

## **1.- El Institut Cartogràfic de Catalunya**

El Institut Cartogràfic de Catalunya (en adelante ICC) fue creado mediante la Ley 11/1982, de 8 de Octubre, del Parlament de Catalunya, como organismo autónomo comercial, industrial y financiero adscrito al Departamento de Política Territorial y Obras Públicas de la Generalitat de Catalunya, con la finalidad de llevar a cabo las tareas técnicas de desarrollo de la información geomática en el ámbito de las competencias de la Generalitat.

Mediante la Ley 6/1997, de 11 de Junio, del Parlament de Catalunya, el ICC vió transformada su personalidad jurídica en empresa pública de la Generalitat, sujeta al derecho privado.

Desde su creación, y dado su carácter de organismo público, el ICC trabaja para que Catalunya disponga de unas bases cartográficas adecuadas a su territorio. Al mismo tiempo, y respondiendo a su marcado perfil de empresa, el ICC está fuertemente involucrado en el competitivo mercado cartográfico internacional, ejecutando proyectos no sólo en el resto del Estado Español, sino también en otros países y continentes.

Con ese doble objetivo, el ICC realiza un reciclaje continuo de su personal técnico y concede una importancia capital a su departamento de investigación y desarrollo. Así, desde el inicio de su andadura y de una manera ininterrumpida, el ICC ha venido desarrollando avanzadas tecnologías en el campo de la producción cartográfica que incorpora a sus entornos productivos. Esencialmente, la estrategia del ICC consiste en la implementación de herramientas de desarrollo propio adecuadas a sus necesidades y en la elección de sistemas de mercado que se complementen con las mismas.

Un buen ejemplo de ello lo constituye la cadena de producción de ortofotos digitales, en continua evolución durante la última década, lo que ha permitido alcanzar unos niveles de calidad, rendimiento y automatización difícilmente igualables.

## **2.- Introducción al concepto de ortofoto digital**

De modo muy conciso la ortofoto digital se define como aquél producto cartográfico, es decir, dotado de métrica y escala, obtenido mediante la manipulación de fotografías aéreas verticales en un entorno completamente digital.

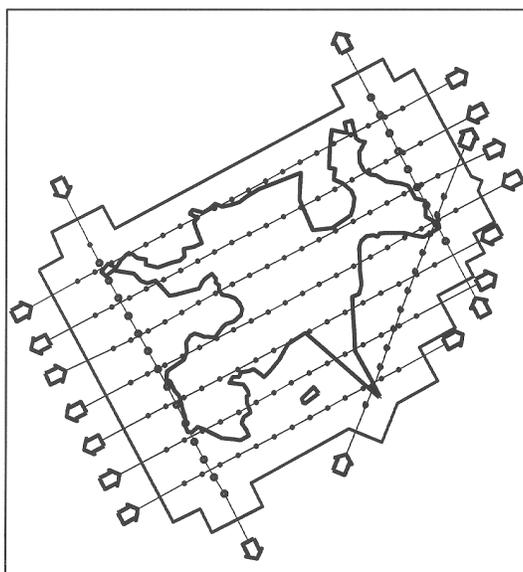
Dicha manipulación es obligada si se repara en el hecho de que las fotografías convencionales son proyecciones cónicas de la realidad y, en consecuencia, es necesario deformarlas hasta ubicar en su verdadera posición los objetos representados en ellas. Además, hay que tener en cuenta que el relieve del terreno, la curvatura terrestre y el efecto de la refracción atmosférica provocan que la escala del fotograma no sea constante, sino que varíe punto a punto a lo largo y ancho del mismo.

Básicamente, la producción de ortofotos digitales consiste en la digitalización de los fotogramas de vuelo y en la deformación de la imagen, píxel a píxel, proceso conocido con el nombre de ortoproyección, hasta ubicar cada uno de ellos en su verdadera posición, dentro de las tolerancias propias de cada escala. El efecto conseguido es el mismo que se obtendría si cada objeto del terreno hubiera sido fotografiado desde su propia vertical y a una altura variable para cada uno de ellos, de modo que todos aparecen representados a la misma escala.

## **3.- La cadena de producción de ortofotos digitales en el ICC**

### **3.1.- El vuelo fotogramétrico**

Como ya se ha mencionado, el proceso de producción de ortofotos digitales se inicia con la realización de un conjunto de fotografías aéreas verticales del territorio obtenidas con una cámara fotogramétrica de gran formato (impresiona negativos de formato útil cuadrado de 23 cm de lado) calibrada métricamente y embarcada en un avión que, literalmente, barre la zona a cartografiar describiendo pasadas de vuelo sensiblemente paralelas entre sí y de sentidos opuestos entre pasadas adyacentes. Adicionalmente se realizan las denominadas pasadas transversales, de dirección ortogonal al resto de las pasadas y ubicadas en los extremos de la zona recubierta por el vuelo, denominada bloque fotogramétrico. La altura de vuelo y la distancia de la focal empleada determinan la escala de los fotogramas obtenidos, que siempre es menor que la escala de la ortofoto que se desea generar.



*“Ejemplo de gráfico que representa la geometría típica de un vuelo fotogramétrico, en el que los puntos representan los centros de los fotogramas”*

Al objeto de posibilitar la posterior aplicación de métodos fotogramétricos, basados en el fenómeno de la estereoscopia, los fotogramas de vuelo se realizan con recubrimiento o solape, es decir, de manera que presentan una zona común de territorio, tanto entre fotogramas consecutivos de una misma pasada de vuelo como entre pasadas adyacentes, esto es, cada fotograma de vuelo tiene una parte común con los fotogramas inmediatamente anterior y posterior de la misma pasada de vuelo y, al mismo tiempo, cada pasada de vuelo tiene una parte común con las pasadas de vuelo adyacentes. Estos recubrimientos son, típicamente, del 60% en sentido longitudinal (dirección de avance del avión) y del 30% en sentido transversal (entre pasadas de vuelo adyacentes).



*“Avión reactor del ICC ejecutando una maniobra en pleno vuelo fotogramétrico”*

La realización del vuelo se inicia con el diseño en gabinete del plan de vuelo mediante el uso de un sistema de planificación y navegación asistida, que dibuja las pasadas de vuelo y calcula las alturas de vuelo en función de la escala deseada, los recubrimientos requeridos y la orografía del terreno.

El vuelo se realiza con un receptor GPS embarcado en la aeronave al objeto de registrar datos que serán usados en fases posteriores.

Las cámaras empleadas son de última generación, están equipadas con un sistema de navegación asistida y de corrección de la deriva y un mecanismo compensador del movimiento de la imagen, y van conectadas a los equipos instalados en el avión (receptor GPS y ordenador). Además, etiquetan los fotogramas de vuelo de manera automatizada y personalizada para cada misión de vuelo.

Para cada proyecto concreto se elige la película (negativo o diapositiva en blanco y negro, color, infrarrojo o infrarrojo color) más adecuada, realizándose pruebas de sensibilidad y contraste que permiten determinar los parámetros (tiempo de revelado, temperatura, químicos, etc.) que habrán de usarse en su revelado.

Es también necesario solicitar a la autoridad competente los preceptivos permisos de vuelo para sobrevolar la zona a cartografiar, así como diseñar cuidadosamente la logística del proyecto, al objeto de movilizar a las bases de operaciones las personas, equipos y aeronaves necesarios para la ejecución del mismo.

También se procede a un estudio minucioso de las condiciones meteorológicas en las zonas de vuelo, recabando información meteorológica regional y consultando las imágenes de los satélites NOAA y METEOSAT.

Una vez revelados los rollos de película, las fotografías obtenidas y los datos GPS capturados se someten a un riguroso control de calidad que abarca cuatro aspectos bien diferenciados:

- control geográfico, que garantiza que la cobertura y distribución geográfica de los fotogramas es la deseada;
- control de la imagen, que consiste en la inspección visual de los negativos al objeto de detectar cualquier tipo de incidencia que pudiera mermar la calidad de la imagen: presencia de nubes, niebla, bruma, etc.;
- control geométrico, en el que se comprueba que los recubrimientos longitudinal y transversal y los ángulos de inclinación del avión alrededor de tres ejes ortogonales en el momento de la captura de las fotografías presentan valores dentro de las tolerancias establecidas a los efectos;
- control GPS, para constatar la validez de los datos GPS capturados en vuelo y de los provenientes de una estación de referencia en tierra;

### **3.2.- El apoyo fotogramétrico del vuelo**

El apoyo fotogramétrico del vuelo y el posterior proceso denominado aerotriangulación tienen como objetivo la georreferenciación del vuelo, esto es, el establecimiento de relaciones geométricas entre un sistema de referencia ortogonal solidario a la cámara fotográfica, cuya posición y orientación en el espacio es distinta para cada fotograma de vuelo, y un sistema de referencia ortogonal solidario al terreno, al objeto de acabar determinando las coordenadas de los centros de proyección y los ángulos que definen la orientación en el espacio de cada una de las fotografías.

Para ello se procede a un ajuste combinado de observaciones fotogramétricas, observaciones de puntos de apoyo terrestre y centros de proyección de los fotogramas determinados mediante tecnología GPS en modo cinemático, que posibilita la aerotriangulación del vuelo con configuraciones de apoyo terrestre mínimas, dada la existencia de gran redundancia de información que permite relajar, de manera notable, el número de puntos de apoyo de campo necesarios.

El apoyo del vuelo consta, pues, del apoyo aéreo cinemático y del apoyo topográfico. El primero consiste en la determinación de las coordenadas de los centros de proyección de las fotografías y el segundo en la observación de puntos de apoyo sobre el terreno.

#### **3.2.1.- El apoyo aéreo cinemático**

Se inicia con la captura de datos GPS en vuelo mediante el uso de un receptor de doble frecuencia embarcado en la aeronave. Dichas observaciones GPS se registran cada segundo y se procesan en modo diferencial junto con las provenientes de una estación fiducial de referencia instalada en tierra.

El software utilizado calcula la posición del receptor móvil respecto al de la estación de referencia para cada época (instante en que se registran datos GPS). A continuación se calculan las coordenadas del receptor móvil en los instantes exactos de exposición de cada fotografía (registrados por el receptor) mediante interpolación según un polinomio de orden 3 a partir de las coordenadas de las cuatro épocas más próximas al tiempo de exposición de cada fotografía, obteniéndose dichas coordenadas con una precisión relativa de 10 cm.

### **3.2.2.- El apoyo topográfico**

El proceso se inicia con la elección de la ubicación de los puntos de apoyo topográfico sobre una colección de fotografías, para lo que se tiene en cuenta la geometría del bloque fotogramétrico y la existencia de apoyo aéreo cinemático, escogiéndose siempre puntos de apoyo cuya posición en el terreno sea absolutamente estable y cuya identificación en las fotografías y en el terreno sea sencilla. En general se disponen puntos de apoyo topográfico en las esquinas del bloque fotogramétrico, sobre las pasadas transversales.

Los trabajos de campo se realizan mediante tecnología GPS utilizando receptores de doble frecuencia y los puntos de apoyo levantados se enlazan convenientemente con los vértices de la Red Geodésica Nacional.

### **3.3.- La aerotriangulación digital**

El proceso se inicia con la digitalización de los fotogramas a aerotriangular mediante la utilización de un escáner fotogramétrico de alta resolución (hasta 7  $\mu\text{m}$ ) con capacidad de compresión JPEG de las imágenes digitalizadas, con la consiguiente optimización en su transmisión y almacenamiento. El escáner utilizado no introduce ningún tipo de defecto radiométrico visible a la escala de salida de la ortoimagen y su rango de densidades ópticas es suficientemente amplio como para acomodarse al rango de las densidades que presentan los fotogramas. El resultado de la digitalización de los fotogramas son ficheros digitales que se almacenan en el servidor de imágenes para su posterior utilización durante las etapas de aerotriangulación, compilación del modelo de elevaciones del terreno y ortorrectificación.

La orientación interna de las imágenes se realiza de forma automática mediante el uso de un software que localiza las marcas fiduciales (marcas de referencia ubicadas en las esquinas de los fotogramas) digitalizadas, por comparación con una marca fiducial patrón, procediendo a su medida y al cálculo de la orientación.

El proceso de aerotriangulación se inicia con la transferencia digital de puntos entre fotogramas, lo que se realiza en estaciones fotogramétricas digitales. El software utilizado permite la visualización simultánea de hasta 6 imágenes en pantalla sobre las que se superpone la distribución de los puntos. Escogido el punto a transferir en una imagen éste se transfiere, mediante correlación automática, a las otras 5 imágenes con precisión de medio píxel. Además, un proceso de refinamiento ajusta todas las observaciones a un décimo de píxel, atendiendo solamente a aspectos radiométricos de la imagen. Además se procede a la observación de los puntos de apoyo topográfico mediante visión estereoscópica de todas las imágenes donde son visibles.

La determinación de los parámetros de aerotriangulación para la orientación de los pares estereoscópicos se obtiene, a partir de las mencionadas observaciones, mediante el ajuste de una red fotogramétrica por el método de haces con autocalibración, usándose un software completamente desarrollado por el ICC.

### **3.4.- Compilación del modelo digital de elevaciones del terreno**

Para la obtención de ortofotos es imprescindible disponer de un modelo digital de elevaciones del terreno (en adelante DTM), cuya compilación se realiza sobre estaciones fotogramétricas digitales utilizando un software de correlación automática. El método consiste en la generación de una pirámide de imágenes de diferentes resoluciones a partir de las fotografías aéreas digitalizadas a plena resolución y en la utilización de operadores para la localización de los puntos de interés mediante la imposición de ciertas condiciones geométricas, obteniéndose coordenadas x, y, z de los mismos. El resultado de este proceso es una malla regular de puntos con un espaciado de 0,5 mm x 0,5 mm sobre el fotograma.

Sobre el DTM obtenido se realiza un control de calidad que comprueba la calidad del modelo y la continuidad en su interior y con los modelos adyacentes.

### 3.5.- El proceso ortofoto

En esta etapa se procede a la adecuación y personalización para el proyecto en cuestión de todos los procesos automatizados que intervienen en la generación de los ortofotomapas.

Por razones de economía de costes, para la confección de cada ortoimagen se tiende a utilizar el mínimo número posible de fotogramas que garantizan el total recubrimiento de la zona a cartografiar. La selección de los fotogramas óptimos se efectúa de modo interactivo sobre una estación gráfica a partir de los parámetros obtenidos en la aerotriangulación y del DTM correspondiente al terreno fotografiado.

Las imágenes digitales provenientes de la fase de generación del DTM se transfieren, por medio de la red, desde el servidor de imágenes a una estación local en la que son procesadas por el subsistema de rectificación digital de imágenes.

La ortoproyección o rectificación física de las imágenes digitales consiste en el reposicionamiento de todos los píxeles a partir del conocimiento del DTM y de las funciones de transformación que pasan de coordenadas mapa a coordenadas fotograma, haciéndose intervenir en el cálculo las ecuaciones fotogramétricas de colinealidad, las correcciones necesarias para corregir la refracción del aire y los parámetros de calibración y autocalibración de la cámara.

Para la interpolación de los píxeles de entrada y la construcción de los de salida se utiliza un algoritmo de interpolación bicúbica que, aún siendo el más lento en términos de tiempo de cálculo, es el que mejor preserva la definición original de las imágenes. Al objeto de reducir el número de operaciones aritméticas y accesos a disco en la rectificación de las imágenes, ésta se calcula solamente para un subconjunto de puntos que definen la malla (puntos de anclaje), y los demás se resuelven por interpolación.

Algunas de las características que definen el subsistema de rectificación desarrollado completamente por el ICC son las siguientes:

- la superficie de rectificación es arbitraria;
- incorpora la posibilidad de ensamblar mosaicos digitales;
- es un sistema altamente automatizado y el grado de intervención humana es mínimo;

El rendimiento del subsistema de rectificación de imágenes es muy alto, gracias a que sólo exige un control en el lanzamiento de la aplicación y en el análisis de la ortoimagen producida.

En ocasiones, los fotogramas de vuelo contienen objetivos sensibles a la Defensa Nacional. Al objeto de ocultarlos o disimularlos se procede, de acuerdo con las autoridades pertinentes, a la "censura" de los negativos originales, de forma que puedan generarse las correspondientes ortoimágenes sin facilitar información sobre dichos objetivos. En esos casos, para resolver la parte de las ortoimágenes correspondientes a las zonas censuradas en los negativos, se recurre a diferentes técnicas: superposición de nubes sintéticas, copia de porciones de imágenes sobre las zonas sensibles, camuflaje de ciertas zonas, etc.

En muchas ocasiones, un solo fotograma no es suficiente para la confección de una ortoimagen. En esos casos es imprescindible establecer un mosaico digital entre los diferentes fotogramas a utilizar. El proceso que se sigue para la realización de mosaicos parte de la hipótesis de que las diferentes imágenes han sido corregidas geométricamente, lo cual permite una superposición perfecta de los diferentes componentes.

El primer paso consiste en el cálculo de los dos histogramas de las zonas comunes entre las dos imágenes a ensamblar, en la elección de una de ellas como referencia (imagen A) y en la traslación, mediante una función de mapeo local, del histograma de la imagen a cambiar (imagen B) al de referencia. Esta función cambia los valores digitales de la imagen B acercándolos a los valores existentes en la imagen A.

Una vez aplicada la función a la imagen B se obtiene la corregida radiométricamente B1 y se calcula una imagen de diferencias C entre A y B1. Esta imagen C es una imagen sintética en la que los tonos de gris identifican el grado de coincidencia de los valores digitales de las imágenes originales. En este sentido, valores muy claros o muy oscuros identifican aquellas zonas con muchas diferencias entre ambas imágenes. Sobre la imagen C podemos definir manualmente y de forma interactiva una línea de corte o de costura entre las dos imágenes. Finalmente, se corta por la línea definida la imagen B1 y se realiza el mosaico con la imagen de referencia A. Este procedimiento se utiliza también para la sustitución de zonas nubosas por áreas descubiertas de nubosidad de la misma zona.

En la actualidad, la definición de la línea por la que se establecerá el mosaico puede realizarse también mediante algoritmos automáticos de dibujo de la mejor línea de corte, buscando las zonas que minimicen las diferencias entre las imágenes que compondrán el mosaico, al objeto de evitar la identificación de dicho corte en el mosaico resultante. Este proceso automático comporta un ahorro substancial de tiempo comparado con el proceso manual y hasta puede llegar a convertirse en un proceso desatendido.

También es muy interesante alterar la gama de grises o de colores de las imágenes originales, en general pobre en matices, y contrastar las imágenes utilizando al máximo la gama disponible. Para ello deben respetarse, en la medida de lo posible, dos criterios: el primero hace referencia a la continuidad de los tonos, es decir, que tonos próximos en la gama original deben dar paso a tonos también cercanos en la gama resultante; el segundo, más difícil de conseguir, es el de la globalidad (no localidad) de los tonos, esto es, que superficies de terreno semejantes (misma cobertura, relieve,...) deben dar valores digitales similares, con independencia de su situación dentro de la imagen.

La digitalización de los fotogramas introduce, inevitablemente, ciertos defectos en la imagen asociados a cuerpos extraños presentes sobre la emulsión fotográfica en el momento de la digitalización. Estos cuerpos extraños incluyen polvo de diferentes dimensiones y composiciones, así como fibras textiles de diversos tamaños. Todos ellos pueden depositarse sobre la emulsión en diferentes momentos del proceso. Justo antes de la digitalización es necesario proceder a una cuidadosa limpieza del fotograma utilizando un líquido disolvente y trapos sin fibra. Esta operación no garantiza la ausencia de cuerpos extraños en la imagen, cuestión que también depende de la limpieza de la atmósfera de la sala donde se realiza la digitalización.

Para solventar este problema contamos con dos soluciones complementarias: la primera se refiere al mantenimiento de unas condiciones de limpieza especial de la atmósfera de la sala donde se realiza la digitalización, afectando al sistema de climatización, con filtros especiales, y al vestuario de los operadores; la segunda se refiere a la eliminación de los cuerpos extraños de las imágenes procesadas a través de un programa de maquillaje digital semiautomático: el operador determina la posición del objeto a eliminar, el sistema lo localiza automáticamente y sustituye los píxeles afectados por otros calculados a partir de valores del entorno.

La aplicación de filtros para la mejora de los contornos sirve para visualizar, de la mejor manera posible, las imágenes que, por estar al límite de representación sobre el mapa, diluyen los elementos importantes, especialmente los que facilitan la situación sobre la imagen: carreteras, ríos, caminos, ferrocarriles, etc.

Por último se procede a la expansión de los tonos de gris de las imágenes, para lo que se aplica habitualmente un procedimiento de mejora de contraste a partir de los histogramas locales calculados en el interior de cada una de las cuadrículas de una malla regular. Para cada ventana se calcula una función de normalización y a cada píxel se le aplica una función de contraste, que es la combinación de las funciones de normalización asociadas a las cuatro ventanas más cercanas, ponderándolas en base a la distancia del píxel a las mismas.

Las ortoimágenes así obtenidas se ensamblan con el resto de los componentes del mapa (carátula, mapa guía, toponimia, etc.), obteniéndose el producto final que puede servirse tanto en soporte papel (ploteado o filmado e impreso) como en los formatos digitales estandar en proceso de imagen y en entornos GIS.



*“Ejemplo de ortofotomapa de Catalunya E=1:25.000 color”*

#### **4.- Campos de aplicación de los ortofotomapas**

Son múltiples los campos de actuación en los que el uso de ortofotomapas resulta especialmente adecuado, por ejemplo: en Planificación y Ordenación Territorial (vialidad, puertos, aeropuertos y, en general, grandes infraestructuras), en Urbanismo, en Medio Ambiente (evaluación por fotointerpretación de los recursos naturales), en Agricultura (identificación por fotointerpretación de las cubiertas y usos del suelo), en Geología (identificación de materiales, formaciones geológicas, estructuras tectónicas), en Minería, etc.

#### **5.- Proyectos ortofoto realizados para Enresa**

Desde hace algunos años el ICC viene realizando proyectos cartográficos por encargo de Enresa, cuyo objetivo principal consiste en cartografiar las zonas donde se emplazan algunas de las instalaciones de Enresa o las zonas más adecuadas para el emplazamiento de futuras instalaciones. A continuación se resumen muy someramente los trabajos que han incluido la producción de ortofotomapas digitales:

##### **5.1.- Proyecto “FUA”**

En el año 1.995, el ICC realizó un proyecto ortofotográfico denominado FUA, pues se trataba de cartografiar las instalaciones de la antigua Fábrica de Uranio de Andújar, en la provincia de Jaén, con una superficie total de unas 800 hectáreas. El proyecto consistió en la realización de dos colecciones de ortofotos digitales E=1:2.000 del emplazamiento, a partir de sendos vuelos fotogramétricos color e infrarrojo-color E=1:5.000 realizados en una sola misión de vuelo mediante la técnica de la doble cámara.

##### **5.2.- Proyecto “el Cabril”**

En el mismo año el ICC realizó un proyecto cartográfico con cobertura de las instalaciones del Cabril, en la Sierra Albarrana, con una superficie total de unas 800 hectáreas. El proyecto consistió en la realización de ortofoto digital en color E=1:2.500 del emplazamiento, a partir de un vuelo fotogramétrico E=1:10.000. Adicionalmente, y durante la misma misión de vuelo, se realizó mediante la técnica de la doble cámara un vuelo fotogramétrico E=1:10.000 en blanco y negro, a partir del cual se obtuvo mediante restitución fotogramétrica un mapa topográfico E=1:2.500 en tres dimensiones.

##### **5.3.- Proyectos “AFA” y “ERA”**

También en 1.995, y en el marco de los proyectos AFA y ERA, el ICC realizó un proyecto cartográfico con cobertura de 17 zonas distribuidas a lo largo y ancho de la geografía española, cartografiando una superficie total de más de 6.000 km<sup>2</sup>. En todas las zonas se realizó un vuelo fotogramétrico E=1:60.000 en blanco y negro y, mediante la técnica de la doble cámara, un vuelo adicional no fotogramétrico a la misma escala y en color. En una de las 17

zonas se aumentó la escala de los vuelos a 1:40.000. El proyecto incluyó la realización de ortofoto digital en blanco y negro y de un mapa topográfico tridimensional con curva de nivel cada 5 metros, ambos a E=1:20.000 en todas las zonas excepto la que se voló a E=1:40.000, en la que la ortofoto y el mapa topográfico se realizaron a E=1:10.000.

#### **5.4.- Proyecto “Mina de los Ratones”**

En 1.997 el ICC realizó un proyecto cartográfico con cobertura de las instalaciones de la mina de los Ratones, emplazada en el término municipal de Albalá del Caudillo, al sur de Cáceres, con una superficie total de 1.400 hectáreas. El proyecto consistió en la realización de dos vuelos fotogramétricos simultáneos E=1:5.000, en blanco y negro y en color, a partir de los cuales se realizó ortofoto digital y mapa topográfico E=1:1.000. El proyecto se completó con la colaboración en 1.998 con el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera, perteneciente al CSIC, en la realización de una campaña de prospección geofísica basada en la utilización del método de sísmica de reflexión.