

OBTENCIÓN POR ESTEREOCORRELACIÓN AUTOMÁTICA DE MODELOS NUMÉRICOS DEL TERRENO A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE

A. AROZARENA, J. ARDIZONE, J. DELGADO, G. VILLA Y P. VIVAS.
I. G. N. Madrid

RESUMEN

En los últimos años, uno de los temas que mayor auge ha experimentado en el campo del tratamiento de imágenes digitales ha sido el de obtención de modelos numéricos del terreno mediante técnicas de Correlación Automática de pares estereoscópicos.

En esta comunicación se presentan las experiencias obtenidas en el Área de Teledetección del I.G.N. en el cálculo del modelo numérico del terreno de una hoja del MTN 1/50.000 por correlación automática de fotos aéreas digitalizadas, así como su aplicación a la formación de la cartografía topográfica.

ABSTRACT

In the last few years, one of the topics with greater interest in digital image processing has been the calculation of digital elevation models through autocorrelation of stereoscopic pairs of images.

In this report we will present the project carried out in the Remote Sensing Area of the I.G.N. compiling the digital elevation model of a sheet of National Topographic Map 1/50.000 with an autocorrelation method.

1. INTRODUCCIÓN

La obtención de MDT tiene importantes aplicaciones en la formación de la cartografía. Por otra parte, la realización de ortoimágenes a gran escala y ciertas aplicaciones de los S.I.G. requieren el conocimiento de MDT.

La experiencia realizada en el Área de Teledetección del I.G.N. pretende mostrar las posibilidades que brindan los sistemas de estereocorrelación automática para la producción sistemática de MDT.

En este primer ensayo se han evidenciado ciertos problemas que entorpecen el normal desarrollo del procedimiento de obtención de MDT mediante correlación, que debería ser prácticamente automático. Estos problemas requieren soluciones viables en cuanto a tiempo de ejecución para que el procedimiento sea abordable a nivel productivo.

Expondremos a continuación la metodología empleada en este trabajo y algunos de los problemas surgidos durante su ejecución.

2. ORIENTACIÓN DE LOS FOTOGRAMAS Y AEROTRIANGULACIÓN

Como zona piloto para la realización de este estudio se eligió la hoja 599 del MTN "Jaraiz de la Vera", por concurrir en ella diversos tipos de morfología del terreno.

Otro de los requerimientos del proyecto era utilizar fotografías a pequeña escala, por lo que se decidió emplear el Vuelo Nacional E: 1/70.000.

La hoja del MTN reseñada queda cubierta por dos pasadas de seis fotogramas cada una, lo que conforma un bloque de diez pares de estereoscópicos.

El primer problema planteado consistió en el apoyo del bloque que constituyen las dos pasadas. Dado que no era factible un apoyo de campo para los puntos de control, se decidió transferir los puntos del control menor de la triangulación del Vuelo Nacional E: 1/30.000, correspondiente a la hoja 599, a los fotogramas 1:70.000 mediante un equipo de transferencia de puntos (PUG). Esta operación, que fue realizada en servicio de Apoyo y Producción Básica de Fotogrametría del I.G.N., es de gran dificultad y los errores que en ella puedan generarse influirán decisivamente en todos los procesos posteriores. En la Figura 1 se muestra la distribución de los puntos de control para el bloque que constituye la hoja 599.

El procedimiento de aerotriangulación analítica seguido fue el siguiente:

- 1º) Preparación y medida de coordenadas.
- 2º) Refinamiento de las mismas.
- 3º) Determinación de los elementos de orientación relativa y formación de modelos independientes.
- 4º) Formación de las pasadas.
- 5º) Ajuste de bloque.

La medida de coordenadas se realizó en un monocomparador digital mediante el algoritmo de correlación, estando la precisión de las medidas entorno a las 7 u 8 micras.

El método utilizado para la orientación relativa fue el de colinearidad en el que la foto derecha de cada par estereos-

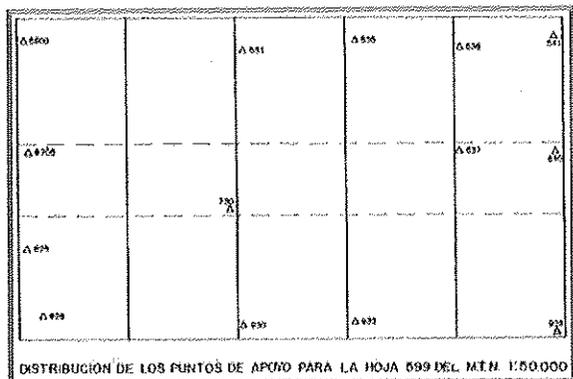


Figura 1.

cópico se orienta en relación al fotograma izquierdo. Aunque la medida de paralajes en cinco puntos es suficiente para la resolución de las ecuaciones, se tomaron algunos más para permitir una solución por mínimos cuadrados. Se estableció un e.m.c. límite en la orientación relativa de 10 micras. El resultado de este proceso es la determinación de los parámetros de orientación relativa para cada modelo así como las coordenadas de los puntos de paso en el sistema modelo.

La formación de las pasadas se realizó por el método de Schut. En este, el sistema de coordenadas del modelo de la izquierda permanece fijo así como un punto común a los modelos derecho e izquierdo en el sistema de coordenadas modelo izquierdo. De esta manera el modelo derecho se traslada al izquierdo y en el derecho, los rayos desde dicho punto fijo a los otros puntos comunes son rotados y escalados hasta adoptar la mejor transformación. Las coordenadas modelo derecho sufren entonces una transformación (traslación, rotación y escala) al modelo izquierdo.

El ajuste planimétrico y altimétrico de cada una de las pasadas se calculó a partir de transformaciones polinómicas por el método de Schut. Para el ajuste tanto horizontal como vertical se optó por polinomios de segundo grado. En esta fase es necesario detectar errores inaceptables que pueden provenir de una mala asignación de coordenadas a los puntos de control, supuesto que los errores cometidos en las medidas de sus coordenadas placa son aceptables. Una vez formadas las dos pasadas y comprobado que los errores residuales son adecuados se somete al bloque que constituyen éstos a un "análisis de puntos de ligadura", es decir aquellos puntos comunes a ambas pasadas. De esta manera podemos establecer el grado de robustez del bloque sin la intervención de los puntos de control. Los RMS obtenidos en este análisis fueron 15 micras en planimetría y 20 micras en altimetría, considerándose aceptable para los requerimientos de este estudio.

Para ajustar el bloque se empleó el método de ajuste de haces que teóricamente da mejores resultados planimétricos que el método de ajuste por modelos independientes. No obstante, se realizarán pruebas con ambos métodos para

comparar los resultados.

Los e.m.c. obtenidos en el ajuste del bloque fueron 3,3 metros en planimetría y 2,5 metros en altimetría. Estos errores parecen algo abultados si tenemos en cuenta la precisión con la que se midieron las coordenadas siendo probable que gran parte del error provenga de las coordenadas de los puntos de apoyo obtenidos a partir de la aerotriangulación del vuelo 1/30.000, como anteriormente se expuso. En sucesivos trabajos se apoyará correctamente el bloque, con lo que se conseguirán, previsiblemente, mejores resultados en la aerotriangulación.

3. ELECCIÓN DEL TAMAÑO DEL PIXEL DIGITALIZADO

La cámara digitalizadora tiene la posibilidad de rasterizar a partir de píxeles de 14 micras de tamaño. Una de las primeras cuestiones que se plantearon fue la elección del adecuado tamaño del píxel.

El error medio altimétrico (Bonneval) en una restitución numérica convencional puede calcularse a partir de la fórmula:

$$Eh = + f/b \cdot Ef \cdot ep$$

donde:

- f: distancia principal de la cámara
- b: base medida en los fotogramas
- Ef: denominador de la escala de éstos
- ep: error en la medida de paralajes

Si asumimos que el error en la medida de paralajes es igual al tamaño del píxel digitalizado multiplicado por un coeficiente que representa el error con que se realiza la autocorrelación obtenemos:

$$Eh = + f/b \cdot Ef \cdot Tp \cdot C$$

Suponiendo que el error de correlación es inferior al píxel y operando a la inversa, es decir, partiendo de un error altimétrico determinado calculamos el tamaño del píxel, obtendríamos, para $Eh <= 5$ metros, $Tp = 61$ micras. Dado que es necesario considerar un margen de seguridad en los cálculos teóricos y la influencia de los errores de la aerotriangulación, adoptaremos un píxel de 50 micras.

4. EL PROCESO DE CORRELACIÓN AUTOMÁTICA

El equipo que hemos empleado, el HAI-500 de Helava Associates Inc., realiza el cálculo automático de los Modelos Digitales del Terreno (MDT), utilizando la llamada "Geometría Epipolar" y el proceso de Correlación por Relajación Jerárquica (HRC). Haremos una breve mención a ellos, como introducción a la descripción de nuestra experiencia práctica:

4.1. Geometría Epipolar.

Este es un concepto desarrollado desde hace mucho tiempo

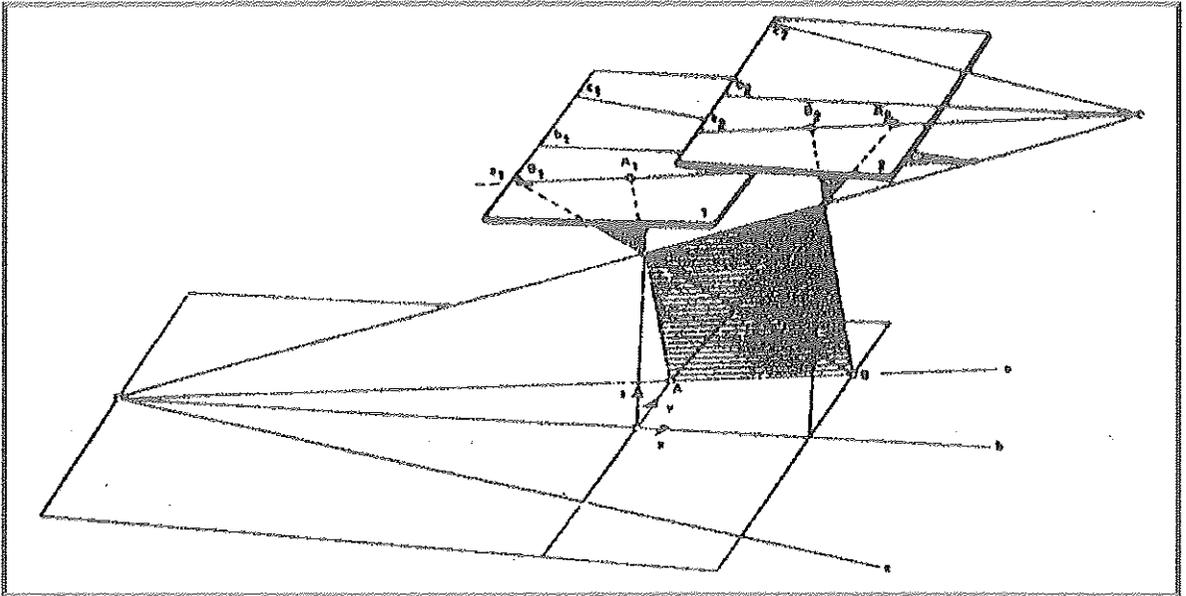


Figura 2.

en Fotogrametría clásica, y que permite convertir la búsqueda de puntos homólogos (correlación) en un proceso unidimensional:

Como se ve en la Figura 2, todo plano que pase por los dos centros proyectivos de un par fotográfico (plano epipolar o plano nuclear) corta a los dos planos focales en dos rectas (rectas epipolares) que tienen la siguiente característica: cualquier punto de una de ellas tiene su homólogo en la otra. Es decir, que el homólogo de un punto cualquiera de la foto izquierda habrá que buscarlo exclusivamente en la recta de intersección del plano epipolar que pasa por ese punto, con el plano focal en la foto derecha.

Por tanto, previamente al trabajo con un par de fotos, se realiza una transformación geométrica de ambos fotogramas (proceso de Epipolarización), de modo tal que las líneas de las nuevas imágenes digitales son rectas epipolares. Con esto se consiguen dos cosas al mismo tiempo:

- Simplificar el proceso de cálculo del MDT.
- Permitir la visualización perfecta de las imágenes en relieve en la pantalla estereoscópica, sin paralajes verticales.

4.2. La correlación por Relajación Jerárquica.

Este proceso se basa en las investigaciones del Doctor Helava (ver Bibliografía) y pretende disminuir al máximo la intervención del operador, evitando que el algoritmo se encuentre "perdido" durante el cálculo.

Para ello se realizan unas imágenes "resúmenes" de los fotogramas digitalizados iniciales, de resolución cada vez menores, en los que cada píxel representa 2x2, 4x4, 8x8, 16x16 y 32x32 píxeles de la imagen de partida. Dichas imá-

genes resumidas se utilizan sucesivamente en el proceso de correlación, empezando por la 1:32, calculando mallas cada vez más densas, hasta llegar a la malla de densidad deseada, que se calcula con las imágenes 1:1. Por tanto, se va obteniendo una información cada vez más exacta y detallada del relieve de la zona.

La ventaja de este procedimiento es que, basándose en la cota aproximada de cada punto obtenida con el nivel de resolución anterior, se restringe al máximo el intervalo de paralajes posibles y por tanto la longitud del segmento en que hay que buscar el punto homólogo cuando se va a "refinar" dicha cota.

Con ello se consigue acelerar el proceso y, lo que es aún más importante, disminuir la probabilidad de encontrar falsos "picos" de correlación, es decir falsos puntos homólogos. Además, si se produce un error en la identificación de un punto éste no arrastrará a todos los puntos a partir de él, sino sólo a los existentes hasta el siguiente punto de la malla calculado con el nivel de resolución anterior.

Los errores son tanto más graves cuanto más bajo es el nivel de resolución en que se cometen, ya que se produce un arrastre en "cascada" hacia los siguientes pasos del proceso.

Como es inevitable que se produzcan errores, al final del cálculo aparecerán siempre zonas erróneas, en las que la malla se ve despegada del terreno al visualizar en relieve en la pantalla estereoscópica junto con las fotos. Una tarea inevitable, posterior al cálculo automático, es la de revisión y corrección interactiva de estas zonas malas.

4.3. Estrategias de Correlación.

Para disminuir al máximo el número de ocasiones en que el

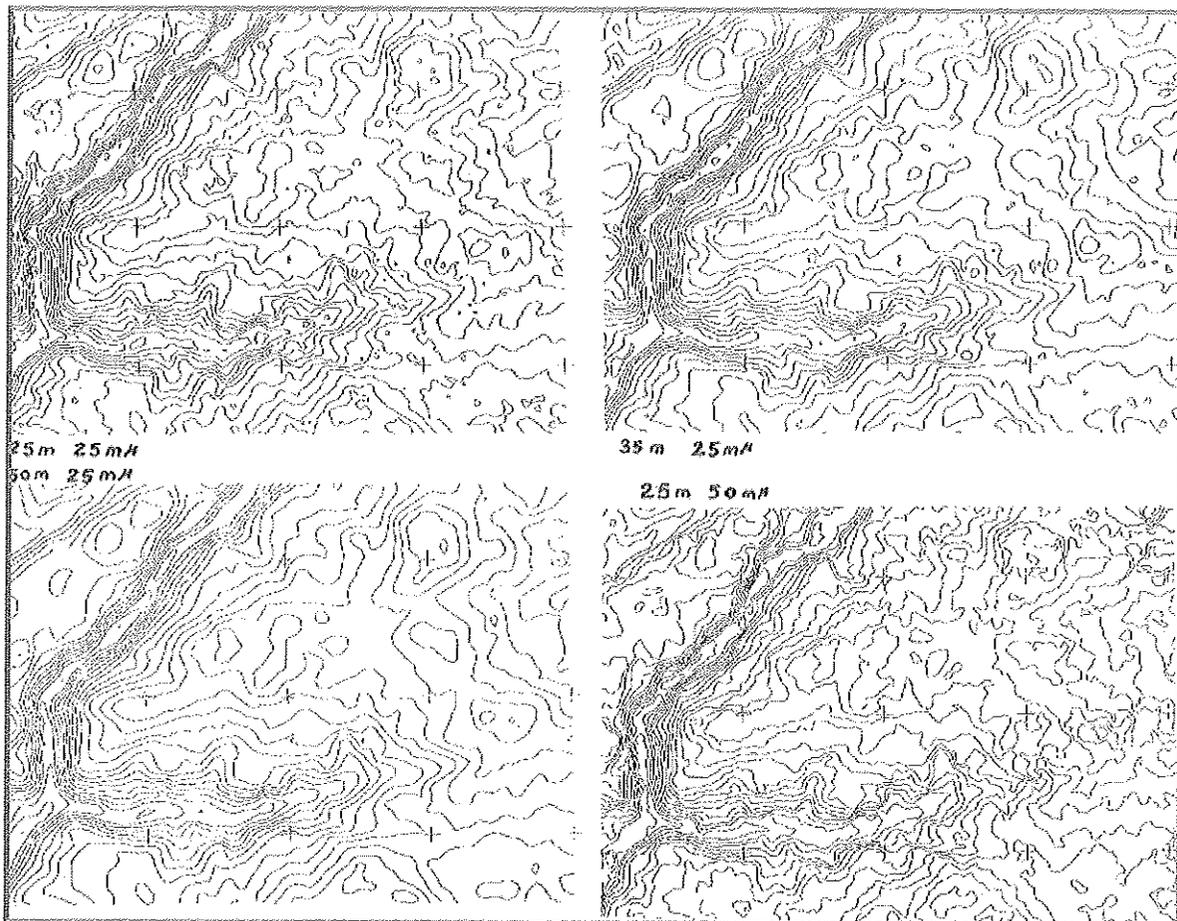


Figura 3.

proceso "se pierde", originando una zona errónea en el MDT, el algoritmo está dotado de una cierta flexibilidad para permitir adaptarlo a cada tipo de terreno, tanto en sus características geométricas como radiométricas:

Existen unos ficheros, llamados de "estrategias", en los que para cada nivel de resolución, se da valores a una serie de parámetros que gobiernan la actuación del algoritmo. Estos son, esencialmente:

- Longitud y anchura de la ventana de correlación.
- Longitud de la zona de búsqueda de posibles homólogos (mayor cuanto más accidentado sea el terreno).
- Parámetros relativos a la función de correlación (criterios para la elección de los picos, umbrales para decidir si una correlación es buena o mala, etc.).

Según nuestros ensayos, la "habilidad" en la construcción y utilización de estas estrategias es muy importante para conseguir que el número y la superficie de las zonas erróneas que se producen en el cálculo automático se reduzca a unos mínimos aceptables.

Los problemas se acrecientan cuando el terreno es muy accidentado, los desniveles son muy grandes, o hay grandes zonas sin detalles "correlables" (bosques cerrados, sombras, etc). En general, en las zonas de montaña las dificultades aumentan considerablemente.

Una forma de operar que hemos encontrado que facilita el trabajo en estos casos, es calcular primero rápidamente un MDT con paso de malla grande (p.ej. ocho veces el definitivo), corregirlo interactivamente, remuestrearlo por interpolación al paso de malla definitivo, y "relanzar" el cálculo de este MDT aproximado, tomando como cota de partida para cada punto la del MDT aproximado (interpolado del de paso mayor).

Para evitar las zonas de sombras (saturadas en negro) o de luces excesivas (saturadas en blanco), es importante partir de unos fotogramas de la máxima calidad fotográfica y no demasiado contrastados. En este aspecto es importante disponer de un equipo de insolación electrónica de copias por contacto (tipo LogElectronics o similar). Sin embargo, es nece-

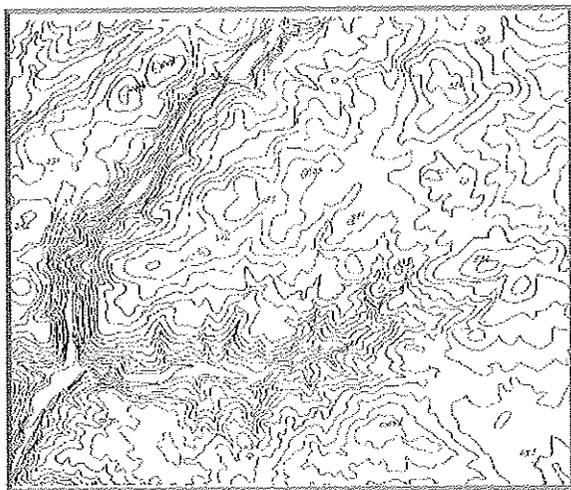


Figura 4.

sario hacer más estudios al respecto y tener en cuenta las características radiométricas de la cámara de digitalización empleada.

5. LA EDICIÓN Y CORRECCIÓN INTERACTIVAS

Como suele suceder en los equipos informáticos, la parte interactiva del software es la más difícil de implementar, y en nuestro equipo es la que menos desarrollada está, aunque se espera que en el futuro se vaya mejorando.

En el HAI-500 hay tres modos de edición y corrección:

- Editor punto a punto: permite modificar la cota de puntos aislados. Funciona bien, pero es muy lento.
- Editor de áreas: útil para dar una cota uniforme a embalses, mar, etc.
- Editor dinámico por perfiles: en teoría es el más adecuado para corregir rápidamente una gran zona errónea. En la práctica, su manejo es difícil, lento y un tanto penoso para el operador. Esto hace que los resultados no sean tan buenos como deberían. En próximas versiones, habrá también un editor de MDT por trazo de curvas de nivel.

Además existen dos herramientas generales, que dan unos resultados un tanto variables:

- Interpolación de puntos malos, que sustituye la cota de los puntos con mala correlación por la interpolada de los adyacentes.
- Interpolación de puntos singulares ("spikes"), que son los que se diferencian excesivamente de su entorno y corresponden por tanto a falsas correlaciones.

En general podemos decir que el punto principal en que tiene que progresar este instrumento es precisamente en la corrección interactiva. Hay que tener en cuenta que esta fase consume una gran cantidad de tiempo de operador y de

consola interactiva en comparación con el resto de los procesos, que son casi totalmente automáticos.

6. PRECISIÓN DEL MDT OBTENIDO

Aunque no hemos hecho todavía una medida exhaustiva de las precisiones obtenidas con distintas escalas de vuelo y distintos tamaños de píxel en la primera digitalización de los fotogramas, podemos dar unos primeros datos que sirvan para apreciar el orden de magnitud de los errores obtenidos.

Con el vuelo a escala 1/70.000 que hemos utilizado, digitalizado a 50 x 50 micras de píxel y calculando el MDT con un paso de malla de 25 m, hemos comparado las cotas obtenidas en los puntos de apoyo y de paso de aerotriangulación, con las cotas de esos mismos puntos obtenidas por interpolación en el MDT final, que abarca una superficie algo mayor a una hoja de MTN 1/25.000.

En estas condiciones obtenemos un e.m.c. de 5,37 m, que resulta coherente (en orden de magnitud) con la precisión allométrica teórica que vimos en el apartado 3, y con la precisión de nuestra aerotriangulación.

Además de hacer un estudio más exhaustivo y riguroso, sería interesante comparar estos resultados con los que se obtienen de un MDT obtenido por medios más clásicos, como por ejemplo el calculado interpolando a partir de las curvas de nivel del 1/25.000 digitalizadas.

7. CALIDAD DEL CURVADO DEL MODELO

Una vez obtenido el MDT de toda la hoja 1/50.000 una de las posibles aplicaciones de este es la representación de la altimetría mediante curvas de nivel.

Para ello se realizaron, mediante un programa de curvado automático, diferentes pruebas. En concreto, se calculó el MDT con pasos de malla de 25, 35 y 50 metros para un tamaño de píxel de 50 micras. Como era de esperar el paso de la malla influye decisivamente en la "rugosidad" de las curvas de nivel, siendo estas más suaves a medida que el paso de malla aumenta y desapareciendo muchas de las curvas cerradas o cotas aisladas que provienen de falsas correlaciones. En este sentido, el aumento del paso de malla actúa como un filtro que elimina parte de estas irregularidades.

En las Figuras 3 y 4 se muestran ejemplos de estos curvados a escala 1/25.000 (calculados con píxel de 25 y 50 micras, y pasos de malla de 25, 35 y 50 metros) comparados con los de restitución fotogramétrica convencional en el I.G.N..

De los resultados obtenidos en el curvado se infieren algunas conclusiones:

- El MDT requiere ser depurado y filtrado previamente al curvado, pues de lo contrario aparecerán toda una serie de cotas aisladas y singularidades que no representan la realidad de la morfología del terreno.
- La edición de las líneas de vaguada mejoraría la forma de las curvas de nivel haciendo que éstas se adaptasen planimétricamente a dichas líneas.
- La influencia del paso de la malla sobre la forma de las

curvas es muy grande, siendo necesario realizar varias pruebas con diferentes densidades de malla y tipos de terreno (llano, ondulado, montañoso). La topografía del terreno es un factor a tener en cuenta en la elección del paso de malla.

8. CONCLUSIONES

Se han presentado en esta comunicación las experiencias realizadas en un restituidor analítico digital y correlador de imágenes. La primera conclusión que puede derivarse es que, a tenor de los resultados obtenidos en las diversas fases del proceso, la obtención del MDT por autocorrelación no es un procedimiento tan automático como cabría esperar. Alguno de los problemas que más frecuentemente surgieron en la realización de este proyecto fueron:

- Sistemática mala correlación en zonas reflectantes o muy oscuras (bosques cerrados, sombras, etc).
- Correlaciones erróneas en áreas montañosas o de

gran variabilidad del relieve (cambios súbitos de pendiente, vaguadas muy pronunciadas, etc).

Para evitar las zonas saturadas en blanco o negro es importante, como ya se apuntó anteriormente, disponer de un equipo de insolución electrónica y calibrar apropiadamente la cámara de digitalización.

Las correcciones erróneas son un problema que requerirá un análisis en profundidad del algoritmo de correlación. La adecuada elección de los parámetros que gobiernan dicho algoritmo y la construcción de diversas estrategias que, en cada caso, se adecuen al tipo de terreno del que se pretende obtener el MDT, podrá dar solución a gran parte de las correlaciones erróneas debidas a la variabilidad del relieve.

La edición y depuración interactiva consumen un excesivo tiempo del operador en comparación con el resto del proceso, siendo además una operación muy penosa, razón por lo cual es importante obtener modelos, en la fase automática, lo más correctos posibles.

9. BIBLIOGRAFIA

- ✓ BURNSIDE, C.D. (1985): *Mapping from Aerial Photographs*.
- ✓ GRUEN, A. W.; MARCH, (1984): *Adaptive Least Squares Correlation*. Concepts and First Results. Intermediate Report, Helava Associates, Inc.
- ✓ HELAVA, U.V. & CHAPPELLE, W.E. SPRING (1972): *Epipolar Scan Correlation*. Bendix Technical Journal.
- ✓ SCHUT, G.H. (1964): Development of programs for strip and block adjustment. (*Photogrammetric Engineering*. 30 (2).
- ✓ THIEDE, J. & DAM, A. (1983): *Hierarchical Relaxation*. Excerpts Advanced Compilation Study. Final Report.