. Altimetro láser

En el 2001 el ICC adquirió el sistema de barrido láser aerotransportado (lidar) Optech ALTM 3025E, que entró en producción en febrero de 2002. Se trata de un sensor activo aerotransportado que barre el terreno con pulsos láser y obtiene la distancia (el rango) a cualquier objeto del terreno midiendo el tiempo de retorno del pulso emitido (Fig. 4). Dado que se conoce la posición, altura y orientación instantánea exacta del sistema a partir de las medidas del GPS y del sistema inercial (INS) que van instalados solidariamente con el lidar, se pueden derivar con precisión las alturas del terreno.

Un lidar mide la altura sobre el terreno y también de los objetos sobre del terreno (pe. edificios). En el caso de la vegetación no muy densa, algunos puntos rebotan en la copa y algunos alcanzan el suelo (figura 5). Estos últimos sirven de base para generar el modelo de elevaciones del terreno (MET). Con los primeros, se construye el modelo de elevaciones de la superficie (MES). El proceso por el que se calcula el MET eliminando los objetos encima de la superficie de terreno se conoce como filtrado.

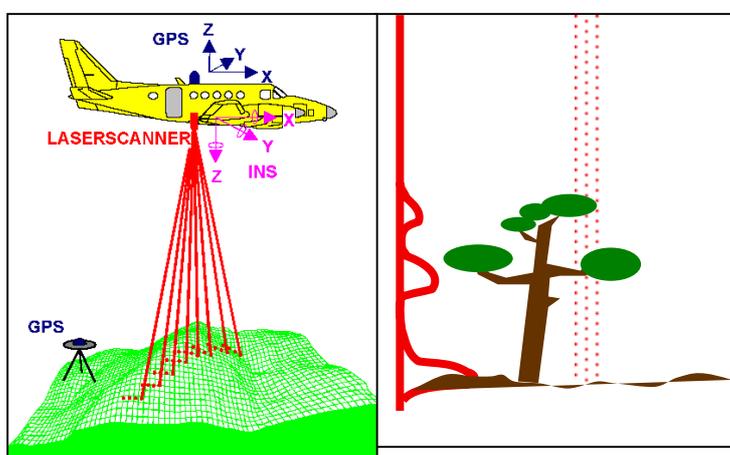


Fig. 4 Sistema de barrido láser

Fig.5 Medida de diferentes alturas a partir del primer y último rebote

El sistema del ICC es capaz de emitir 25 000 puntos por segundo y registrar el tiempo de llegada del primer y último rebote. El sistema opera a una altura de entre 550 y 3 000 metros sobre el terreno. Dado que el lidar es un sensor activo que ilumina el terreno con su propia fuente de energía, puede operar independientemente de las condiciones de iluminación. En otras palabras, pueden efectuarse misiones durante la noche. Una misión lidar tiene muchas similitudes con una misión fotogramétrica – existe el concepto de pasadas y solape entre ellas – y se realiza con los mismos sistemas de planificación de vuelo. También se emplea software de ajuste de las pasadas para minimizar errores sistemáticos. Los resultados que se alcanzan en condiciones normales tienen una precisión a 10 a 15 cm en sobre terrenos llanos. A continuación se dan ejemplos de aplicaciones de producción y de proyectos piloto del ICC.

## 2.1. Generación de modelos del terreno

Un uso muy característico es la delimitación de espacios de riesgo de inundación (figura 6). En este caso, el lidar proporciona el MET para los modelos hidráulicos que calculan zonas de probable inundación en periodos de 50, 100 y 500 años. Según la Ley de Urbanismo vigente, dichas áreas son no edificables a todos los efectos.

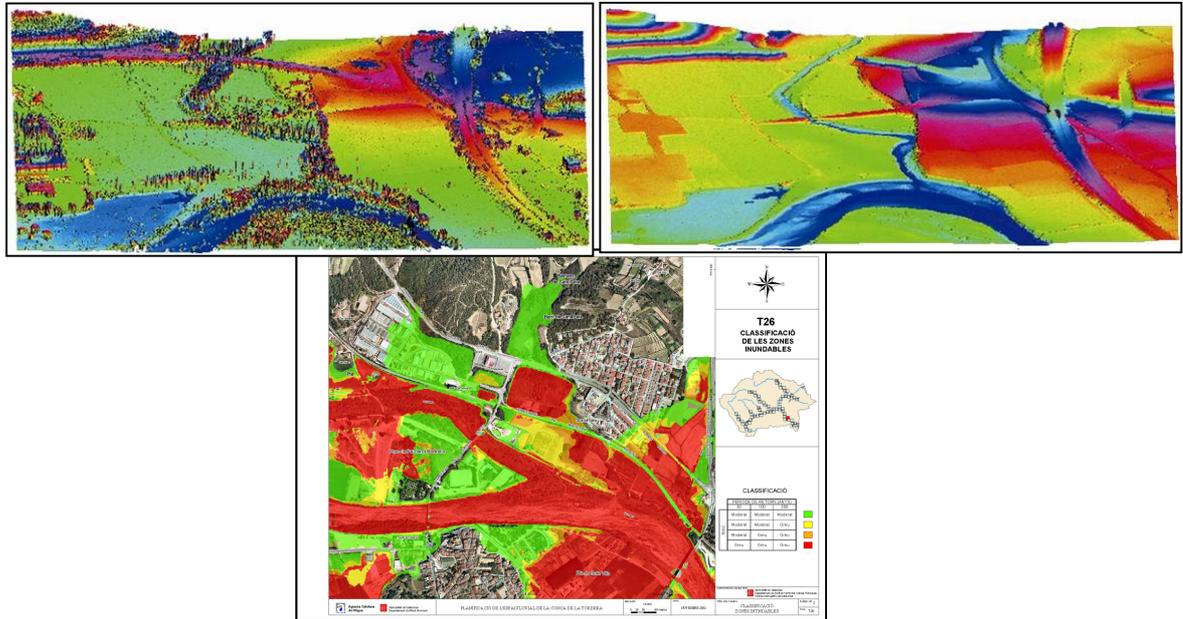


Fig 6. Modelo digital de la superficie (izquierda) y modelo digital del terreno (derecha) obtenido del primero mediante filtrado. La probabilidad de inundación (imagen inferior) se calcula a partir del MET

## 2.2. Cartografía de líneas eléctricas.

Esta aplicación permite delinear los cables de una línea eléctrica a partir de los puntos lidar correspondientes a rebotes sobre ellos (figura 7). También se obtienen puntos en el suelo y en la vegetación. El resultado es una cartografía sobre la que establecer distancias mínimas de los cables a la vegetación, a los edificios y al terreno.

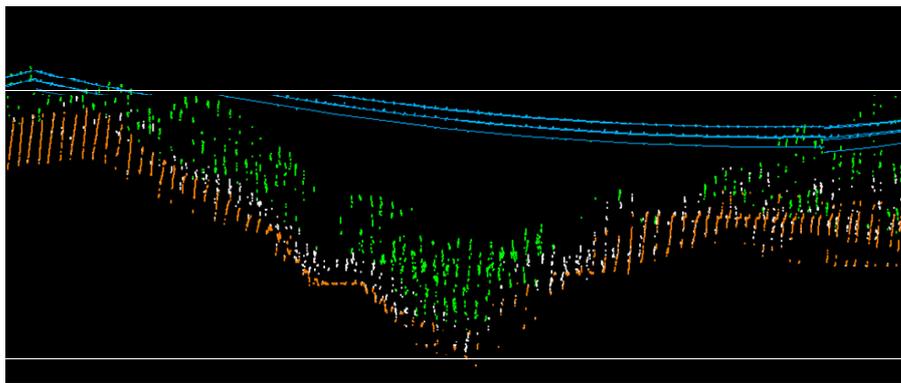


Fig 7: catenaria de una línea eléctrica. Como puede observarse, en los dos extremos de la figura la catenaria entra en contacto con la vegetación, con el consiguiente peligro de incendio

## 2.3. Monitoreo de costas

Se estudiaron los cambios ocurridos en la playa del Bogatell (Barcelona) entre el 17 de abril de 2002 (después de una gran tormenta), y el 23 de julio del mismo año, después de la regeneración mediante aporte de arena (figura 8). Analizando las diferencias, se llegó a calcular que el volumen de arena añadido

fue de 23.884 m<sup>3</sup>, y el volumen de arena cambiado de sitio, de 4.320 m<sup>3</sup>. En base a estos resultados, se han programado campañas bianuales sistemáticas sobre la costa catalana.

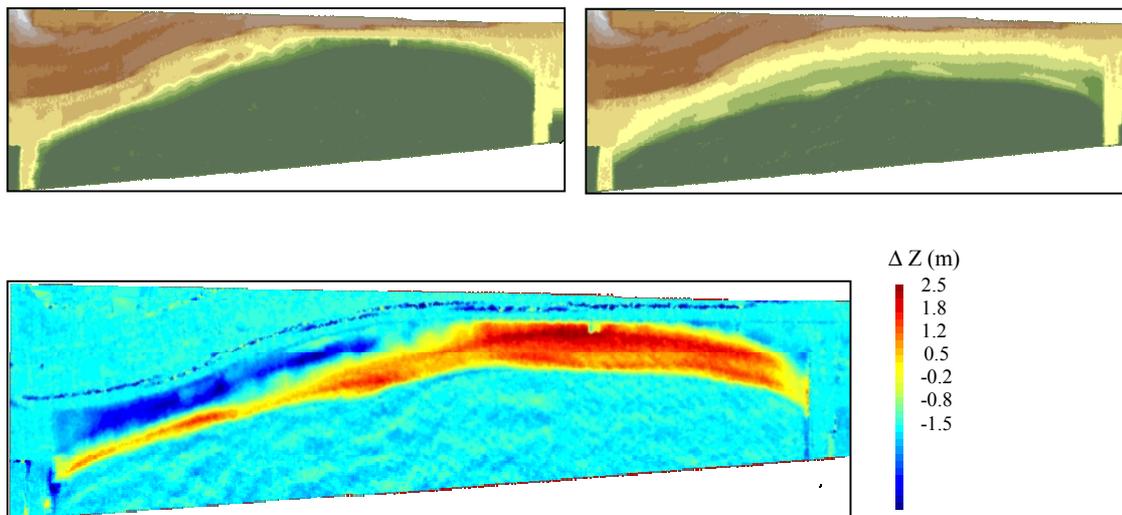


Figura 8. Estado de la playa el día 17/4/2002 (izquierda, después de las tormentas), y el día 23/7/2002 (derecha, después de la regeneración) y diferencia de altura entre las dos (abajo).

#### 2.4. Modelos de ciudades

Gracias a la gran densidad de puntos que toma el lidar, se pueden obtener modelos de los edificios en 3D para aplicaciones de planificación, estudio de emplazamientos de antenas de comunicaciones, modelos de propagación del ruido, control de cambios etc. (Figura 9).

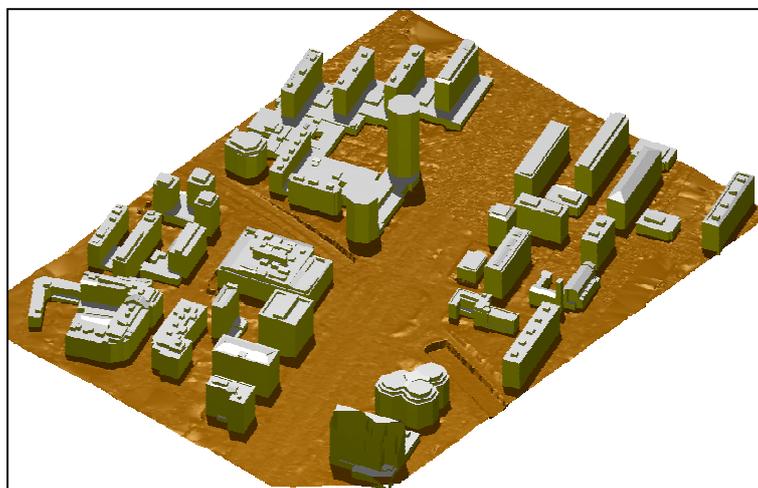


Fig 9 Modelo 3D de un trozo de la ciudad de Barcelona a partir de datos lidar de 2,5 puntos/m<sup>2</sup> de densidad.

#### 2.5. Gestión forestal

Como ya se ha dicho, el lidar permite medir la altura del terreno en las zonas cubiertas de vegetación (siempre que el pulso láser pueda llegar al suelo y volver al emisor). Ello permite generar modelos del terreno en zonas boscosas (figura 10). En pruebas realizadas en el ICC, se ha encontrado que de los datos lidar puede derivarse la altura de los árboles y el tamaño de su copa, además de poderlos contar. Con modelos de árboles adecuados, sería posible completar un inventario forestal y obtener la biomasa.

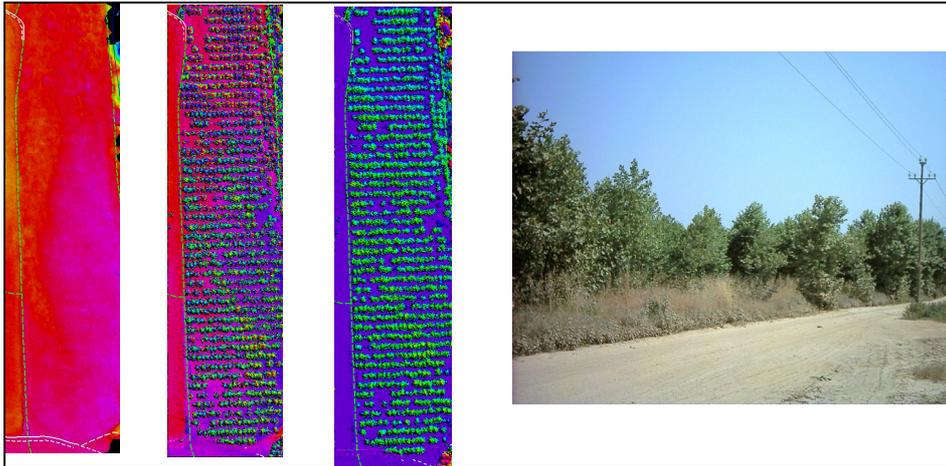


Fig 10. Modelo digital del terreno (izquierda), modelo digital de la superficie (centro) y diferencia entre ambos (derecha) de una zona arbolada que se muestra en la fotografía. A partir de esta última se pueden contar los árboles individualmente, determinar su altura y también el diámetro de la copa. Si se dispone de un modelo particular de árbol, pueden determinarse otros parámetros típicos de inventarios forestales.

### 3. Sensores hiperespectrales

Normalmente, los análisis temáticos basados en imágenes hiperespectrales se han basado en sensores situados en satélite. Un caso paradigmático lo constituyen los sensores de la serie de satélites Landsat. Para otras aplicaciones, se requieren resoluciones espaciales y espectrales mayores. En el año 1991 el ICC adquirió el sensor hiperespectral *Casi* (*Compact Airborne Spectrographic Imager*) para capturar datos para todo un abanico de aplicaciones temáticas.

#### 3.1. Características del sensor *Casi*

El *Casi* es un sensor óptico hiperespectral que ofrece la posibilidad de selección de bandas para obtener información radiométrica sobre 512 columnas de imagen. La resolución espacial típica va de 2 a 10 m dependiendo de la altura de vuelo y de la velocidad del avión. El número máximo de bandas que se puede conseguir de manera simultánea es variable, hasta un máximo de 288 a escoger el rango de 400 nm a 960 nm, en intervalos de 1,8 nm. Como todos los sensores lineales de empuje (*pushbroom*), cada línea de imágenes captadas por el sensor está afectada por el movimiento del avión que hay que corregir línea a línea (Fig 11). Para simplificar este proceso se usa el sistema de orientación directa SISA, desarrollado por el ICC, y basado en un receptor GPS y un sistema inercial INS.

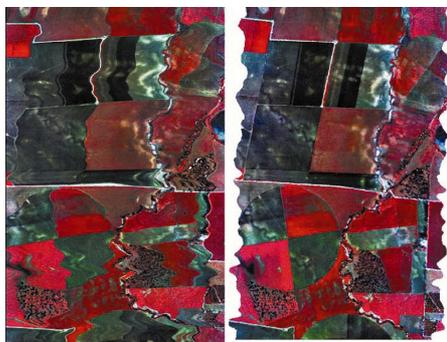


Fig 11. La imagen izquierda aparece distorsionada debido a los movimientos del avión. La imagen de la derecha aparece con la geometría correcta.

En el transcurso de estos últimos años el ICC ha usado el sensor *Casi* en aplicaciones temáticas, de las cuales cabe resaltar evaluación de incendios, estudio de la calidad de aguas, y a agricultura de precisión

### 3.2. Análisis de calidad de aguas

El objetivo es medir los parámetros físicos y químicos que determinan la calidad del agua y el grado de contaminación. El proyecto piloto se realizó para el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento de España. En concreto, se trata de valorar la utilidad del *Casi* para los estudios de eutrofización de embalses. Para ello, se programó un vuelo con 48 bandas, entre 412 y 960 nm, a unos 2500 metros de altura y píxel de 4 metros (figura 12), del que se obtuvieron las radiancias espectrales, a sobre las cuales el CEDEX aplicó sus modelos.

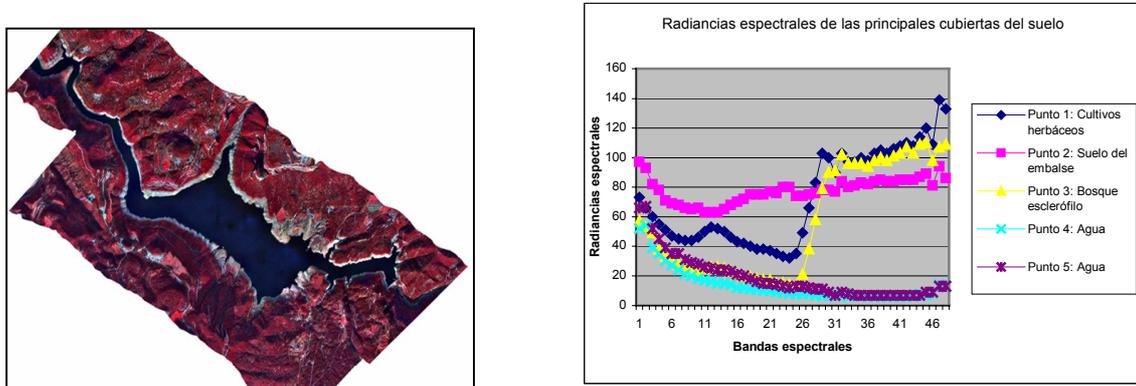


Fig. 12: imagen falso color del pantano de Sau y valores de radiancia de las principales cubiertas del suelo

En otro proyecto relacionado, se proponía conocer la respuesta espectral de las aguas continentales en las bandas nominales del sensor MERIS del satélite ENVISAT-1 y el desarrollo de modelos para la estimación de la concentración de pigmentos fotosintéticos.

### 3.3. Inventario de incendios forestales

Análisis anual de las áreas afectadas por incendios forestales de más de 20 ha, para el Departamento de Medio Ambiente, a partir de las imágenes de la figura 13. Se genera un informe del área quemada, porcentaje de usos del suelo afectados comparando con la base de datos de usos del suelo, y un fichero integrable en sistemas SIG.

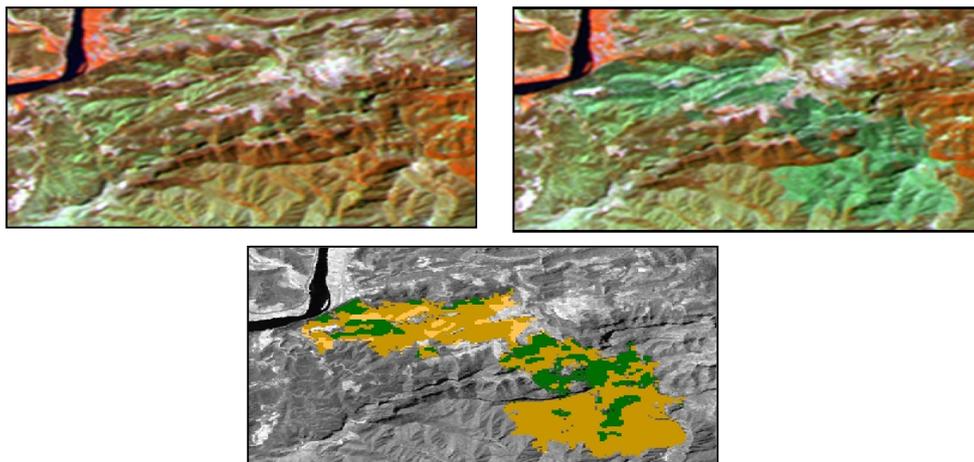
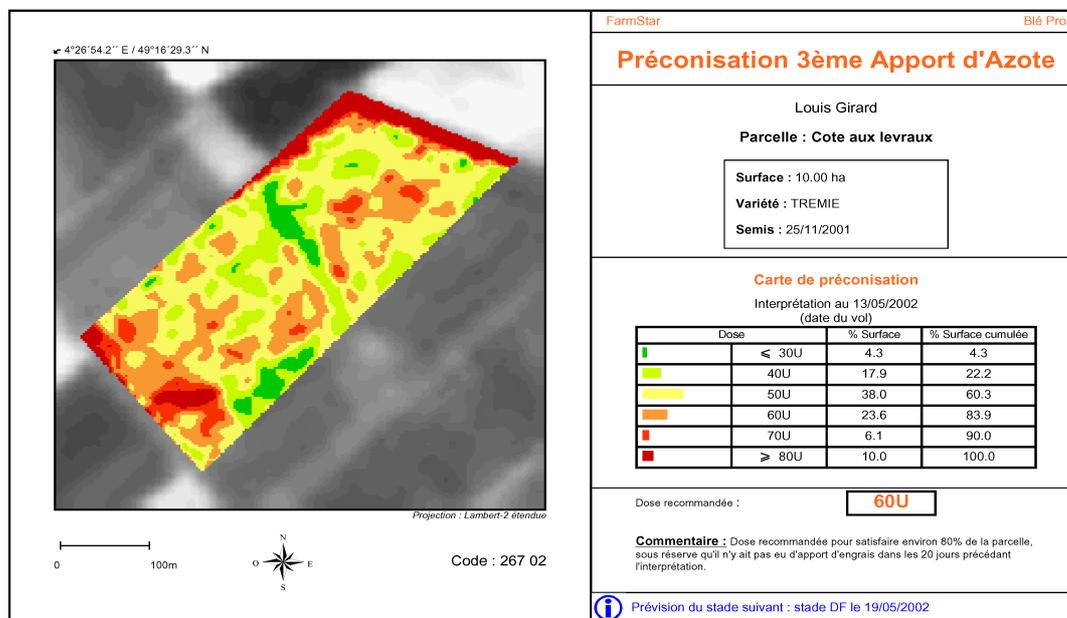


Fig 13 Área incendiada (superior izquierda), área después del incendio (superior derecha) y usos del suelo afectado (inferior)

### 3.4. Agricultura de precisión

Se trata de una metodología que permite realizar el seguimiento detallado del crecimiento de cultivos para conocer a tiempo cuáles son las carencias nutricionales o hídricas y las cantidades de agua o nutrientes a aportar en cada lugar. Estos “mapas de estado” se construyen a partir de modelos de crecimiento que se basan en los datos hiperespectrales. Desde hace años, el ICC trabaja en este campo para la compañía francesa Astrium, que da el servicio a las cooperativas de agricultores (fig. 14)



Fig

ura 14. Ficha con la recomendación de aporte de nitrógeno a una parcela agrícola. Al tratarse de información georeferenciada, el mapa puede usarse directamente en sistemas de automáticos.

## 4. Fusión de sensores

Trata de desarrollar metodologías para combinar los datos de sensores diferentes para la extracción de información de forma tan automatizada como sea posible.

Un primer trabajo, en fase de desarrollo en el ICC, tiene como objetivo poder utilizar las 4 bandas espectrales de la cámara digital DMC para derivar usos del suelo mediante clasificación multispectral. Dicha información constituiría un nuevo producto de alto valor añadido. Para ello, se está estudiando usar el sensor *Casi* para calibrar las bandas de color de la DMC y poder convertir los valores de gris en radiancias. Dicha conversión permite aplicar modelos físicos a las imágenes para, por ejemplo, compensar efectos atmosféricos. Los primeros resultados demuestran que las bandas *Casi* pueden configurarse de forma que reproduzcan las de la DMC. Dado que el *Casi* es un sensor calibrado del que se conoce la transformación de valores de gris a radiancias, parece posible encontrar los parámetros de conversión para la DMC.

Un segundo ejemplo es la utilización del lidar combinado con imágenes RGB e infrarrojo. Dicha combinación añade una banda más –el modelo de elevaciones – al clasificador multispectral. De forma similar, se pretende experimentar con la fusión de elevaciones lidar con información hiperespectral para aplicaciones de inventarios forestales.

## 5. Sumario

En la comunicación se han descrito diferentes sensores y sus principales aplicaciones. También se ha introducido el concepto de la combinación de sensores, cada uno de ellos operando según un

determinado principio físico. Dicha combinación no solo puede facilitar la extracción de información, sino que puede hacerla más consistente y robusta.

## **6. Referencias**

Alamús, R. et al. Workshop “High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information” ISPRS Comm. I & IV. Hannover, Alemania, 2005.

Kölbl, O. EPFL – Lausanne (Suiza) comunicación personal.