

Mejoras en la corrección geométrica de imágenes LANDSAT-TM y SPOT-HRV mediante el uso combinado de modelos digitales de elevaciones y procedimientos no orbitales

Xavier Pons¹ y Vicenç Palà²

(1) CREAM y Unitat de Botànica
Universitat Autònoma de Barcelona
(2) Institut Cartogràfic de Catalunya

RESUMEN

Este estudio se centra en las deformaciones geométricas introducidas por el relieve en imágenes captadas por el sensor TM de Landsat y HRV de SPOT. Se presentan diferentes alternativas para la incorporación de la altitud a los procedimientos de corrección, basadas en modelos polinómicos de primer grado. Los resultados han sido contrastados con los obtenidos mediante polinomios convencionales de primer y segundo grado y con los obtenidos usando modelos orbitales (para imágenes SPOT). Los modelos presentados son eficientes y de fácil implementación, proporcionando una precisión similar a la del modelo orbital utilizado.

ABSTRACT

This study focus on the geometrical deformations introduced by relief in image captured by the TM sensor of Landsat satellites and by the HRV sensor of SPOT satellites. Different correction alternatives are presented in order to incorporate altitude data into correction procedures based in first-degree polynomial models. Results have been contrasted with those obtained using classic first and second-degree polynomial calculations, and with those obtained using an orbital model (for SPOT images). The models presented are efficient and easy to implement; they provide a precision level similar to that of the orbital model used.

Introducción

Debido a las complejas características del sistema Tierra-sensor, las imágenes obtenidas mediante satélites de observación de la Tierra sufren varios tipos de deformaciones que no las hacen directamente superponibles a un mapa. Entre estas características, podemos mencionar la deformación provocada por la perspectiva cónica, la curvatura de la Tierra, el relieve, los movimientos simultáneos de rotación de la Tierra y seguimiento orbital durante la captación de la imagen, y la orientación del sensor que, voluntariamente o no, proporciona una visión no necesariamente perpendi-

cular al terreno en el centro de la imagen. Este último factor es de especial importancia en el caso del satélite SPOT, el cual puede capturar imágenes con un ángulo de visión lateral de hasta 27 grados.

Clásicamente, el proceso de corrección geométrica de las imágenes se ha abordado por dos métodos diferentes (Billingsley, 1983), que precisan del conocimiento de uno o más puntos de control. El primero se basa en modelos orbitales, de concepción física, que pretenden comprender y modelizar las distorsiones para reconducirlas hacia la proyección cartográfica deseada. El segundo método, de concepción más empírica, pretende convertir la imagen en un mapa en base a establecer polinomios de transformación; este método precisa del conocimiento de un número mayor de puntos de control.

En este trabajo pretendemos:

- Incorporar el efecto del relieve en modelos de corrección geométrica simples, basados en polinomios, sobre las imágenes de los sensores TM (Landsat) y HRV (SPOT), ensayando aproximaciones basadas en modelos de diferente fidelidad geométrica.
- Realizar una comprobación experimental de las mejoras introducidas por dichos métodos, comparando los resultados con los obtenidos con los modelos polinómicos clásicos en los cuales no interviene el relieve, y con un modelo orbital (para SPOT).

Modelos orbitales. Corrección de las imágenes SPOT. Modelo orbital empleado

Los modelos orbitales intentan realizar una corrección basada en consideraciones con fundamento físico (véase: Labovitz y Marvin, 1986; Salamonowicz, 1986; Light, 1986; Marvin *et al.*, 1987; Gagan, 1987; Rodríguez *et al.*, 1988; Kratky, 1988). En este caso, la situación ideal es aquella en la que disponemos de datos prácticamente en bruto, es decir, tal cual son captados por el sensor (p.ej. el nivel 1A de SPOT). En caso de que dispongamos de un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) podremos corregir el efecto del relieve incorporándolo en el modelo (Wong, 1986).

La principal ventaja de los modelos orbitales es su alta precisión y su solidez, derivada de su fundamento físico, mientras que el principal inconveniente es la complejidad de la implementación y, sobretudo, el elevado tiempo de cálculo que exigen.

En este trabajo hemos utilizado, a efectos de comparación con los modelos que proponemos, el modelo orbital de Gagan (1987).

Modelos basados en polinomios. Corrección de las imágenes LANDSAT TM y SPOT HRV

En una imagen SPOT 1B o Landsat TM se han corregido la mayoría de deformaciones (excepto el relieve) mediante un preprocesado. Si la superficie de la Tierra no tuviese montañas, estas transformaciones darían lugar a una imagen de píxeles de iguales dimensiones en x, y, que sería directamente superponible a un mapa mediante transformaciones polinómicas elementales de primer grado:

$$\text{Col} = A + Bx + Cy \quad (1)$$

$$\text{Fila} = A' + B'x + C'y \quad (2)$$

donde

Col, Fila son las coordenadas columna y fila sobre la imagen, x, y representan las coordenadas sobre el terreno, A, B, C, A', B', C' son los coeficientes de los polinomios,

o de segundo grado (Billingsley, 1983):

$$\text{Col} = A + Bx + Cy + Dx^2 + Ey^2 + Fxy \quad (3)$$

$$\text{Fila} = A' + B'x + C'y + D'x^2 + E'y^2 + F'xy \quad (4)$$

Magnitud del desplazamiento debido al relieve

En ocasiones se ha dicho que el efecto del desplazamiento debido al relieve es poco importante debido a la gran altura de vuelo de los satélites en comparación con los desniveles de las montañas (Billingsley, 1983, pág 763; Novak, 1992; Ardizone *et al.*, 1993) o sencillamente ni se comenta su efecto (Lillesand y Kiefer, 1987). Sin embargo, y como veremos a continuación, este supuesto no es del todo cierto.

El efecto de desplazamiento debido al relieve depende fuertemente de la altura de vuelo, del área que cubre cada imagen (el campo de visión o FOV del sensor) y de la propia orografía. En los siguientes apartados vamos a formular y cuantificar cual sería el desplazamiento, primero sin tener en cuenta la curvatura de la Tierra y después teniéndola en cuenta.

Cálculo del desplazamiento sin tener en cuenta la curvatura de la Tierra

Suponiendo una Tierra plana, hay que considerar la situación presentada en la Figura 1, en la que el origen de coordenadas es el nadir del sensor, el eje Y se define

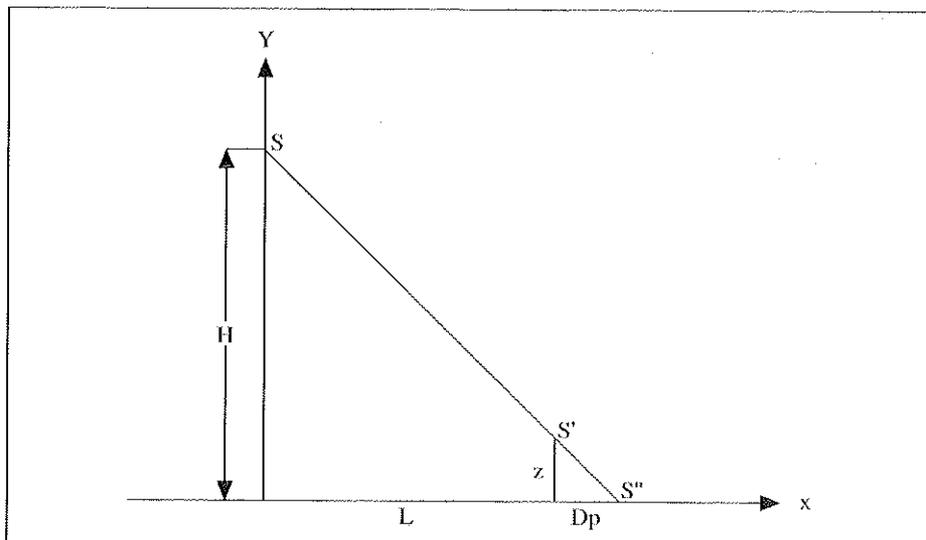


FIGURA 1
Desplazamiento debido al relieve en una superficie plana.
Símbolos definidos en el texto

como la línea que une el sensor y el nadir, y el eje X, ortogonal al anterior, une el punto a considerar, a una altura 0, con el origen de coordenadas. Llamaremos L a la coordenada de este punto en la dirección del eje X; z a la altura de este punto; Dp al desplazamiento producido en la dirección del eje X; H a la altura de vuelo del satélite sobre la superficie de referencia; S a la posición del satélite; S' a la posición sobre el terreno del punto; S'' al punto donde S' es proyectado.

En un punto cualquiera, podemos plantear:

$$H/z = (L+Dp)/Dp \quad (5)$$

El desplazamiento debido al relieve vendrá expresado por la Ecuación

$$Dp = L \cdot z / [H - z] \quad (6)$$

Dado que H es mucho mayor que z, podemos utilizar, a efectos prácticos, la simplificación siguiente:

$$Dp = L \cdot z / H \quad (7)$$

Según las Ecuaciones 6 y 7, un punto lateral de una imagen TM situado a 3000 m sobre el nivel del mar estará desplazado cerca de 13 píxeles. Hay que considerar que los ajustes polinómicos clásicos (Ecuaciones 1 y 2) tienen la facultad de escalar las imágenes, por lo que automáticamente reparten los errores entre los puntos de control situados en las cumbres más altas y los situados en los valles más profundos o a nivel del mar. En estas circunstancias (alturas entre 0 y 3000 m en una imagen) podríamos tener errores, aún considerables, de más de 6 píxeles en las cumbres y a nivel del mar.

Cálculo del desplazamiento teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra

En Pons (1993) se deduce la fórmula del desplazamiento teniendo en cuenta la curvatura de la Tierra. La Tabla 1 muestra valores de desplazamiento calculados mediante los dos métodos; sólo en casos extremos las diferencias pueden ser importantes.

Incorporación del relieve en los modelos basados en polinomios

Como se ha comentado, las imágenes Landsat TM y SPOT 1B han sido "corregidas" de las principales distorsiones inherentes a la geometría del sistema de captación, por lo que, para adaptarlas a una determinada proyección cartográfica tenemos que aplicar, en primer lugar, una transformación afín del tipo giro + cambio de escala + traslación y, en segundo lugar, tenemos que corregir los efectos de desplazamiento debidos al relieve.

La primera corrección puede conseguirse con el ajuste de polinomios de primer grado como los descritos anteriormente; la segunda requiere tomar en consideración las deformaciones producidas por el relieve y, como hemos visto, son posibles como mínimo dos aproximaciones, una que contemple la curvatura de la Tierra y otra que no.

En ninguno de los dos casos es imprescindible disponer de un MDE extremadamente detallado, ni planimétricamente ni altimétricamente, ya que, como puede deducirse de la expresión 7, en el caso de Landsat, errores en z de 100 m provocan, para $L = 90$, errores en el cálculo del desplazamiento que son inferiores a 0.5 píxeles.

En los apartados siguientes exponemos diferentes aproximaciones que permiten la incorporación del relieve en modelos basados en polinomios. Previamente, cabe considerar que:

- Plantaremos un modelo de rectificación inverso (Novak, 1992), en el que obtendremos coordenadas imagen (Columna, Fila) a partir de coordenadas mapa (p. ej. UTM_x, UTM_y).

	<i>I</i>	<i>L</i>	<i>z</i>	<i>Dp</i> (Tierra plana)	<i>Dp</i> (Tierra curvada)	<i>Diferencia</i>
TM	--	90 km	3 km	384 m 12.8 píxels	427 m 14.2 píxels	43 m 1.4 píxels
	--	90 km	1.5 km	192 m 6.4 píxels	213 m 7.1 píxels	21 m 0.7 píxels
	--	50 km	3 km	214 m 7.1 píxels	237 m 7.9 píxels	24 m 0.8 píxels
	--	50 km	1.5 km	107 m 3.6 píxels	118 m 4.0 píxels	12 m 0.4 píxels
HRV	5.13°	106 km	3 km	385 m 19.2 píxels XS 38.5 píxels P	435 m 21.8 píxels XS 43.5 píxels P	50 m 2.5 píxels XS 5.0 píxels P
	5.13°	106 km	1.5 km	192 m 9.6 píxels XS 19.2 píxels P	217 m 10.9 píxels XS 21.7 píxels P	25 m 1.3 píxels XS 2.5 píxels P
	10°	179 km	3 km	648 m 32.4 píxels XS 64.8 píxels P	735 m 36.8 píxels XS 73.5 píxels P	87 m 4.4 píxels XS 8.7 píxels P
	10°	179 km	1.5 km	324 m 16.2 píxels XS 32.4 píxels P	367 m 18.4 píxels XS 36.7 píxels P	44 m 2.2 píxels XS 4.4 píxels P
	20°	339 km	3 km	1226 m 61.3 píxels XS 122.6 píxels P	1402 m 70.1 píxels XS 140.2 píxels P	177 m 8.8 píxels XS 17.7 píxels P
	20°	339 km	1.5 km	612 m 30.6 píxels XS 61.2 píxels P	700 m 35.0 píxels XS 70.0 píxels P	88 m 4.4 píxels XS 8.8 píxels P
	27°	464 km	3 km	1679 m 84.0 píxels XS 167.9 píxels P	1942 m 97.1 píxels XS 194.2 píxels P	262 m 13.1 píxels XS 26.2 píxels P
	27°	464 km	1.5 km	838 m 41.9 píxels XS 83.8 píxels P	735 m 48.4 píxels XS 96.9 píxels P	87 m 6.5 píxels XS 13.1 píxels P

TABLA 1

Cálculo del desplazamiento debido al relieve considerando los modelos de Tierra plana y Tierra curvada. Ejemplo para SPOT-1 HRV, dando a H un valor de 832 km y a R un valor de 6370 km. Las inclinaciones se dan para el punto central de la imagen y el cálculo se realiza tomando L en el extremo de la imagen más alejado del nadir del satélite. I: inclinación (para SPOT); L: distancia al nadir; z: altura del punto; Dp: desplazamiento debido al relieve

- Una vez obtenidas las coordenadas (Columna, Fila) habrá que repositionarlas teniendo en cuenta los factores de desplazamiento debidos al relieve.
- Estos factores de desplazamiento se obtienen siempre que conozcamos, para cada fila de la imagen, la columna en la que se encuentra el nadir. Si admitimos que en la zona cubierta por la imagen la trayectoria del satélite puede ser considerada rectilínea, esto implica disponer de una ecuación de la forma:

$$\text{Col}_n = m + n \cdot \text{Fila} \quad (8)$$

donde Fila es una fila de la imagen, y Col_n es la columna en la que se encuentra el nadir para dicha fila.

Así pues, en términos generales la rectificación de una imagen deberá seguir el siguiente protocolo:

- 1.- Para cada píxel de la imagen resultante, de la que se conoce a priori sus coordenadas mapa, calcularemos, mediante las Ecuaciones 1 y 2, qué coordenada (Col_1 , Fila) de la imagen original le correspondería (sin tener en cuenta el relieve).
2. Conociendo Fila podremos obtener la columna del nadir mediante la Ecuación 8.
3. Calcularemos la distancia a la columna nadir (parámetro L).
4. Leeremos del MDE la altura de esa coordenada mapa y, mediante la fórmula pertinente (Tierra plana o Tierra curvada), calcularemos el desplazamiento que ha sufrido dicho punto (D_p).
5. Calcularemos la columna Col_2 donde ha quedado proyectado y leeremos el DN correspondiente a (Col_2 , Fila).
6. Si el método de rectificación no es el del vecino más próximo, aplicaremos los algoritmos necesarios (interpolación bilineal, etc.).

La obtención de los parámetros que aparecen en cada planteamiento puede realizarse mediante la técnica de aproximación unificada al ajuste por mínimos cuadrados, descrita por Mikhail (1976) y utilizada en un caso similar por Salamonowicz (1986).

Incorporación del relieve en la obtención de las columnas

Modelo sin tener en cuenta la curvatura de la Tierra

La función a minimizar será la descrita por el proceso siguiente:

$$\begin{aligned} \text{I.- Fila} &= A' + B'x + C'y \\ \text{Col}_1 &= A + Bx + Cy \end{aligned}$$

- 2.- $Col_n = m + n \cdot Fila$
- 3.- $L = Col_1 - Col_n$
- 4.- $Dp = L \cdot z / [H - z]$
- 5.- $Col_2 = Col_1 + Dp$

Nótese que la obtención de Fila es necesaria para poder calcular la columna del nadir Col_n . El proceso puede resumirse mediante las expresiones:

$$\begin{aligned} Fila &= A' + B'x + C'y \\ Col_2 &= A + Bx + Cy + \{[(A+Bx+Cy - (m+n \cdot Fila)) \cdot z] / [H-z]\} \end{aligned} \quad (9)$$

Con este planteamiento, el número de parámetros para resolver la expresión de las columnas es de cinco (A, B, C, m, n). A este modelo le llamaremos *modelo de Tierra plana*.

Simplificación del modelo anterior. Integración en un único polinomio

A partir de la Ecuación 7, podemos reescribir la Ecuación 9 en la forma:

$$Col_2 = A + Bx + Cy + \{[(A+Bx+Cy - (m+n \cdot Fila)) \cdot z] / H\} \quad (10)$$

Basándonos en la Ecuación 2, podemos sustituir Fila en función de su expresión y reordenando términos tenemos:

$$\begin{aligned} Col_2 &= A + (B+B'n/H)x + (C+C'n/H)y + \\ &[(A/H)+(A'n/H)-(m/H)]z + (B/H)zx + (C/H)zy \end{aligned} \quad (11)$$

Podemos ahora definir los coeficientes de x, y, z, zx, zy como nuevas constantes (B'', C'', D'', E'', F'') y directamente obtener la expresión final de las columnas:

$$Col_2 = A + B''x + C''y + D''z + E''zx + F''zy \quad (12)$$

Con este planteamiento el número de incógnitas para resolver la expresión de las columnas es de seis (A, B'', C'', D'', E'', F''). Nótese que el valor de H y los coeficientes de la recta de traza del nadir han quedado absorbidos en la expresión general. Puesto que la Ecuación 12 es un polinomio, llamaremos a los modelos que lo utilicen *modelos polinómicos con z*.

Modelo que tiene en cuenta la curvatura de la Tierra

La función a minimizar será la dada por el proceso siguiente, que sigue el general descrito anteriormente:

Mejoras en la corrección geométrica de imágenes LANDSAT-TM y SPOT-HRV mediante el uso combinado de modelos digitales de elevaciones y procedimientos no orbitales

- 1.- $Fila = A' + B'x + C'y$
 $Col_1 = A + bx + Cy$
- 2.- $Col_n = m + n \cdot Fila$
- 3.- $L = (Col_1 - Col_n)pix$

Obsérvese que es necesario multiplicar por pix para obtener L en las mismas unidades que las coordenadas terrestres.

- 4.- Aplicamos los cálculos adecuados para el modelo de Tierra curvada para obtener el desplazamiento, Dp:

$$Dp = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

- 5.- En el cálculo de Dp se ha perdido el signo, por lo que calcularemos Col_2 como sigue:

$$\begin{array}{ll} \text{si } L \geq 0 & Col_2 = Col_1 + Dp/pix \\ \text{en caso contrario} & Col_2 = Col_1 - Dp/pix \end{array}$$

Nótese que la obtención de Fila es necesaria para poder calcular la columna del nadir, Col_n .

Con este planteamiento el número de incógnitas para resolver la expresión de las columnas es de 5 (A, B, C, m, n), como en el caso de la consideración de Tierra plana sin simplificación. Llamaremos a este modelo, *modelo de Tierra curvada*.

Incorporación del relieve en la obtención de las filas

La consideración del efecto del relieve en las filas de la imagen implica admitir que existía un cierto cabeceo en el momento de captación de la imagen. Si llamamos ϕ al ángulo de cabeceo, podemos escribir:

$$L = H \cdot \tan(\phi) \quad (15)$$

y reescribir la Ecuación 6 como:

$$Dp = H \cdot \tan(\phi) \cdot z / (H - z) \quad (16)$$

A partir de esta ecuación puede apreciarse que un valor de cabeceo de 0.285° provocará deformaciones de medio píxel en cotas de 3 km para Landsat-5 TM. Cabe recordar que los polinomios de primer grado tenderán a reducir a la mitad las defor-

maciones puesto que las repartirán entre las cotas mínimas y máximas, tal y como comentamos para las columnas.

Este efecto es considerado automáticamente en los modelos orbitales, puesto que tienen en cuenta la actitud del sensor. En el caso de SPOT, es un factor reconocido (Konecny *et al.*, 1987; Gagan, 1987; Priebbenow y Clerici, 1988; Kratky, 1988). En el caso de Landsat hemos encontrado pocas referencias al posible cabeceo del sensor, pero Beyer (1983) indica la presencia de movimientos con valores del orden de $2 \cdot 10^{-4}$ grados para Landsat-4 TM y Labovitz y Marvin (1986) indican valores del orden de 10^{-6} grados/segundo (1σ) para Landsat-4/5 después de las correcciones sistemáticas; estas magnitudes, ciertamente muy pequeñas, llevan a que la consideración de este efecto para Landsat TM no sea importante. De todos modos, hemos querido comprobarlo experimentalmente.

Dado que los ángulos de cabeceo nunca son muy importantes y que las deformaciones producidas en este caso son potencialmente menores que las producidas en el caso de las columnas, hemos optado por despreciar la curvatura de la Tierra. Asumido el cálculo sobre una Tierra plana, nos ha parecido interesante realizar dos aproximaciones, una que considere constante el cabeceo y otra que admita una evolución de este ángulo a lo largo de las filas de la imagen. En ambos casos hemos aplicado un modelo análogo al polinómico con z , ya que, para el cálculo del desplazamiento (D_p) utilizaremos la simplificación introducida en la Ecuación 7.

Modelo de cabeceo constante

En este caso consideraremos constante la distancia al nadir y no será necesario utilizar la recta definida en la expresión 8. Gracias a un planteamiento análogo a los anteriores, se puede resumir el proceso mediante la expresión:

$$\text{Fila}_2 = A' + B'x + C'y + L \cdot z/H \quad (17)$$

que, introduciendo una nueva incógnita, D''' , definida como L/H , puede reescribirse en forma polinómica simple:

$$\text{Fila}_2 = A' + B'x + C'y + D'''z \quad (18)$$

Con este planteamiento el número de incógnitas para resolver la expresión de las filas es de 4 (A' , B' , C' , D'''). Llamaremos a este modelo, *modelo de cabeceo constante del sensor*.

Modelo de cabeceo variable a lo largo de las filas

En este caso admitimos una evolución del ángulo de cabeceo a lo largo de las filas de la imagen; esta evolución se asume como una función lineal del parámetro Fila. La distancia al nadir (L), ya no será constante y será necesario definir una expresión del tipo

$$L = g \cdot \text{Fila} + h \quad (19)$$

Con un planteamiento análogo a los anteriores se llega a:

$$\text{Fila}_2 = A' + B'x + C'y + [g \cdot (A' + B'x + C'y) + h] \cdot z/H \quad (20)$$

Reordenando términos y definiendo unos nuevos coeficientes (D''', E''', F''') obtenemos otra vez una forma polinómica para las filas:

$$\text{Fila}_2 = A' + B'x + C'y + D'''z + E'''zx + F'''zy \quad (21)$$

Con este planteamiento el número de incógnitas para resolver la expresión de las filas es de 6 (A', B', C', D''', E''', F'''). Llamaremos a este modelo, *modelo de cabeceo variable del sensor*.

Imágenes, datos y métodos de evaluación

Imágenes y datos utilizados

Con el objetivo de contrastar los resultados obtenidos con las diferentes técnicas de corrección geométrica expuestas, hemos utilizado PC buscados sobre imágenes TM y SPOT de diferentes tipos sobre los Pirineos centrales y orientales y la depresión central catalana, en áreas de fuertes contrastes hipsométricos. Los puntos han sido buscados sobre ortofotomapas 1:5000 en proyección UTM editados por el "Institut Cartogràfic de Catalunya" (ICC) siempre que existían dichos documentos o, en caso contrario, sobre los mapas topográficos (MTN) 1:50000 correspondientes, también en proyección UTM. Las altitudes (z) de los PC se han obtenido del MDE del ICC (resolución en x, y: 15 m).

En la Tabla 2 resumimos las principales características de estas imágenes, así como las abreviaturas que utilizaremos en adelante para referirnos a cada una de ellas.

Métodos de evaluación

Para cada método de corrección geométrica propuesto, se ha evaluado su precisión, su facilidad de implementación y su velocidad al rectificar una imagen.

<i>Abrev.</i>	<i>Satélite/ Sensor</i>	<i>Fecha Situación orbital</i>	<i>Inclinación lateral (SPOT)</i>	<i>Nº de GCPs: Total Ajuste/Test</i>	<i>z_{min}, z_{max} de GCPs (m): Total Ajuste/Test</i>
TM	Landsat-5/ TM	13-Jul-90/ 198-031	--	38 25 / 13	7,1746 7,1746 / 73,1740
SP-P	SPOT-1/ HRV-Pancrom.	3-Jul-89/ 043-265	9.7°	31 20 / 11	290,2020 480,1940 / 290,2020
SP-XS	SPOT-1/ HRV-Multisp.	25-Jul-91/ 042-265	10.4°	25 17 / 8	475,1920 475,1920 / 400,1730
SEG-P	SPOT-1/ HRV-Pancrom.	5-Set-88/ 045-264 045-265 045-266 045-267	2.3°	31 20 / 11	2,1610 2,1610 / 90,1560

TABLA 2

Características principales de las imágenes utilizadas para la evaluación de las diferentes técnicas de corrección geométrica; las abreviaciones se refieren a cada una de las imágenes (ver texto)

Para evaluar la precisión definiremos RMS_c como el error en la estimación de las columnas, RMS_f como el error en la determinación de las filas, y RMS como el error en la determinación conjunta de columnas y filas.

No siempre podemos disponer de PC en las partes más extremas de la imagen en columnas y altitud y, por lo tanto, habitualmente ni ajustamos ni comprobamos con puntos sometidos a las máximas deformaciones. Además, si un modelo parece comportarse claramente peor en el test que en el ajuste, cabe pensar que aún tendrá comportamientos más aberrantes en las zonas más críticas de la imagen.

Finalmente, y con el objetivo de evaluar la velocidad al corregir una imagen, hemos procedido a la rectificación de un fragmento de 1024 píxeles x 1024 píxeles de una escena SPOT en un mismo ordenador (VAXStation 3100) y partiendo de un MDE de 30 m de distancia entre puntos.

Resultados

Utilizaremos la siguiente notación:

- P1 hace referencia a una corrección polinómica de primer grado;
- P2 hace referencia a una corrección polinómica de segundo grado;
- PZ en C hace referencia a una corrección polinómica de primer grado para las columnas según el *modelo polinómico con z*;
- TP en C hace referencia a una corrección polinómica de primer grado para las columnas con una corrección del desplazamiento debido al relieve según el *modelo de Tierra plana*;
- TC en C hace referencia a una corrección polinómica de primer grado para las columnas con una corrección del desplazamiento debido al relieve según el *modelo de Tierra curvada*;
- PZ1 en F hace referencia a una corrección polinómica de primer grado para las filas, que integra los valores de z según el *modelo de cabeceo constante del sensor*;
- PZ2 en F hace referencia a una corrección polinómica de primer grado para las filas, que integra los valores de z según el *modelo de cabeceo variable del sensor*;
- ORBITAL hace referencia a la corrección de tipo orbital que hemos expuesto en el apartado correspondiente, y que trabaja conjuntamente en la determinación de filas y columnas.

La Tabla 3 recoge los errores RMS producidos por los diferentes métodos de corrección geométrica, tanto en lo que hace referencia a los ajustes como a los tests. Una discusión detallada de esta tabla puede hallarse en Pons (1993).

Nota: En todos los casos, cuando no se explicita el tipo de tratamiento en filas cabe entender que se ha aplicado un polinomio de primer grado.

COLUMNAS							
Método:		P1	P2	PZ en C	TP en C	TC en C	ORBITAL
TM	AJUSTE	1.41	0.75	0.70	0.70	0.70	-
	TEST	1.07	0.62	0.56	0.57	0.53	-
SP-P	AJUSTE	6.41	5.51	0.59	0.60	0.59	0.61
	TEST	6.83	5.73	0.68	0.72	0.68	0.59
SP-XS	AJUSTE	2.09	1.76	0.68	0.71	0.72	0.60
	TEST	2.43	3.29	0.92	0.86	0.85	0.67
SEG-P	AJUSTE	1.20	1.08	0.66	0.66	0.67	0.50
	TEST	1.87	1.52	0.75	0.74	0.73	0.52

FILAS						
Método:		P1	P2	PZ en F	PZ2 en F	ORBITAL
TM	AJUSTE	0.60	0.51	0.59	0.47	-
	TEST	0.77	0.69	0.79	0.64	-
SP-P	AJUSTE	0.56	0.38	0.55	0.55	0.55
	TEST	0.60	0.76	0.60	0.69	0.57
SP-XS	AJUSTE	0.80	0.73	0.58	0.52	0.58
	TEST	1.05	1.08	0.73	0.54	0.72
SEG-P	AJUSTE	0.52	0.41	0.51	0.47	0.49
	TEST	0.73	0.56	0.73	0.65	0.47

TABLA 3

Error RMS (en píxels) producido por los diferentes métodos en la obtención de las columnas, de las filas, y de las columnas y las filas conjuntamente. Notación en el texto.

Mejoras en la corrección geométrica de imágenes LANDSAT-TM y SPOT-HRV mediante el uso combinado de modelos digitales de elevaciones y procedimientos no orbitales

COLUMNAS Y FILAS											
		P1	P2	PZ en C	PZ en C	PZ en C	TP en C	TC en C	TC en C	TC en C	TC en C
				+PZ1 en F	+PZ2 en F				+PZ1 en F	+PZ2 en F	ORBITAL
TM	AJUSTE	1.53	0.90	0.92	0.92	0.84	0.92	0.92	0.92	0.84	-
	TEST	1.32	0.93	0.95	0.97	0.85	0.96	0.93	0.95	0.83	-
SP-P	AJUSTE	6.44	5.53	0.81	0.81	0.81	0.82	0.81	0.81	0.81	0.82
	TEST	6.86	5.78	0.91	0.90	0.97	0.93	0.90	0.90	0.96	0.82
SP-XS	AJUSTE	2.23	1.90	1.05	0.89	0.86	1.07	1.08	0.93	0.89	0.83
	TEST	2.65	3.47	1.40	1.18	1.07	1.36	1.35	1.12	1.00	0.98
SEG-P	AJUSTE	1.30	1.16	0.84	0.83	0.81	0.84	0.84	0.84	0.82	0.70
	TEST	2.01	1.68	1.03	1.04	0.99	1.03	1.02	1.03	0.97	0.70

Velocidad de proceso

La Tabla 4 recoge el tiempo empleado por un ordenador tipo VAXStation 3100 para efectuar la corrección de una imagen de 1024 píxeles x 1024 píxeles con la mayoría de los métodos planteados; también se indica el factor de aumento del tiempo de ejecución respecto de P1.

P1	P2	PZ en C	PZ en C	PZ en C	TP en C	TC en C	TC en C	TC en C	TC en C	TC en C
			+PZ1 en F	+PZ2 en F				+PZ1 en F	+PZ2 en F	ORBITAL
1'25"	1'33"	1'38"	1'52"	1'55"	1'42"	2'44"	2'45"	2'53"	35'24"	
x1.00	x1.06	x1.10	x1.22	x1.24	x1.14	x1.95	x1.96	x2.02	x28.19	

TABLA 4

Tiempo de proceso para corregir una imagen de 1024 x 1024 píxeles y factor respecto a P1. Notación en el texto.

Conclusiones

La mejora conseguida al introducir el relieve en las correcciones es numéricamente evidente y metodológicamente notable, ya que con un planteamiento sencillo y de fácil implementación hemos conseguido errores subpíxel en columnas y filas en todas las pruebas efectuadas, incluso en el caso de imágenes SPOT con ángulos de visión lateral importantes (10.4°) o en segmentos de 4 imágenes pancromáticas. Podríamos resumir las principales características de los modelos propuestos como las siguientes:

Simplicidad

- La implementación de los programas necesarios (ajuste a partir de los puntos de control y rectificación de las imágenes) es sencilla.
- Los modelos no presentan comportamientos extraños fuera de los PC.

Fidelidad

- El grado de ajuste obtenido es muy satisfactorio ya que obtenemos, tanto en los ajustes como en los tests, errores RMS subpíxel incluso en imágenes SPOT oblicuas. Los resultados son mejores que los obtenidos con los métodos tradicionales basados en polinomios, y casi tan buenos, para SPOT, como los obtenidos con modelos orbitales.

Potencia

- La rectificación se efectúa de forma prácticamente tan rápida como con los modelos polinómicos clásicos.

Estas características nos conducen a aconsejar la aplicación de uno de estos modelos en la rectificación de imágenes Landsat y SPOT y en particular el polinómico con z para las columnas, dada su simplicidad y fidelidad.

Bibliografía

- Ardizzone, J., A. Arozarena, J. Delgado, M. Herrero, G. Villa and P. VivaS.: 1993 Analisis estadístico para la corrección geométrica de imágenes de satélite. IV Reunión Científica de la Asociación Española de Teledetección, Sevilla, Spain (November 1991).
- Beyer, E.P.: 1983, Thematic Mapper Geometric Correction Processing. *Seventeenth International Symposium on Remote Sensing of the Environment, Ann Arbor, Michigan*, pp.:319-334.
- Billingsley, F.C.: 1983, Data Processing and Reprocessing. in Colwell, R.N. (ed.) *Manual of Remote Sensing. American Society of Photogrammetry*, Falls Church, Virginia, pp.719-792.
- Chuvieco, E.: 1990, Fundamentos de teledetección espacial. Rialp, Madrid, Spain, 453 p.
- Gugan, D.J.: 1987, Practical aspects of topographic mapping from SPOT imagery. *Photogrammetric Record*, 12(69):349-355.

Mejoras en la corrección geométrica de imágenes LANDSAT-TM y SPOT-HRV mediante el uso combinado de modelos digitales de elevaciones y procedimientos no orbitales

- Kratky:** 1988, Rigorous stereophotogrammetric treatment of SPOT images. Colloque International SPOT-1: *Utilisation des images, bilan, résultats*, Paris, France, pp.1281-1288.
- Konecny, G., P. Lohmann, H. Engel and E. Kruck:** 1987, Evaluation of SPOT Imagery on Analytical Photogrammetric Instruments. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 53(9):1223-1230.
- Labovitz, M.L. and J.W. Marvin:** 1986, Precision in Geodetic Correction of TM Data as a Function of the Number, Spatial Distribution, and Success in Matching of Control Points: A Simulation. *Remote Sensing of the Environment*, 20:237-252.
- Light, D.L.:** 1986, Satellite Photogrammetry. in Slama, C.C. (ed.) *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, pp. 883-977.
- Lillesand, T.M. and R.W. Kiefer:** 1987, *Remote Sensing and Image Interpretation*. John Wiley & Sons, New York, N.Y., 721 p.
- Marvin, J.W., M.L. Labovitz and R.E. Wolfe:** 1987, Derivation of a Fast Algorithm to Account for Distortions Due to Terrain in Earth-Viewing Satellite Sensor Images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-25 (2):244-251.
- Mikhail, E.M.:** 1976, *Observations and Least Squares*. IEP 1976, New York, N.Y.
- Novak, K.:** 1992, Rectification of Digital Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 58(3):339-344.
- Priebbenow, R. and E. Clerici:** 1988, Cartographic Applications of SPOT Imagery. Colloque International SPOT-1: *Utilisation des images, bilan, résultats*, Paris, France, pp.1189-1194.
- Rodríguez, V., P. Gigord, A.C. de Gaujac and P. Munier:** 1988, Evaluation of the Stereoscopic Accuracy of the SPOT Satellite. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 54(2):217-221.
- Salamonowicz, P.H.:** 1986, Satellite Observation and Position for Geometric Correction of Scanner Imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 52(4):491-499.
- Slama, C.C. (ed.):** 1986, *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, 1056 pp.
- SPOT-Image:** 1986, SPOT Standard CCT Format. SPOT-Image, Toulouse, pp.13.4-13.5.
- Wong, K.W.:** 1986, Basic Mathematics of Photogrammetry. in Slama, C.C. (ed.) *Manual of Photogrammetry*. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, pp. 37-101.

