

Sensores hiperespectrales aerotransportados.

Eliminación del efecto de deriva

Cristina Portalés Ricart, José Luis Lerma García
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Geodésica, Cartográfica y Topográfica
Universidad Politécnica de Valencia. 46022 Valencia. Camino de Vera, s/n

RESUMEN

En este artículo se explican los conceptos básicos de los sensores hiperespectrales rotacionales aerotransportados. Así mismo, se hace una revisión de las diferentes circunstancias causantes de los errores en la formación de las imágenes y se propone una metodología para corregirlas. A continuación, mostramos un ejemplo práctico en el que se observa cómo la consideración y eliminación del efecto de deriva permite georreferenciar con alta precisión imágenes hiperespectrales tomadas con sensores rotacionales.

1. INTRODUCCIÓN

Con el avance de las nuevas tecnologías digitales en las últimas décadas, los sensores digitales aerotransportados se han introducido en el campo de la fotogrametría de manera indiscutible. Hasta el momento, los sensores más utilizados y extendidos han sido los sensores matriciales y los sensores lineales. Los primeros no han llegado a sustituir a sus homólogos analógicos debido, entre otros aspectos, a las resoluciones geométricas que ofrecen. Los sensores matriciales convencionales suelen contar con resoluciones de 3K x 2K, 4K x 4K ó 7K x 4K píxeles, si bien los sensores matriciales modulares solucionan en parte este problema. Los segundos ofrecen buenas resoluciones (1 x 12K), son baratos y sencillos de montar, y, en el caso de sensores multilineales, la captura siempre es estereoscópica. Además, ambos tipos de sensores pueden resolver de manera independiente el registro de información multiespectral [Lerma, 2002].

En otro orden de ideas, la creciente demanda de datos hiperespectrales, por ejemplo en el ámbito geológico o en aplicaciones medio ambientales, ha impulsado la introducción aerotransportada de un tercer tipo de sensores: los sensores rotacionales (*whiskbroom scanners*) también conocidos como sensores puntuales o de barrido. Estos últimos se vienen utilizando en el ámbito de la teledetección, aunque su uso aerotransportado es de reciente aparición gracias a la tecnología GPS/INS. La mayor

estabilidad de los satélites permitía que las imágenes pudieran corregirse con transformaciones geométricas sencillas, mientras que la gran inestabilidad de los aviones impedía solucionar el problema geométrico de las imágenes con metodologías convencionales.

2. SENSORES DIGITALES AEROTRANSPORTADOS: PRINCIPIOS BÁSICOS

Al hablar de sensores digitales aerotransportados cabe hacer una distinción entre sensores matriciales, lineales y rotacionales. El principio geométrico de éstos puede apreciarse en la Fig. 1. A continuación, pasamos a explicarlos brevemente.

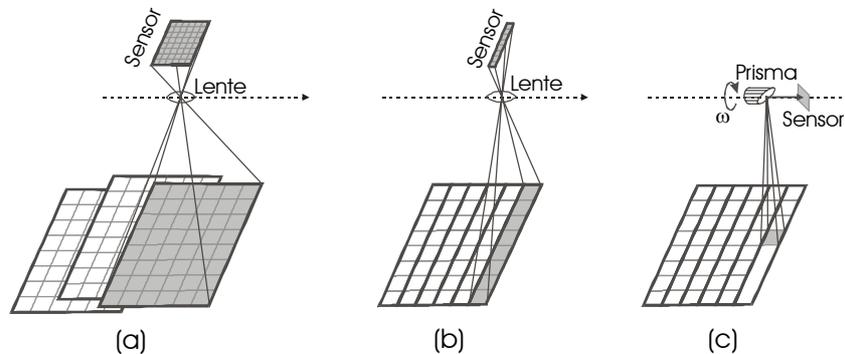


Figura 1: Geometría de los sensores digitales aerotransportados:

(a) sensor matricial; (b) sensor lineal; (c) sensor rotacional.

Formación ideal de las imágenes

(a) Sensores matriciales (*'frame cameras'*)

Estos sensores electrónicos utilizan sensores de estado sólido tipo CCD o CMOS. Todos los elementos sensoriales están dispuestos en el plano focal y presentan la particularidad de que adquieren la imagen digital en un solo instante. La geometría de dichas imágenes corresponde al caso de la proyección central. Además, suelen aceptar la corrección del movimiento hacia delante (FMC) vía TDI (*'Time Delayed Integration'*). Las resoluciones medias de 3K x 2K y 4K x 4K son las más extendidas y están disponibles en modo pancromático, color o falso color. Para obtener resoluciones equiparables con su homólogo analógico, se adoptan diseños modulares (de no menos de 2 x 2 sensores).

(b) Sensores lineales o de empuje (*'pushbroom scanners'*)

La captura de la imagen es un proceso continuo y totalmente electrónico, que se realiza mediante una serie de sensores lineales de estado sólido alineados entre ellos en posición perpendicular al avance del avión. La geometría de la imagen es cilíndrica, también conocida con el nombre de perspectiva lineal, y se caracteriza porque cada línea de la imagen resultante precisa sus propios POE (parámetros de orientación externa), ajustándose a una proyección central. La sensibilidad espectral de estos sensores oscila entre 0.4 μm y 1 μm , por tanto abarcan el espectro electromagnético visible e infrarrojo cercano.

(c) Sensores de barrido o de rotación (*'whiskbroom scanners'*)

Los sensores de rotación son de tipo electromecánico. La imagen se obtiene gracias a la rotación de un prisma o espejo que mueve instantáneamente el punto de vista (*IFOV*, *'Instantaneous Field of View'*) perpendicularmente a la dirección de vuelo. De este modo, la formación de la imagen sigue un proceso continuo. La geometría resultante es cilíndrica, con las particularidades que ello implica (vid. apartado siguiente). Por lo general, la sensibilidad espectral de estos sensores es mayor que los de empuje, ya que oscila entre 0.4 μm (visible) y 13 μm (infrarrojo lejano).

3. SENSORES HIPERESPECTRALES AEROTRANSPORTADOS

La creciente demanda de información hiperespectral ha impulsado la utilización de sensores rotacionales aerotransportados. La corrección geométrica de las imágenes obtenidas con este tipo de sensores no se obtiene de forma sencilla y ha sido motivo de estudio durante varias décadas [Breuer, Albertz, 2000]. A continuación se muestran las problemáticas que dificultan esta tarea y una posible solución mediante el empleo de polinomios de corrección.

3.1. Problemáticas

3.1.1. Distorsión panorámica

La proyección cilíndrica obtenida con este tipo de sensores es la causante de la distorsión panorámica. Debido a esto, tanto la escala como la resolución espacial

varían dentro de cada una de las líneas que componen la imagen. En el punto nadiral (de cada línea) la resolución geométrica es máxima y va decreciendo hacia los bordes de la imagen. Además, estos cambios son diferentes en las direcciones x e y: el pixel, que es de forma cuadrada en el nadir, en los bordes tiene forma de trapecio. Para transformar la imagen al caso de una proyección central, es necesario aplicar una *corrección panorámica* [Kraus, 1994].

3.1.2. Solapamientos o huecos entre líneas

Los sensores de rotación se basan en el principio de la digitalización línea a línea de la superficie terrestre como consecuencia de la rotación de un prisma. La ecuación (1) garantiza el que las líneas encajen entre sí formando una matriz perfecta.

$$\frac{V}{h} = IFOV \cdot v \quad (1)$$

donde:

v	Frecuencia de escaneado
V	Velocidad del avión
h	Altura de vuelo
$IFOV$	Campo de vista instantáneo

Si la ecuación (1) no se cumple, la imagen resultante presenta zonas con información redundante o zonas con pérdidas de registro entre líneas vecinas, esto es, se producen 'calvas' o 'huecos'. Esto suele ocurrir si la velocidad del avión o la altura de vuelo no se mantienen constantes a lo largo de la trayectoria.

3.1.3. Distorsión en *forma de S*

Este tipo de distorsión provoca una falta de linealidad en la imagen. Se produce debido al hecho de que el avión avanza durante la adquisición de cada una de las líneas de la imagen. No obstante, el efecto que produce esta distorsión no es muy grande, ya que la velocidad de rotación del prisma es muy elevada en comparación con la velocidad de avance del avión. Consiguientemente, el registro de cada línea se aproxima a una línea recta.

3.1.4. Errores en los POE y en el MDT

Una vez corregidas las imágenes de las distorsiones anteriormente nombradas, éstas son georreferenciadas mediante remuestreo. La ortoimagen obtenida no siempre está exenta de error, puesto que errores en los POE así como en el modelo digital del terreno (MDT), provocan errores de posición en la ortoimagen. Definiendo una situación estándar de vuelo (Fig. 2) y asumiendo una superficie plana, los errores sistemáticos siguen las ecuaciones (2)-(4) [Ries, 2001].

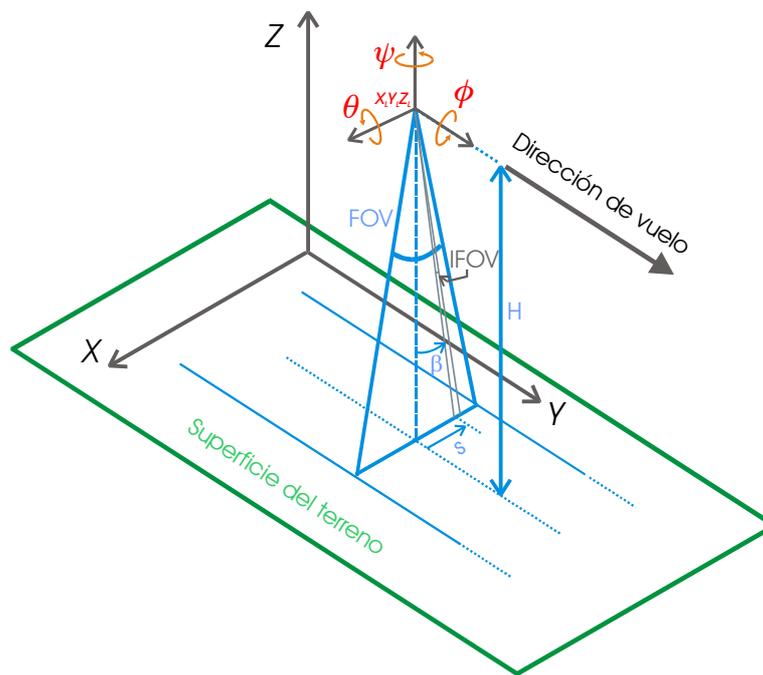


Figura 2: Situación estándar de vuelo; Nótese que el avión vuela en dirección paralela al eje Y (generalmente Sur-Norte)

$$E_i = \sqrt{\Delta X_i^2 + \Delta Y_i^2} \quad (2)$$

$$\Delta X_i = \left[\left(\frac{\Delta \phi}{\cos^2 \beta} \right) \cdot H \right] + \Delta X_L - [\tan \beta \cdot \Delta H] + \left[\left(\frac{s}{H} \right) \cdot \Delta Z \right] \quad (3)$$

$$\Delta Y_i = [\Delta \theta \cdot H] + \Delta Y_L - [\Delta \psi \cdot s] \quad (4)$$

donde:

- E_i Error en la ortoimagen para un punto determinado i
- ΔX_i Error en la ortoimagen en dirección del eje X para un punto determinado i
- ΔY_i Error en la ortoimagen en dirección del eje Y para un punto determinado i
- $\Delta \phi$ Error en el ángulo ϕ (balanceo, 'roll') del sensor
- $\Delta \theta$ Error en el ángulo θ (cabeceo, 'pitch') del sensor

$\Delta\psi$	Error en el ángulo ψ (guiñada, 'yaw') del sensor
ΔX_L	Error en X del sensor
ΔY_L	Error en Y del sensor
ΔZ	Error de altimetría en el MDT
H	Altura de vuelo
s	Distancia momentánea al nadir, donde: $s = 0$ en el nadir $s > 0$ a la izquierda del nadir $s < 0$ a la derecha del nadir
β	Ángulo de visión momentáneo, donde: $\beta = 0$ en el nadir $\beta > 0$ a la izquierda del nadir $\beta < 0$ a la derecha del nadir

3.2. Georreferenciación de alta precisión: Empleo de polinomios de corrección

Teóricamente, la corrección geométrica y/o georreferenciación de las imágenes obtenidas se puede realizar de forma sencilla si disponemos de medidas de las posiciones y de los giros del sensor con gran precisión. Éstas suelen venir dadas por un sistema integrado GPS/INS montado en el avión. Sin embargo, en la práctica esta situación ideal no suele producirse, ya que solemos encontrarnos con efectos de "ruido" o errores sistemáticos que debemos modelizar.

Se han probado varias metodologías para tratar de eliminar o reducir al máximo dichos errores [Ries et. al., 2002]. Uno de estos métodos se basa en la corrección de la deriva del sensor mediante la introducción de *polinomios de corrección* (ecuación 5). Estos polinomios se aplican directamente a los POE (p. ej. X_L , Y_L , Z_L , ϕ_L , θ_L , ψ_L) definidos por la *función de orientación* [Portalés, Lerma, 2003], y pueden ser hasta de grado n . De este modo se consigue una mejor modelización de la trayectoria seguida por el avión. La constante que aparece en (5) representa el descentrado ('*shift*'); el resto de términos modelizan la deriva ('*drift*') sufrida por el sensor en cada uno de los POE.

$$P(\vec{X}) = a + \sum_{i=1}^n \vec{X}^i \quad (5)$$

Nótese que en (5) se omiten los términos cruzados (p. ej. XY), que también podrían ser tenidos en cuenta. El vector \vec{X} representa a cada uno de los POE.

4. CASO PRÁCTICO

Como caso práctico se muestra a continuación la georreferenciación de una pasada perteneciente a un vuelo fotogramétrico realizado en Viena en el año 2000 a cargo del Austrian Health Institute.

4.1. Instrumentación utilizada y datos de partida

El sensor utilizado para la toma de imágenes fue el escáner de rotación multispectral *DAEDALUS AADS 1268 Airborne Thematic Mapper*. Este sensor registra datos en once canales o bandas espectrales, incluyendo desde la luz visible hasta el infrarrojo lejano. Algunas de las características técnicas del sensor y otros datos de interés se muestran a continuación:

Frecuencia de barrido: 25 Hz

FOV: 42.96°

IFOV: 1.25 mrad

Altura de vuelo sobre el terreno: 2000-2300 m

Número de píxeles por línea: 716 píxeles (Anchura de línea sobre el terreno: 1600-1800 m)

Resolución sobre el terreno: 2.5-2.8 m

Número total de líneas en la pasada: 8810

Para la obtención de los POE de forma directa se utilizó el sistema integrado GPS/INS *CCNS de AEROcontrol (IGI)*. Los datos obtenidos fueron:

- coordenadas tridimensionales de los centros de proyección (X_L , Y_L , Z_L) con una precisión de 1-3 m, y
- los tres giros correspondientes (ϕ_L , θ_L , ψ_L) con una precisión superior a $1/100^\circ$ para ϕ_L y θ_L , y superior a $1/10^\circ$ para ψ_L .

Para la extracción de las coordenadas altimétricas de puntos de apoyo (PA) se utilizó un MDT con una precisión en altimetría de 1-3 m. Este modelo también se utilizó para

la generación de la ortoimagen. Las coordenadas planimétricas de los PA se extrajeron de un mapa en formato ráster de la ciudad de Viena, cuyo tamaño de píxel correspondía a 0.25 m en el terreno.

Los parámetros de la orientación interna se conocían *a priori*, siendo éstos:

x_0 = parámetro t_i

y_0 = 358 píxeles (mitad de la línea)

c = 955 píxeles

4.2. Ortorrectificación y posterior modelización de la deriva

Con los datos mostrados en el apartado anterior se realizó un primer ajuste híbrido introduciendo como incógnitas los descentrados del sensor. Posteriormente se generó la ortoimagen (Fig. 3).

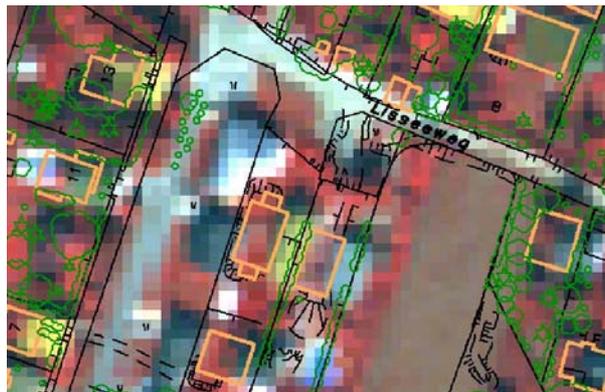


Figura 3: Detalle de la ortoimagen obtenida tras el primer ajuste junto con el mapa de Viena para un área donde se observan errores de hasta 4 píxeles

Después de un análisis geométrico, se observó que en algunas zonas habían errores de hasta 4 píxeles (10 m en el terreno). Los errores visualizados en la ortoimagen se contrastaron con los vectores de discrepancia obtenidos tras el ajuste para los PA (Fig. 6, ajuste 1). Observando dichos vectores, se puede apreciar como, en general, éstos se dirigen 'hacia los bordes' de la imagen. Esto puede ser debido a un error sistemático en la altura de vuelo, es decir, en los datos proporcionados por el GPS para las coordenadas altimétricas de los centros de proyección [Portalés, 2002]. Como se vio en el apartado 3, dichos errores son debidos a los efectos de deriva del sensor y pueden modelizarse mediante la introducción de polinomios de corrección.

Así pues, la modelización de la deriva se hizo en primer lugar sólo para el parámetro Z_L del modelo del GPS, introduciendo polinomios de corrección hasta de cuarto orden (ya que no se observó una mejora en los resultados con polinomios de grado mayor). Con los datos obtenidos, se generó de nuevo la ortoimagen. En este caso, el análisis geométrico mostraba errores de 1-2 píxeles (Fig. 4).

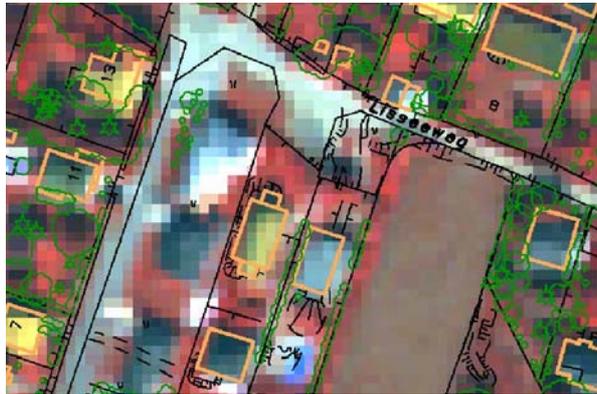


Figura 4: Detalle de la ortoimagen obtenida tras el segundo ajuste junto con el mapa de Viena para la misma área que la Fig. 3

Una vez más se analizaron los vectores de discrepancia obtenidos tras el ajuste (Fig. 6, ajuste 2) y se vio que todavía existían errores sistemáticos debidos a la deriva en los parámetros X_L e Y_L (vectores hacia la izquierda y hacia arriba de la imagen [Portalés, 2002]). Por consiguiente, se llevó a cabo un nuevo ajuste introduciendo dos nuevos polinomios de corrección hasta del cuarto orden. La ortoimagen generada tras este último ajuste (Fig. 5) mostraba resultados satisfactorios en su totalidad puesto que los errores en ningún caso superaban el píxel.



Figura 5: Detalle de la ortoimagen obtenida tras el tercer ajuste junto con el mapa de Viena para la misma área que la Fig. 3

Los vectores de discrepancia en este caso ya no muestran errores sistemáticos (Fig. 6, ajuste 3). Los errores que se observan son exclusivamente accidentales, los cuales ya no se pueden modelizar.

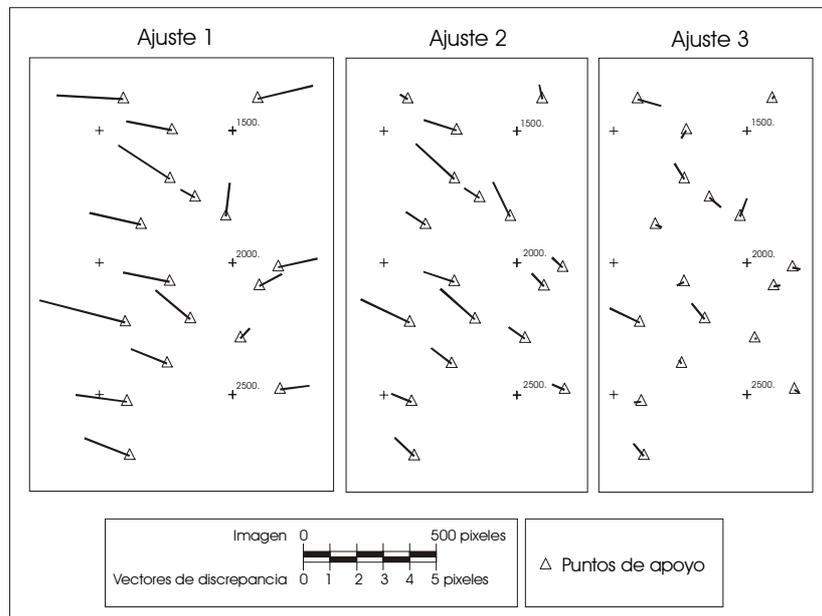
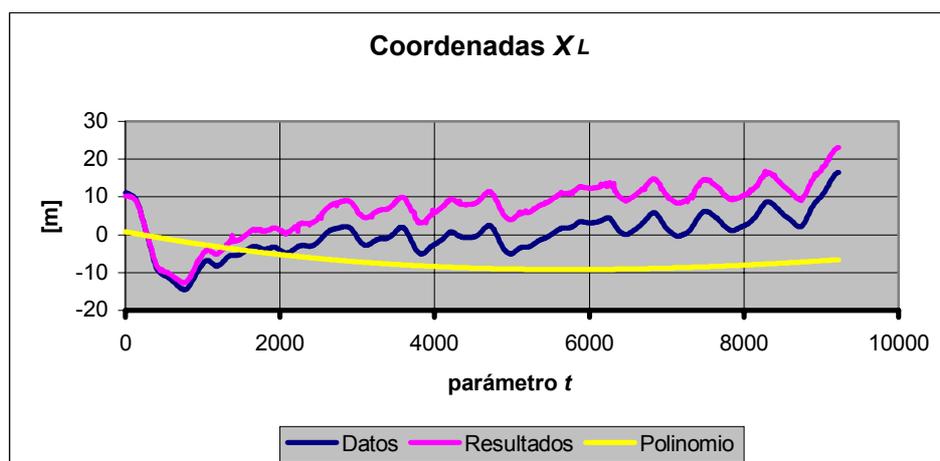


Figura 6: Detalle de los vectores de discrepancia en la ortoimagen con respecto al mapa de Viena en los tres ajustes realizados

A continuación, se muestran gráficamente los polinomios de corrección introducidos, los datos originales y la trayectoria corregida.



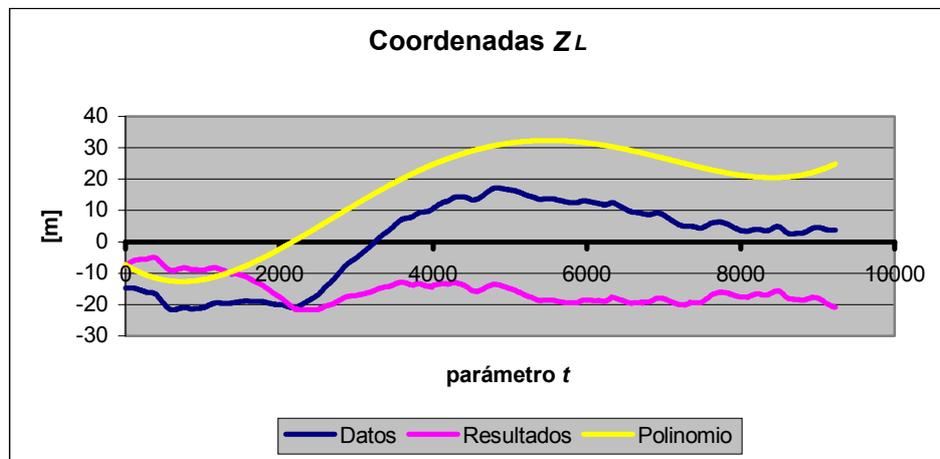
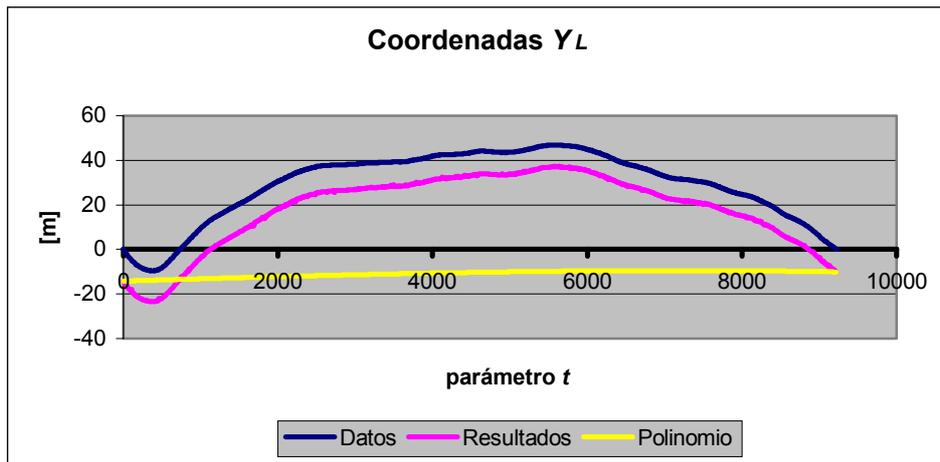


Figura 7: Representación gráfica de: las posiciones de los centros de proyección dados por el GPS (Datos); las posiciones de los centros de proyección corregidos (Resultados); los polinomios de corrección (Polinomio)

Nótese que en la Fig. 7 todos los datos han sido reducidos a cota cero para una representación más cómoda de los resultados. La gráfica en Y_L se ha calculado de acuerdo a un movimiento constante del avión.

Como puede apreciarse en las gráficas de la Fig. 7, el parámetro que sufre mayor corrección es el Z_L , ya que se observa un incremento máximo en altura de vuelo de aproximadamente 40 m. Como este hecho es muy improbable que suceda en la práctica, se deduce que en este caso existen errores groseros en los datos proporcionados por el GPS. Tras aplicar el polinomio de corrección, la curva se estabiliza. Por otro lado, las coordenadas X_L e Y_L dadas por el GPS parecen más fiables y no necesitan grandes correcciones; quizá hubiese sido suficiente aplicar polinomios de corrección de grado inferior en estos dos parámetros.

5. CONCLUSIONES

La demanda de datos hiperespectrales ha impulsado la introducción en el mercado de sensores rotacionales aerotransportados. La corrección geométrica de imágenes obtenidas con este tipo de sensores no es una tarea sencilla. Esto se debe en primer lugar a la inestabilidad del avión durante la trayectoria de vuelo y, en segundo lugar, a una serie de factores derivados del principio básico de estos sensores: la distorsión panorámica. Sin embargo, estas problemáticas han sido objeto de estudio durante varias décadas, y, en la actualidad, la modelización de estos errores y/o distorsiones permite una correcta georreferenciación de dichas imágenes. En este artículo se ha mostrado una nueva metodología que, mediante la eliminación del efecto de deriva, permite alcanzar precisiones por debajo del pixel en el proceso de georreferenciación.

6. AGRADECIMIENTOS

Los autores desean expresar su agradecimiento al *Austrian Health Institute*, propietario de las imágenes mostradas, y al Instituto de Fotogrametría y Teledetección (I.P.F.) de Viena por el apoyo proporcionado en todo momento.

7. BIBLIOGRAFÍA

- BREUER M., ALBERTZ J.: *Geometric correction of airborne whiskbroom scanner imagery using hybrid auxiliary data*. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIII, Part B3, pp. 93-100, 2000.
- KRAUS K.: *Photogrammetry. Fundamentals and Standard Process*, 5ª edición. Volume 1. Ferdinand Dümmler. Viena, 1994.
- LERMA J.L.: *Fotogrametría Moderna: Analítica y Digital*. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, 2002.
- PORTALÉS C.: *Georeferencing of GPS/INS – Supported Airborne Multispectral Scanner Data*. Proyecto final de carrera TU-WIEN. Viena, junio 2002.
- PORTALÉS C., LERMA J.L.: *Georreferenciación GPS/INS de imágenes aéreas adquiridas con escáneres rotacionales: ejemplo práctico y resultados*. TOPOGRAFÍA Y CARTOGRAFÍA, Vol. XX, nº 115. Marzo-Abril, 2003.

- RIES Ch.: *Geometrische Rektifizierung von Flugzeugscanneraufnahmen des multispektralen Rotationsscanners DAEDALUS AADS 1268 Airborne Thematic Mapper (ATM)*. Artículo interno I.P.F., Viena, 2001.
- RIES Ch., KAGER H., STADLER P.: *High-Quality Geo-Referencing of GPS/IMU-supported Multi-Spectral Airborne Scanner Data - Experiences and Results*. PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION 2002, September 9-13, Graz, Austria. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. XXXIV. Part B3, pp. 222-226, 2002.