

EL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ORTOFOTOS DIGITALES DEL I.C.C.

I.Colomina
J.Navarro
Institut Cartogràfic de Catalunya
Balmes, 209-211
E-08006 Barcelona

Resumen

Los métodos clásicos de trabajo en fotogrametría han evolucionado muy rápidamente en los últimos diez años. Se ha asistido al paso de las técnicas analógicas a las analíticas y ahora el centro de la atención es el paso a las técnicas digitales. De ellas se esperan mayor automatización en el proceso fotogramétrico (algoritmos de correlación y fotointerpretación), mejoras en la calidad de los productos y, sobretudo, nuevas concepciones en el diseño de instrumentos y métodos de trabajo.

La confección de ortofotomapas es, debido a su simplicidad, una de las primeras operaciones fotogramétricas básicas que pueden ser realizadas íntegramente en forma digital. En este artículo se describen las características y problemática general del diseño de sistemas de generación de ortofotos digitales y los detalles del sistema realizado en el Institut Cartogràfic de Catalunya.

1 Introducción.

Las series de ortofotomapas se han convertido últimamente en habituales dentro del conjunto de series cartográficas que constituyen la cartografía oficial de un país. En las zonas más desarrolladas, los ortofotomapas son un complemento de los mapas de línea y son apreciados porque permiten disponer de información al día. En las zonas menos favorecidas los ortofotomapas representan una alternativa económica y de transición a la cartografía de línea.

El Institut Cartogràfic de Catalunya (ICC) ha dedicado una parte importante de su actividad a la realización de series ortofotográficas en varias escalas: 1:500.000, 1:100.000 y 1:50.000 a partir de imágenes del satélite; 1:25.000 y 1:5.000 a partir de fotografía aérea convencional.

La creciente disponibilidad de bases de datos altimétricos permite la realización de cartografía vía restitución monoscópica. Para escalas medias y grandes, se requiere entonces instrumentación y personal fotogramétrico especializado. Si se dispone de una imagen ortofotográfica, el proceso de restitución monoscópica es en cambio simple. Por ello, con la creciente utilización de Sistemas de Información Geográfica se prevee una demanda importante de ortofotografías que permitan la actualización de la cartografía y, en general, la georeferenciación en sistemas y por usuarios no fotogramétricos.

2 Ortofotos digitales.

Hasta ahora, la confección de ortofotos se han realizado en la mayoría de los casos en ortoproectores analíticos. En los últimos años, de forma paralela, las imágenes obtenidas a través de los satélites de teledetección -ya digitales en origen- se han tratado digitalmente para la producción de ortofotos.

La disponibilidad de ordenadores rápidos (2 - 3 MIPS, 0.5 - 2 MFLOPS), con una gran memoria (10 - 100 Mb), permite la aplicación de las técnicas desarrolladas en el campo del tratamiento digital de imágenes y la teledetección a fotografías convencionales previamente digitalizadas. Las ventajas de la producción digital de ortofotomapas respecto a los métodos convencionales son de tipo económico y de calidad.

La ventaja económica deriva del hecho de que en un sistema digital tan solo el *software* es fotogramétrico, mientras que la instrumentación es *hardware* de propósito general y por tanto, o bien ya se dispone de él o bien se puede adquirir a precios considerablemente menores que los de los ortoproectores.

La mejora en la calidad es tanto geométrica como radiométrica. La técnica de rectificación digital permite la consideración de modelos matemáticos sofisticados del fenómeno fotogramétrico. Pero donde mayores diferencias existen respecto la rectificación analógica realizada por los ortofotoproectores analíticos, es en la posibilidad de aplicar técnicas de proceso digital de imágenes para la mejora de la calidad de la imagen y para el mosaico digital.

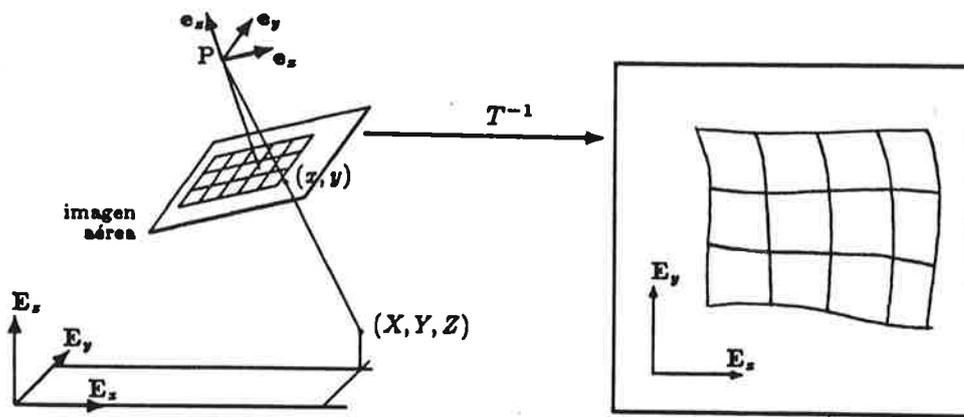


Figura 1: Transformación de la imagen al plano de proyección.

Por todo lo expuesto, en los últimos años se han publicado numerosas propuestas para la realización de ortofotos vía rectificación digital [3, 4,10,13].

En particular, existen sistemas que aunque no incorporan todas las potencialidades de la rectificación digital descritas en las referencias citadas, se pueden considerar como productos comerciales de interés para entornos de producción. Ejemplos son el sistema de *EUDICORT* [6] y el de *ContextMAPPER* [11]. En este artículo se describen las características generales del sistema de rectificación digital de ortofotos desarrollado y operativo en el ICC.

3 Aspectos generales sobre rectificación de imágenes.

Rectificar una imagen para la obtención de una ortofoto es, esencialmente, deformar o corregir la imagen para eliminar las diferencias entre el resultado de proyectar ortogonalmente la superficie del terreno sobre el plano de proyección cartográfico y el resultado de la proyección de la misma superficie sobre el sensor.

La corrección es, por tanto, una transformación bidimensional entre la imagen original y la imagen corregida que ya puede ser referenciada en el plano de proyección (figura 1).

Para propósitos prácticos, es más sencillo utilizar la transformacional inversa, es decir una transformación T que permite asociar a cada posición (X, Y) en el mapa el valor en la escala de grises que corresponde a la posición $T(X, Y)$ en la imagen.

T se puede determinar en base al modelo matemático -transformación P - que describe el fenómeno fotogramétrico entre el terreno y el sensor. Es decir, si el punto del terreno de coordenadas (X, Y, Z) se ha representado en el sensor j y tiene por coordenadas en él (x, y) , la transformación T verifica para el sensor j

$$(x, y) = T(X, Y),$$

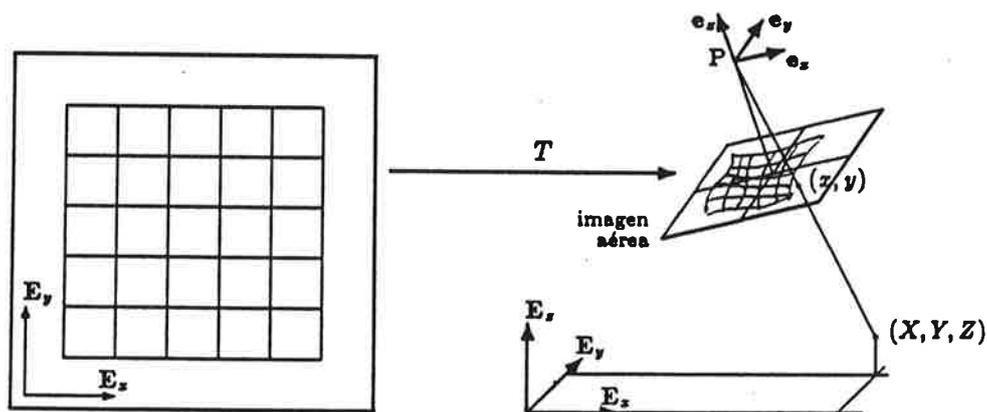


Figura 2: Transformación del plano de proyección a la imagen.

y las dos relaciones equivalentes

$$P(X, Y, Z) = (x, y) \text{ o } P(X, Y, Z) = T(X, Y).$$

En otras palabras, conocida la transformación P , la transformación T se puede obtener como composición de E y P :



$$T = P \circ E;$$

donde E representa la altimetría y, en la práctica, se implementa a través de un modelo digital de elevaciones del terreno (figura 2).

Si no se conoce el relieve con la suficiente exactitud o si las tolerancias lo permiten, se pueden adoptar modelos más simplificados para T , por ejemplo polinomios T_x , T_y en las variables X, Y :

$$x = T_x(X, Y), \quad y = T_y(X, Y).$$

Tanto si se trata de modelos *rigurosos* como si se trata de modelos *aproximados*, se pueden definir los parámetros de orientación de una imagen como los coeficientes que aparecen en la transformación T . Así, por ejemplo, los parámetros de orientación de una imagen pueden ser coeficientes de polinomios. En el caso de fotografías aéreas convencionales son los elementos de orientación externa más los elementos de orientación interna. En el contexto fotogramétrico se conoce el proceso de obtención de los parámetros de T como la *orientación* de la imagen y puede ser algo tan simple como la identificación de puntos de control en la imagen y posterior cálculo (ajuste lineal en los coeficientes del polinomio, trisección inversa espacial, etc), o algo tan complejo como el ajuste de una red fotogramétrica de haces.

El sistema de rectificación digital de fotografía aérea convencional que se describe en este artículo y que en estos momentos funciona en el ICC implementa el modelo perspectivo riguroso vía el acceso a la base de datos de elevaciones del terreno de Cataluña y utiliza parámetros de orientación exterior determinados en aerotriangulación por haces.

Tanto la base de datos de elevaciones como el sistema de aerotriangulación han sido también desarrollados en el ICC ¹.

Otros sistemas de rectificación para imágenes digitales de satélite, también desarrollados y operativos en el ICC están descritos por Palà [12] y por Arbiol [2].

4 Aspectos fotogramétricos generales.

La información requerida para la rectificación digital de fotografías aéreas convencionales es pues:

- la imagen digitalizada,
- el modelo de elevaciones del terreno,
- los parámetros de orientación externa,
- los parámetros de orientación interna.

Para un punto de la ortofoto de coordenadas (X_i, Y_i) en el plano de proyección, hay que obtener la correspondiente cota Z a partir del modelo de elevaciones del terreno. Entonces, las coordenadas de la proyección del punto i sobre la imagen j son (x_i^j, y_i^j) y verifican

$$S_x(x_i^j, y_i^j) = -f \frac{m_{11}^j(X_i - X^j) + m_{12}^j(Y_i - Y^j) + m_{13}^j(Z_i - Z^j)}{m_{31}^j(X_i - X^j) + m_{32}^j(Y_i - Y^j) + m_{33}^j(Z_i - Z^j)}, \quad (1)$$

$$S_y(x_i^j, y_i^j) = -f \frac{m_{21}^j(X_i - X^j) + m_{22}^j(Y_i - Y^j) + m_{23}^j(Z_i - Z^j)}{m_{31}^j(X_i - X^j) + m_{32}^j(Y_i - Y^j) + m_{33}^j(Z_i - Z^j)},$$

donde las funciones S_x, S_y representan las correcciones al modelo perspectivo estricto debidas a la curvatura terrestre, refracción atmosférica, distorsiones calibradas de la cámara y otros errores sistemáticos

¹Información adicional relacionada con el sistema de producción de ortofotos digitales se halla en [3] y [4].

detectados en el ajuste de haces vía parámetros adicionales de autocalibración. En (1) $(X, Y, Z)^j$ y $(m_{pq})^j$ constituyen los parámetros de orientación exterior de la imagen j .

Finalmente las coordenadas (x_i^j, y_i^j) que se refieren al sistema de referencia definido por las marcas fiduciales deben expresarse en el sistema de referencia de la imagen digitalizada, que es donde el correspondiente valor en la escala de grises debe ser interpolado. Esta transformación es similar a la que se realiza a través de los parámetros de orientación interna en los comparadores analíticos. Aquí, la dificultad —a la vez una de las características interesantes— es la identificación del centro de las marcas fiduciales en las esquinas de la imagen digitalizada. En el sistema del ICC la localización de las marcas fiduciales es automática así como la posterior puntería fina que se realiza por técnicas de correlación digital de imágenes (correlación de mínimos cuadrados entre la marca fiducial digitalizada y una marca fiducial patrón sintética). La precisión σ_f de la puntería sobre una marca fiducial es del orden de .025 de *pixel*, que para el digitalizador usado en el ICC (1 *pixel* = 22.7 μm) es de $\sigma_f \approx 0.5 - 0.6 \mu\text{m}$.

La exactitud geométrica de todo el proceso es cercana a la óptima, es decir cercana a las predicciones teóricas que se obtienen al propagar el error introducido por cada uno de los cuatro conjuntos de datos utilizados [3].

5 Aspectos fotogramétricos relacionados con la realización de un Sistema de Ortofoto Digital.

En la sección anterior se ha descrito el proceso de rectificación digital desde un punto de vista teórico. Sin embargo, las limitaciones de velocidad y memoria de los ordenadores actuales condicionan el propio diseño de los algoritmos fotogramétricos.

Los primeros problemas con que se encuentra la implementación de tal sistema son:

- el número de operaciones aritméticas y accesos a disco involucrados en la secuencia de transformaciones descrita en la sección anterior (el número de *pixels* a los que se debe aplicar una rectificación elemental es, para una ortofoto a escala 1:5.000, del orden de 25.000.000),
- el espacio en disco que ocupa una fotografía aérea digitalizada (un fotograma convencional de 23 cm x 23 cm digitalizado a 25 μm ocupa más de 80 Mb).

Además, con el grado de automatización que se alcanza es necesario dotar al usuario con instrumentos de control de calidad de la ortofoto final para detectar eventuales errores de tipo *grosero* (colocación incorrecta de una diapositiva en el digitalizador, errores en los parámetros de orientación y problemas semejantes).

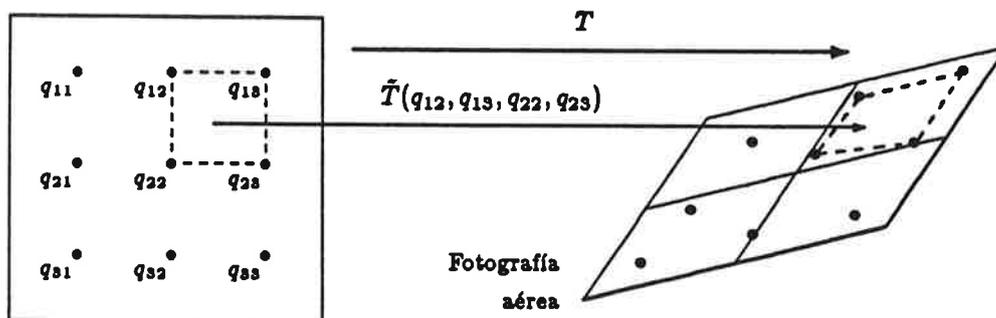
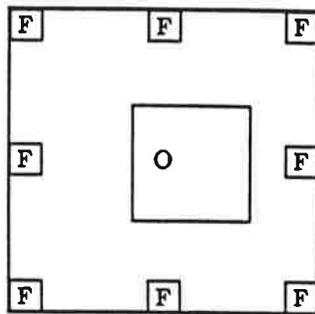


Figura 3: Simplificación del modelo perspectivo.

El número de operaciones aritméticas se puede reducir simplificando la transformación T descrita en 3. Para ello, se aplica T a un número reducido de puntos $\{q_i\}$ del ortofotomapa y a partir de ellos se aproxima T por \tilde{T} que interpola T en aquellos puntos. La distancia entre los q_i es función de la complejidad del relieve y de la precisión requerida y en la práctica, se suele tomar como la distancia entre los puntos consecutivos del modelo de elevaciones. Si, en el caso de la serie de ortofotomapas 1:5.000 de Cataluña, se tiene en cuenta que la dimensión del *pixel* en la ortofoto es de aproximadamente 0.5 m y que la distancia entre puntos del modelo de elevaciones es de 15 m, el número de rectificaciones elementales



F: zona de correlación de las marcas fiduciales

O: zona de rectificación efectiva

Figura 4: Zonas de digitalización efectiva.

rigurosas se reduce en un factor de 900. En el sistema descrito en [9], la transformación \tilde{T} es realizada por un sistema de proceso de imagen a partir de la plantilla de deformación definida por los $\{q_i\}$. En el sistema desarrollado en el ICC ², \tilde{T} se obtiene por medio de interpolación bilineal para cada cuadrado definido por cuatro q_i contiguos tal como se representa en la figura 3.

El espacio en disco requerido puede reducirse si se digitalizan sólo aquellas zonas de la imagen que se utilizarán en la generación de la ortofoto. En el caso sencillo de que el ortofotomapa esté contenido en una sola imagen la figura 4 muestra las zonas de interés.

Esto supone un ahorro del orden del 65% en espacio en disco, a la vez que se complica el sistema de digitalización e introduce otro módulo adicional para proyectar las esquinas de hoja en el fotograma a digitalizar para la determinación de la zona O.

Con ello, el factor que limita la relación de escala entre fotografía aérea y ortofotomapa (normalmente entre 3 y 5 [1]) es, en condiciones normales de producción, la combinación entre el tamaño del *pixel* utilizado en la digitalización y la resolución de la imagen analógica original.

6 Aspectos generales de diseño de un SOD.

Tal y como se ha descrito en el apartado 4 el sistema de generación de ortofoto digital (SOD) requiere un modelo de elevaciones del terreno, parámetros de orientación diversos y una imagen digitalizada. Además de este conjunto de datos fundamentales, la generación de la ortofoto requiere un número notable de información y datos adicionales. Aunque desde el punto de vista fotogramétrico estricto estos últimos son datos auxiliares, en la práctica se convierten en igualmente esenciales. Se trata de detalles tales como la definición de las esquinas de la ortofoto, el control del movimiento de cintas, la determinación de la parte de las fotografías aéreas a digitalizar o la organización del control de calidad al que debe someterse cada ortofoto antes de su publicación.

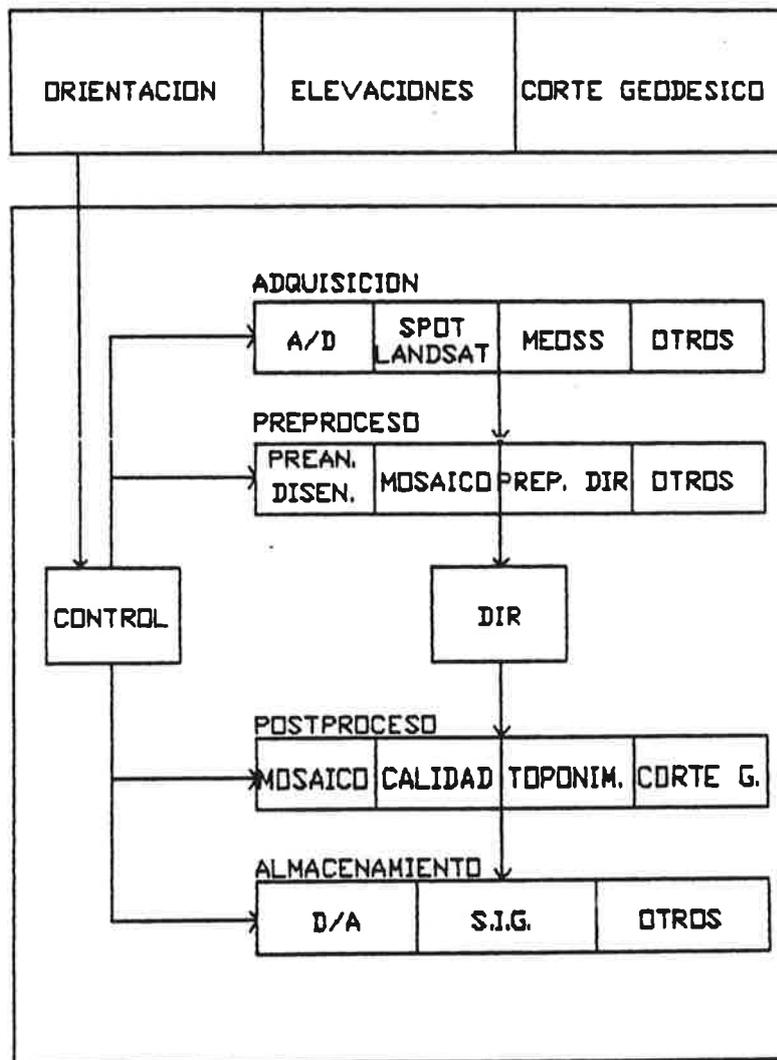
Las fuentes de información discutidas en la sección 4 pueden ser clasificadas en diferentes sistemas fotogramétricos de transformación o almacenamiento de información con entidad propia (ver figura 5).

- Elevaciones del terreno.
- Corte geodésico.
- Orientación.

Estos sistemas son independientes del proceso de rectificación digital de forma que en una organización en que se desarrollan actividades fotogramétricas, un SOD es un sistema más a añadir a la lista anterior. En particular, éste se compone de los siguientes subsistemas:

- Adquisición de imágenes.

² Como se discute en [3] la simplificación \tilde{T} no introduce errores y, en algunos casos, puede representar una característica de filtraje en modelos de elevaciones con ruido excesivo.



- Preprocesado en general.
- Postprocesado de imágenes digitales rectificadas.
- Representación y almacenamiento.

Las funciones desempeñadas por los subsistemas descritos son:

Adquisición de imágenes. Se encarga de obtener la imagen que será utilizada para llevar a cabo la rectificación digital. Las imágenes originales a partir de las cuales se genera la digital pueden estar representadas de diversas maneras: fotografía aérea clásica, satélite, MEOS en el futuro, etc.

Preproceso en general. Soporta un conjunto de operaciones previas a la rectificación, tales como la definición de la zona de costura de un mosaico o la definición de los parámetros de rectificación de la ortofoto (o bloque de ellas) en curso, etc.

Postproceso de la imagen digital rectificada. Se encarga de efectuar determinadas operaciones sobre la imagen rectificada, tales como mosaico (para zonas donde haya una fuerte oclusión), control de calidad, edición digital de la toponimia, extracción de subescenas para ceñir el resultado al marco definido por las esquinas de hoja, etc.

Representación y almacenamiento. Se ocupa de representar o almacenar la ortofoto resultante para su uso posterior. Existen diferentes vías de realizar este propósito; como ejemplo pueden ser citadas las siguientes: generación de una copia sobre papel vía un *raster-plotter* (en general conversión de digital a analógico); almacenamiento de la ortofoto o de la información pertinente de la misma, en un sistema de información geográfico (SIG), etc.

Como último punto a considerar, remarcar que es necesaria la existencia de un *subsistema de control* que coordine la actuación de las diferentes partes hasta ahora descritas. Algunas de las funciones que tendría que realizar son:

- Garantizar la validez de los datos necesarios para procesar una nueva ortofoto y la secuencia de fases necesarias para obtenerlos.
- Conocer continuamente el estado global de proceso.
- Ofrecer una interficie de comunicación entre el usuario y el SOD.
- Garantizar el *feedback* necesario en los casos de error en alguna de las fases de la generación de la ortofoto. Esto implica la detección de los posibles problemas, su corrección si es posible y, por último, el reprocesado con los nuevos parámetros obtenidos.
- Procurar un mecanismo de recuperación en caso de colapso del sistema informático.

En la figura 5 se describe como interaccionan los distintos subsistemas de un SOD y cómo el propio SOD interacciona con el resto de sistemas fotogramétricos. En ella se observa la independencia del SOD de los sistemas de elevaciones del terreno, corte geodésico y orientación.

El esquema de la figura 5 es un esquema ideal. Aunque puede simplificarse, siempre hay que respetar ciertos sistemas. Los ya citados de elevaciones del terreno, corte geodésico y orientación son imprescindibles aunque sean posibles distintos grados de complejidad.

Los subsistemas del SOD pueden no realizar todas las funciones descritas previamente. Por ejemplo, si la imagen contiene a la ortofoto, ésta se puede generar aunque los subsistemas de pre y postprocesado no dispongan de las funciones de mosaico. Asimismo, el subsistema de adquisición puede limitarse a un solo tipo de imágenes en un formato particular. Por último, también pertenece a esta categoría de subsistemas la parte de representación y almacenamiento del producto.

De lo anterior se deduce que existe un número importante de posibilidades diferentes a la hora de configurar un SOD. Escoger la más conveniente es tarea de cada organización. Como ejemplo, en las secciones siguientes se discute la configuración adoptada en el ICC.

7 Realización de un SOD en el Institut Cartogràfic de Catalunya.

El SOD del ICC es operativo desde julio de 1988. Dicho sistema sigue la modelización expuesta en el apartado anterior, si bien no dispone aún de todas las funcionalidades relacionadas con los subsistemas de adquisición, pre y postproceso de imágenes y almacenamiento y representación del producto. Es, por tanto, una primera aproximación a un sistema más amplio en el cual ya se está trabajando.

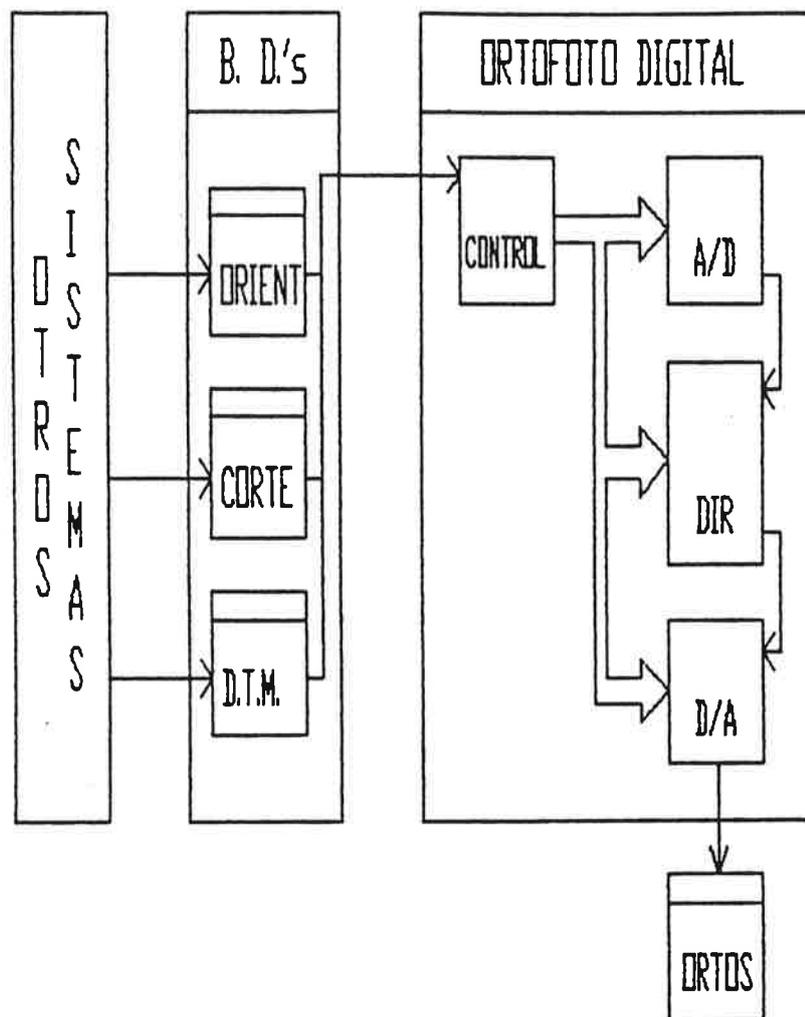


Figura 6: SOD del ICC: esquema general.

7.1 Descripción general.

En la figura 6 puede apreciarse la estructura lógica y las interrelaciones entre los diferentes componentes de este sistema de producción de ortofotos digitales. Los sistemas independientes del SOD son la Base de Datos DTM, el del corte geodésico y el de orientación. Los subsistemas que constituyen el SOD son el de conversión A/D, el de DIR o procesado digital, el de conversión D/A y el de control.

Los tres sistemas que proporcionan la información fundamental al SOD constituyen, en principio, sistemas independientes. En el ICC estos tres sistemas han sido operativos con anterioridad al SOD y gozan de propiedades de accesibilidad y normalización que permiten un considerable nivel de automatización.

Así, desde el punto de vista del SOD, una característica esencial del sistema Base de Datos DTM es la posibilidad de hacer consultas *on line* contra él. En concreto, la base de datos se está cargando con modelos digitales compilados en distintos instrumentos: estereocomparadores analógicos, analíticos y el *Gestalt Photomapper IV (GPM-IV)*.

El sistema de determinación de las esquinas de hoja (aplicación *TALL*) puede también ser accedido *on line* y soporta la definición de cortes geodésicos a la medida del usuario.

En el SOD propiamente dicho podemos distinguir hasta cuatro partes diferenciadas, las cuales son fruto de una simplificación del esquema genérico expuesto arriba (figura 5).

Conversión A/D. Es, por decirlo de una forma más general, un sistema de adquisición de imágenes que por el momento sólo permite digitalizar fotos aéreas.

DIR o procesado digital. Es el encargado de aplicar las correcciones necesarias a las imágenes digitalizadas previamente. Asume además tareas de mejora de la radiometría y ajuste al corte geodésico

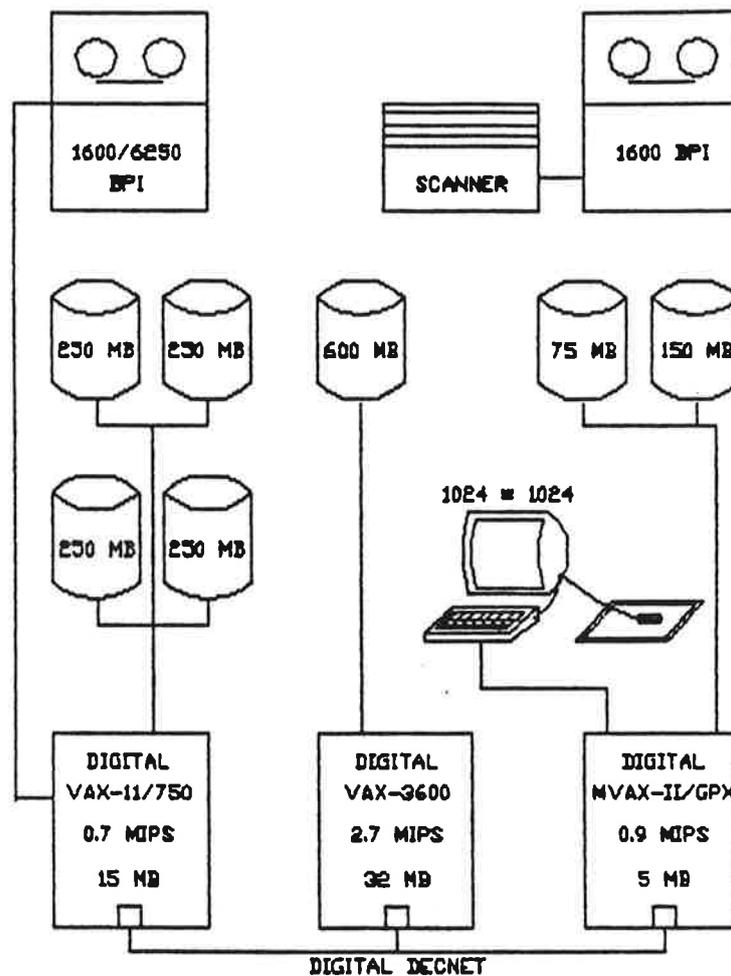


Figura 7: SOD del ICC: configuración utilizada.

en uso (1:5.000). Es decir, toma para si funciones de un posible sistema de postproceso.

Conversion D/A. A partir del producto final obtenido en el paso anterior, se genera una representación de aquél apta para su reproducción en un *raster-plotter*. Es un sistema de almacenamiento y representación del producto que tan sólo dispone de una modalidad de operación.

Control. Es un sistema de gestión y seguimiento de la producción. Se encarga de asegurar que los datos necesarios para la generación de un determinado conjunto de ortofotos están disponibles y son correctos. Asimismo sigue las incidencias de producción tomando nota de todos los cambios producidos y, si la ocasión lo requiere, actúa para corregir posibles errores y relanzar un proceso.

7.2 Configuración.

A partir de ahora nos centraremos principalmente en el subsistema DIR si bien pueden surgir referencias a los otros tres componentes más relacionados con aquél: "Conversión A/D", "Conversión D/A" y "Control". La configuración utilizada para soportar el proceso de rectificación digital y la conversión A/D está representada en la figura 7. El sistema de conversión D/A no pertenece al ICC. Se han contratado los servicios de una empresa especialista del sector de artes gráficas. El tipo de *raster-plotter* de salida genera un fotolito ampliado a la escala del ortofotomapa. La interfície con este sistema se realiza vía cinta.

Como *scanner* (tipo *flat bed*, *pixel* de $22.7 \mu m$) se ha utilizado una parte del *GPM-IV* con *hardware* y *software* adicionales desarrollados por el propio ICC [7].

De los recursos descritos, DIR necesita como mínimo:

- El *scanner* y su armario de cinta para almacenar la imagen digitalizada.

- El armario de cinta y 70 Mb repartidos en dos discos del VAX-11/750. El espacio reservado permite almacenar *on line* dos imágenes digitales: una lista para ser rectificada (hasta 40 Mb en casos muy desfavorables) y otra ya procesada y lista para ser grabada en cinta (unos 25 Mb), así como el *software* necesario.
- 120 Mb en el disco disponible del VAX-3600. Esto permite almacenar hasta dos imágenes listas para rectificar y otra ya procesada.
- El terminal gráfico y 7.5 Mb del disco de 150 Mb del MVAX-II/GPX, así como *software* especial de proceso de imágenes desarrollado por el propio Instituto.

A la vista de las necesidades de DIR y del reparto de recursos efectuado, se observa cierta repetición en las asignaciones de espacio en los diferentes computadores: existen reservas en tres sistemas diferentes para mantener "imágenes a rectificar" e "imágenes ya procesadas". De hecho esta redundancia existe en cierta manera, pero como se verá más adelante, es fruto de la organización del proceso de rectificación.

Es importante advertir que si bien esta configuración se adapta bien a las necesidades de cálculo, almacenamiento y proceso de imagen que la rectificación digital plantea, no es, por supuesto, la única posible. Existen múltiples combinaciones válidas que resuelven el problema. La selección de la que se describe en la figura se efectuó tras evaluar cuidadosamente los recursos disponibles y cuál era la mejor manera de aprovecharlos, teniendo en cuenta que las instalaciones del ICC tenían que atender a otros procesos productivos ya en curso o en desarrollo. En [5] se describe un intento previo de configuración de un SOD.

En relación con este problema, se han efectuado simulaciones que permiten evaluar el rendimiento teórico de otras configuraciones (sección 8).

7.3 El subsistema DIR.

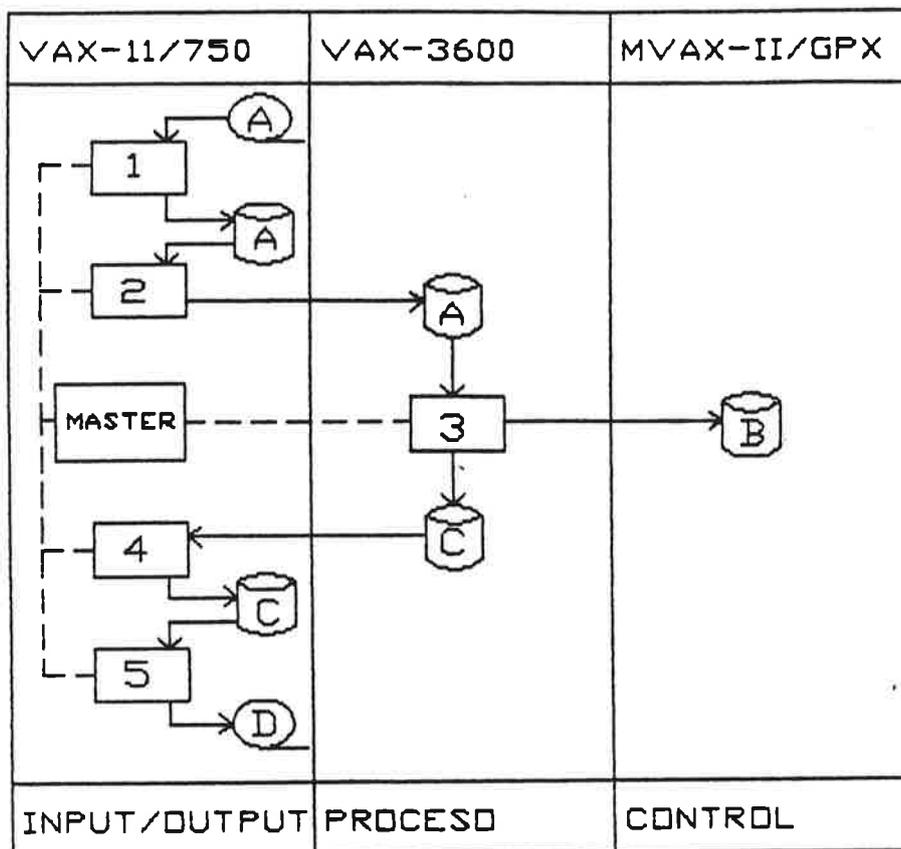
Del sistema de rectificación digital del ICC hay que destacar cinco características de interés remarcable: concepción *batch*, de tipo *pipeline*, *distribuido*, *flexible* y *robusto*. Para conseguir estas características se han aprovechado las posibilidades que ofrece el entorno VAX/DECNET.

1. Es un sistema *batch* altamente automatizado con bajísima intervención humana. De hecho, los operadores del centro de cálculo tan solo han de preocuparse de montar y desmontar las cintas con las imágenes de entrada y la ortofoto generada.
2. Es un sistema tipo *pipeline*, es decir, dividido en diferentes fases o etapas. Esto hace que sea posible *solapar la rectificación de diferentes ortofotos*, lo cual incide en los índices de producción. En el apartado 8 aparecen los resultados (ya citados previamente) de varias simulaciones efectuadas para evaluar el impacto de ésta y otras características en el comportamiento del sistema.
3. Es un sistema *distribuido* en el cual las fases del proceso global de rectificación se efectúan en los diferentes ordenadores de la configuración seleccionada. Esto origina un mayor aprovechamiento de las características de cada uno de los nodos de la red y por tanto un mayor rendimiento. Asimismo, en caso de caída de uno de los ordenadores, el resto puede seguir trabajando, lo que incide en el aspecto de la productividad.
4. Es un sistema *flexible*. El sistema de rectificación digital ha sido diseñado y realizado teniendo en cuenta que el conjunto de recursos disponibles puede alterarse con el tiempo. En el caso de producirse una modificación de los citados recursos, DIR puede ser reinstalado sin necesidad de cambios en el *software*.
5. Es un sistema *robusto*. Se ha previsto un mecanismo de recuperación en caso de caída del entorno informático que permite el reinicio de DIR con una pérdida mínima de información.

7.3.1 Repartición general de tareas entre los diferentes elementos de la configuración.

Si se clasifican las etapas de la rectificación digital de acuerdo con el criterio ENTRADA / PROCESO / CONTROL DE CALIDAD / SALIDA se observa que:

- El VAX-11/750 se ocupa de todo aquello relacionado con la ENTRADA y la SALIDA, ya que es el que dispone en la configuración actual del armario de cinta para leer nuevas imágenes a rectificar y generar las cintas con las ortofotos tal y como las necesitará el *raster-plotter*.



1 = INPUT A = IMAGEN DIG. ORIGINAL
 2 = TRANSFERIR B = IMAGEN CONTROL
 3 = RECTIFICAR C = ORTOFOTO DIGITAL
 4 = TRANSFERIR D = OUTPUT PARA PLOTTER
 5 = OUT. RASTER

Figura 8: SOD del ICC: proceso de rectificación digital.

- El VAX-3600 es el encargado del proceso principal de cálculo, debido a la mayor potencia de su CPU (2.7 MIPS).
- El MVAX-II/GPX se utiliza, gracias al hardware y software gráfico de que dispone, para llevar a cabo el control de calidad visual.

La figura 8 muestra esta clasificación de las fases de DIR.

7.3.2 Fases en la producción de una ortofoto: esquema de proceso.

La figura 8 muestra un esquema general del proceso de una ortofoto tal y como se efectúa en la configuración disponible.

Para generar una ortofoto son necesarias cinco fases diferentes:

1. *Lectura de la cinta con la imagen digitalizada.* Es decir, se efectúa vía armario de cinta el traspaso de la información obtenida por el sistema de digitalización.
2. *Transferencia de la imagen original al ordenador de rectificación.* La imagen digital leída en la fase anterior se transmite al computador que por su potencia de CPU es el más adecuado para cargar con la tarea de procesarla.

3. *Rectificación, mejora, ajuste al corte en uso y generación de la imagen de control de calidad.* La ortofoto para el control de calidad (0.8 Mb) es una réplica del producto final pero con un número de *pixels* reducido: el suficiente para un control visual de la calidad del producto obtenido. Esta imagen se envía al *MVAX-II/GPX*.
4. *Transferencia de la imagen final al ordenador de entrada/salida.* Se transmite la ortofoto al nodo que dispone del armario de cinta.
5. *Generación de la cinta para el raster-plotter.* La ortofoto obtenida en la cuarta fase se graba en una cinta para su posterior impresión de acuerdo con las especificaciones de almacenamiento correspondientes.

Las fases 2 y 4 podrían haberse evitado ya que es posible generar y acceder a información remota a través de *DECNET*. La inclusión de aquellas se ve justificada por un aumento en la fiabilidad y robustez del sistema. Es por esta razón que es necesario disponer de espacio en disco en los diferentes ordenadores de la red.

El encadenamiento de las cinco fases es realizado por medio de un proceso *master* que conoce cual es la configuración que se está utilizando (desde el número de ordenadores hasta el espacio disponible en disco en cada uno de ellos) y el uso que de ella se está haciendo en cada momento. Cada una de las fases descritas notifica al *master* que ha acabado su parte de la tarea y en qué condiciones —satisfactoriamente o no— lo ha hecho. Ante una notificación, este proceso de control decide poner en marcha una nueva fase o rechazar una ortofoto durante la generación de la cual se haya producido un error. En el caso de que tenga que continuar con el procesado de una ortofoto, el *master* ha de esperar a que los recursos necesarios estén disponibles (por ejemplo, para lanzar la quinta fase es imprescindible que el armario de cinta no esté ocupado).

7.3.3 *Pipelining.*

La fragmentación del proceso de rectificación digital en cinco fases y el encadenamiento de éstas por medio del proceso *master* convierte a DIR en un sistema de tipo *pipeline*.

La ventaja de esta concepción radica en la posibilidad de procesar varias ortofotos al mismo tiempo. Es decir, una ortofoto comienza a ser tratada antes de que la anterior haya sido finalizada o, equivalentemente, al finalizar una ortofoto las posteriores han sufrido ya parte del proceso. Esto eleva el rendimiento del sistema.

Además puede incrementarse la capacidad de una fase aumentando el número de recursos asignados a ésta. De esta manera pueden suavizarse las diferencias producidas por tiempos de proceso dispares en las fases de DIR, evitando o reduciendo lapsos de espera entre etapas. Por ejemplo: si se destina espacio para dos imágenes en el ordenador que efectúa la rectificación, este proceso no sufrirá interrupciones por falta de imagen de entrada, ya que cuando finalise con una la otra estará disponible, y mientras se rectifique ésta última la otra podrá ser reemplazada por una nueva.

Evidentemente no es posible sobredimensionar el *pipeline* indefinidamente. El volumen limitado de recursos es la primera razón y la segunda la diferencia de tiempo de procesado entre algunas fases que origina cuellos de botella en determinados puntos del sistema. Carece de sentido leer cincuenta imágenes por día si alguna de las etapas de DIR no puede procesar más de cinco (por ejemplo).

La configuración actualmente utilizada en nuestro sistema DIR permite los siguientes grados de multifase:

Fase 1: Una sola imagen en disco (*buffers = 1*).

Fase 2: Se pueden enviar hasta dos imágenes al ordenador de rectificación. (*buffers = 2*).

Fase 3: Una única rectificación a la vez.

Fase 4: Solamente puede enviarse una imagen final al ordenador de E/S (*buffers = 1*).

Fase 5: Al disponer tan sólo de un armario de cinta, sólo puede generarse una cinta a la vez.

Como puede observarse, solamente la fase 2 puede procesar dos ortofotos al mismo tiempo. Esto es debido a las limitaciones de espacio en disco y a la existencia de un solo armario de cinta.

En la figura 9 se muestran algunos ejemplos de solapamiento en la generación de varias ortofotos.

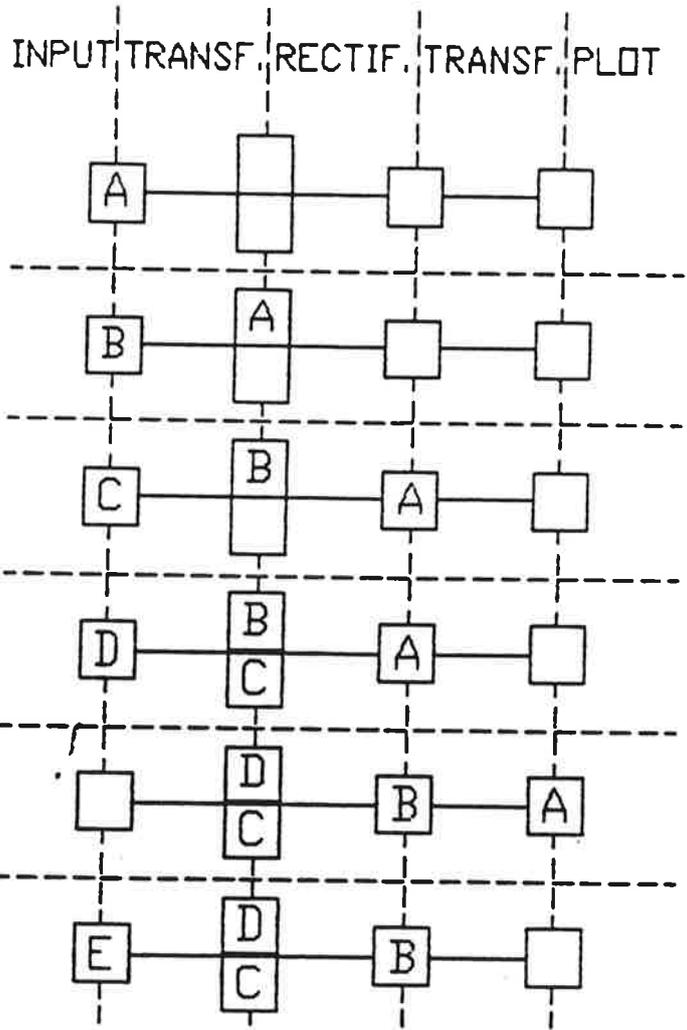


Figura 9: *Pipelining.*

FASE	VAX-11 / 750		VAX-3600		MVAX II / GPX
	CPU (min)	DISCO (Mb)	CPU (min)	DISCO (Mb)	DISCO (Mb)
LECTURA	5	40	-	-	-
TRANSFERENCIA	5	-	-	40	-
RECTIFICACIÓN	-	-	35	40	0.8
TRANSFERENCIA	5	30	-	-	-
GENERACIÓN CINTA	20	-	-	-	-
TOTAL	35	70	35	80	0.8

Tabla 1: Costos en la producción de una ortofoto.

8 Costos y rendimiento.

En la tabla 1 se dan los costos en cuanto a tiempos de CPU y ocupación de disco para cada ordenador y fase. Nótese que estos son los costos en los que se incurre al producir una ortofoto.

El sistema de rectificación digital está activo unas catorce horas diarias aproximadamente (de las 18:00 de un día a las 8:00 del siguiente), compitiendo por un recurso vital como es el armario de cinta del VAX-11/750 con otras cadenas de producción del Instituto. Sería difícil y complejo describir en profundidad las condiciones de carga de la configuración sobre la que se trabaja y por ello no nos extenderemos más al respecto. Comoquiera que sea, el rendimiento teórico (obtenido por medio de una simulación del sistema tal y como se ha descrito) en condiciones de no competencia por los recursos y suponiendo la producción de ortofotos como un proceso libre de errores oscila alrededor de las diez ortofotos por día de catorce horas. El rendimiento real, obtenido en condiciones no ideales (competencia de recursos) conduce a un rendimiento que oscila en torno a las cinco.

8.1 Datos para otras posibles configuraciones.

Hasta el momento se han dado resultados para el SOD realizado por el ICC. También es interesante estudiar el comportamiento de otras configuraciones. Para ello se han realizado simulaciones que evalúan el rendimiento teórico de un sistema de rectificación digital configurado de diferentes maneras. Las condiciones de la simulación son las ya expuestas en el punto 8: no competencia por recursos vitales con otros posibles sistemas de producción y procedimiento libre al 100% de errores. Los datos obtenidos servirán para comparar entre las diferentes alternativas, aunque no directamente para establecer el rendimiento de éstas. Este último punto requeriría un conocimiento profundo de la carga a la que se viese sometida la configuración seleccionada.

Las configuraciones probadas son:

1. Una versión estrictamente *monomáquina* y *monolítica* o *monofase*. Es decir, considerando el sistema desde el punto de vista clásico: procedimiento *batch* único sin posible solapamiento entre diferentes ortofotos y en un solo ordenador.
2. Una versión *monomáquina* pero dividida en fases. En este caso, las etapas 2 y 4 del proceso de generación de ortofotos desaparecen, ya que no es necesaria la transferencia entre ordenadores. Para

<i>BUFFERS ENTRADA</i>	1	2	1	2	3	3
<i>BUFFERS SALIDA</i>	1	1	2	2	2	3
<i>ORTOFOTOS/DÍA</i>	6	6.5	6	10.8	10.8	10.5

Tabla 2: Rendimiento de la configuración monomáquina y multifase.

esta versión se han efectuado diversas pruebas variando la capacidad de *buffering* de las etapas de entrada y rectificación (es decir, el número de imágenes que pueden coexistir en disco sin que se estén rectificando y el número de imágenes rectificadas que a su vez pueden ser mantenidas a la vez sin ser grabadas en cinta).

3. La actualmente en producción, cuyos resultados ya se han discutido.

En la discusión que sigue, se han utilizado los datos que aparecen en la tabla 1. Para el diseño monomáquina y monolítico resultan 6 ortofotos por día (14 horas). En la tabla 2 se dan los resultados para el diseño monomáquina por fases. De ésta tabla pueden extraerse conclusiones útiles para el diseño de nuevos sistemas:

- a) La configuración 1/1 tiene el mismo rendimiento que el modelo monolítico. Esto es así ya que al no poder procesar más de una ortofoto por fase el sistema se convierte en un único bloque. No puede empezar a rectificarse una ortofoto hasta que ha liberado todos los recursos necesarios; eso no sucede hasta que no ha sido grabada en cinta.
- b) No interesa incrementar de forma asimétrica el número de *buffers* para entrada o salida: no se obtienen incrementos de producción que compensen el costo de almacenamiento adicional en disco. Y es lógico: de nada sirve mantener más imágenes en disco si no puede dárseles salida a un ritmo mayor o, de forma opuesta, es inútil disponer de una gran capacidad de generación de cintas de salida si el sistema no acepta un número equiparable de entradas.
- c) No interesa aumentar indefinidamente el número de *buffers* de entrada y salida por dos razones. En primer lugar, aunque se disponga de una gran cantidad de espacio en disco, el proceso de rectificación propiamente dicho necesita un cierto tiempo para realizarse. Esto significa que una vez que se supera el cuello de botella representado por las operaciones de cinta nos encontramos con otro en el proceso de rectificación. En segundo lugar, al aumentar el número de posibles entradas (por incrementar el número de *buffers*) se interfiere cada vez más con las operaciones de salida, que son las que en definitiva definen la productividad global del sistema.

9 Conclusiones.

El resultado de los experimentos y prototipos realizados desde principios del año 1986 en el ICC en la generación de ortofotos digitales por medio de rectificación digital, es un sistema operativo desde mediados del año 1988. Las próximas extensiones y/o innovaciones corresponderán a los subsistemas de preanálisis/diseño de vuelos fotogramétricos para ortofoto [4], subsistema de control de calidad y subsistema de mosaico. El sistema actual funciona de forma satisfactoria y, en condiciones normales, puede producir cinco ortofotos por día de 14 horas (en el marco del entorno y carga descritos). Desde comienzos de 1989, la configuración informática será monomáquina y multifase 2/2 sobre una estación de trabajo. El rendimiento esperado es de 10 ortofotos / 14 horas.

Desde un punto de vista fotogramétrico, es clara la tendencia a la rectificación digital como instrumento principal para la obtención de ortofotografías en el futuro [3, 4, 8, 9,13]. Además de un nivel óptimo de calidad geométrica, la rectificación digital permite la utilización de las técnicas de proceso de imagen; en particular la mejora radiométrica y el mosaico digital. Asimismo, se pueden implementar nuevos conceptos [4] que añaden nuevas posibilidades a los sistemas de producción de ortofotos.

Desde un punto de vista de diseño del sistema, dada la complejidad del proceso y dadas las conexiones inevitables con otros sistemas (base de datos de elevaciones del terreno, sistema de cálculo de esquinas de hojas, sistema de orientación de imágenes, datos de calibración de cámaras, etc.) se requieren diseños altamente sofisticados. Esto queda demostrado en la sección anterior. En el caso del sistema objeto de este artículo hay que destacar la estrecha colaboración que se materializó en innumerables reuniones conjuntas de trabajo entre los futuros usuarios del sistema, el equipo que realizó la versión definitiva y los expertos en fotogrametría y proceso de imágenes digitales.

Referencias

- [1] Ackermann,F., 1987. The use of camera orientation data in photogrammetry - A review. *Photogrammetria*, Vol. 42, pp. 19-33.
- [2] Arbiol,R., Romeu,J., Viñas,O., 1986. Réalisation de cartographie en fausse couleur a partir de données *LANDSAT*. *EUROCATO 5*, París, pp. 25-28.
- [3] Arbiol,R., Colomina,I., Torres,J., 1987. Experiences with *Gestalt DTM* for digital orthophoto generation. *ASPRS-ACSM Convention*, Baltimore, Vol. 4, pp. 177-187.
- [4] Arbiol,R., Colomina,I., Torres,J., 1987. A system concept for digital orthophoto generation. *Actas de la Intercomission Conference on Fast Processing of Photogrammetric Data*, Interlaken, pp. 387-403.
- [5] Colomer,J.L., 1987. Configuring a production system for Digital Orthophoto Generation. *Informe interno del ICC*.
- [6] *EUROSENSE*, 1988. Digital Orthophoto System - A new age for digital cartographic applications. *Commercial brochure*.
- [7] Fernández,J., 1986. An overview to the Diniralt system. *Informe interno del ICC*.
- [8] Helava,U.V., 1988. On system concepts for digital automation. *International Archives of Photogrammetry*, Vol. 27, Comm. II, pp. 171-190.
- [9] Houssay,P., Brossier,R., 1988. Digital Orthophotograph at IGN-France. *International Archives of Photogrammetry*, Vol. 27, Comm. IV, pp. 346-352.
- [10] Mayr,W., 1988. A contribution to digital orthophoto generation. *International Archives of Photogrammetry*, Vol. 27, Comm. IV.
- [11] Müller,W., Saulea,H., 1988. Orthophoto Production in the new *ContextMAPPER* System. *International Archives of Photogrammetry*, Vol. 27, Comm. II, pp. 224-233.
- [12] Palà,V., Arbiol,R., 1987. Restitución de imágenes *SPOT* a partir del Modelo Digital del Terreno. II Reunión del Grupo de Trabajo en Teledetección, Valencia, pp. 95-101.
- [13] Wiesel,J., 1985. Digital image processing for orthophoto generation. *Photogrammetria*, Vol. 40, pp. 69-76.