

Restitución de imágenes SPOT utilizando el modelo digital del terreno

V. PALA I COMELLAS y R. ARBIOL I BERTRAN

Resumen

Describimos la metodología utilizada para corregir geométricamente las imágenes SPOT con el objeto de elaborar mapas de satélite sujetos a las especificaciones de precisión de la escala 1:50 000.

Partiendo de puntos de control de los que se conocen las coordenadas UTM (X,Y), altura (H), y la posición dentro de la imagen, calculamos, por ajuste mínimo-cuadrático, los parámetros que permiten resolver las ecuaciones de colinearidad para cada línea de la imagen.

Uno de los objetivos perseguidos es la funcionalidad del sistema y/o su posible aplicación sistemática. Ello es posible gracias a una simplificación en la modelización que, aún cuando reduce la complejidad del problema, permite ajustarnos a los requisitos de precisión de la escala de trabajo.

Presentamos los resultados obtenidos a partir del canal pancromático SPOT y el modelo digital del terreno DMA (Defense Mapping Agency).

1. Introducción

La confección y revisión de mapas necesita de una precisión que depende de la escala de publicación. Basándonos en las especificaciones del "Institut Géographique National" (IGN) de Francia [ROS79], que considera como desviación tipo 0.2 mm. y error máximo 2.7 veces la desviación tipo, obtenemos la siguiente tabla, según la cual el canal pancromático del satélite SPOT, con unas dimensiones de pixel de 10 x 10 metros, permite la elaboración de cartografía a escala 1:50 000.

Escala	Error Cuad. Medio	Error Max.
1: 50 000	10 m.	27 m.
1:100 000	20 m.	54 m.
1:250 000	50 m.	135 m.
1:500 000	100 m.	270 m.

Sin embargo, las imágenes de satélite presentan problemas de carácter geométrico. Las distorsiones más comunes son las debidas a la no instantaneidad en la captación de todos los píxeles de la imagen, lo que provoca que los cambios en la actitud del sensor, órbita del satélite, rotación de la Tierra y relieve, entre otros posibles factores, tengan efecto sobre la coherencia geométrica de la imagen registrada.

En el caso de la serie LANDSAT, las distorsiones producidas por el relieve son poco importantes y generalmente la corrección de la geometría se establece a partir de la elaboración de polinomios

(de primer o segundo grado) que relacionan entre si los sistemas de coordenadas imagen-objeto. Dichos polinomios se construyen a partir de puntos de control, que no tienen en cuenta el relieve.

En cuanto a SPOT, las tomas laterales amplifican las distorsiones provocadas por el relieve tal y como queda representado en la figura a.

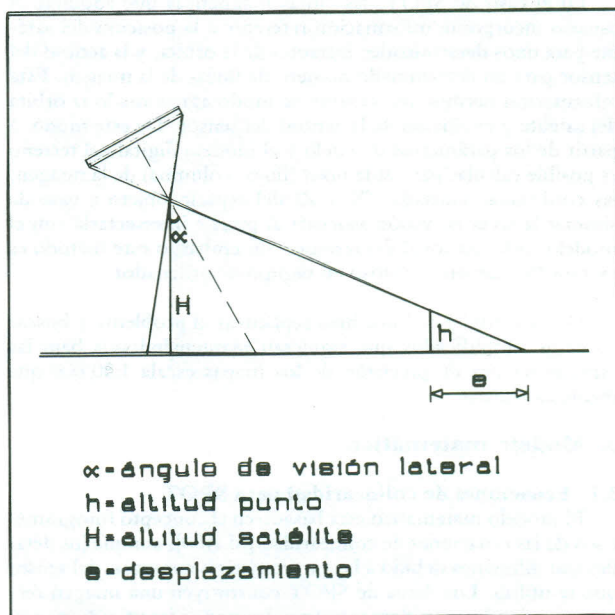


Figura a

En la tabla que sigue resumimos los desplazamientos (en metros) en función del ángulo de visión lateral y las altitudes.

Altitud	Angulo visión lateral		
	0 grad.	5 grad.	10 grad.
2 000	72.12	247.09	424.77
1 000	36.06	123.55	212.38
500	18.03	61.77	106.19
100	3.61	12.35	21.24

A continuación resumizamos los desplazamientos para un ángulo de visión lateral de 7.3 grados correspondiente a la imagen que tratamos. Se presentan en función de la distancia al centro de la imagen y de las altitudes del terreno. Podemos observar como la posición respecto del centro de la imagen influye relativamente poco en comparación con las altitudes. La corrección de estas deformaciones no puede ser abordado con el clásico modelo polinomial y precisa de nuevos algoritmos.

Altitud	Distancia al centro				
	30 Km.	15 Km.	0 Km.	-15 Km.	-30 Km.
2 000	328.68	292.62	256.56	220.51	184.45
1 000	164.34	146.31	128.28	110.25	92.22
500	82.17	73.16	64.14	55.13	46.11
100	16.43	14.63	12.83	11.03	9.22

2. Primeras aproximaciones

En los últimos años, diversas publicaciones han abordado la corrección geométrica utilizando un modelo digital del terreno, es decir, teniendo en cuenta las altitudes del mismo [TEI80], [FRE84], [MAR87], [SAL86]. La mayoría persiguen una modelización estricta que reproduzca las condiciones de captación de la imagen. Para ello es preciso, establecer la órbita del satélite y las variaciones en la actitud del sensor para cada línea de la misma. Así Salamonowicz [SAL86] utiliza la técnica de minimización por mínimos cuadrados para obtener, a partir de unos pocos puntos de control, los parámetros de orientación y posición del satélite.

En el caso de SPOT, las cintas magnéticas que adquiere el usuario incorporan información referente a la posición del satélite para unos determinados instantes de la órbita, y la actitud del sensor para un determinado número de líneas de la imagen. Esta información permite reconstruir de modo aproximado la órbita del satélite y evolución de la actitud del sensor. De este modo, a partir de los parámetros de vuelo y el modelo digital del terreno es posible calcular para cada pixel (línea, columna) de la imagen, las coordenadas asociadas (X,Y,Z) del espacio objeto a base de simular la recta de visión asociada al pixel e intersecarla con el modelo tridimensional del terreno. Sin embargo este método es extraordinariamente costoso en tiempo de ordenador.

Dicha complejidad nos hizo replantear el problema y buscar modelos simplificados que siguieran manteniéndonos bajo las especificaciones de precisión de los mapas escala 1:50 000 que íbamos a realizar.

3. Modelo matemático

3.1. Ecuaciones de colinearidad para SPOT

El modelo matemático está basado en el concepto fotogramétrico de las ecuaciones de colinearidad [SLA80], aunque los detalles son diferentes debido a las características concretas del sensor que se utiliza. Los datos de SPOT constituyen una imagen rectangular donde cada elemento (pixel) queda identificado por su línea (L) y columna (C). Cada línea ha sido registrada independientemente por una barra o vector de sensores. Todos los píxeles de una misma línea han sido obtenidos de forma instantánea.

El espacio sensor (figura b) es un espacio tridimensional donde el eje-u está dispuesto según la dirección de la órbita del satélite; el eje-v según la dirección de la barra de sensores y el eje-w es perpendicular al plano (u,v). La barra de sensores está a una distancia arbitraria $w = 1$ del plano (u,v) y el centro de la barra tiene coordenadas (0,0,1)

Para una línea concreta cada pixel tiene las siguientes coordenadas:

$$u = 0$$

$$[1] \quad v = \frac{\tan(\text{CTFOV}/2)}{\text{NUMPIX}/2} * (C - \text{NUMPIX}/2)$$

$$w = 1$$

donde CTFOV = Angulo de visión global de la barra.
NUMPIX = Número de sensores de la barra.

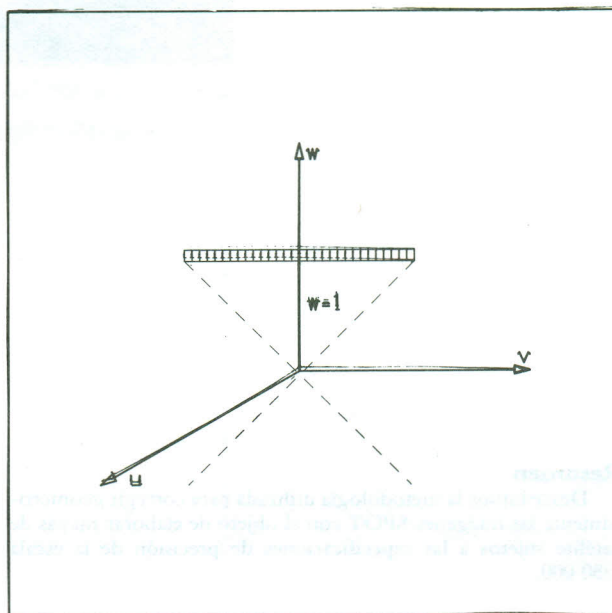


Figura b

El sistema de coordenadas objeto queda representado en la figura c. En el caso de una modelización estricta se utiliza el sistema de coordenadas geocéntrico, con origen en el centro de la Tierra. En nuestro caso, simplificaciones posteriores nos permitirán asociar este espacio con el sistema de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator).

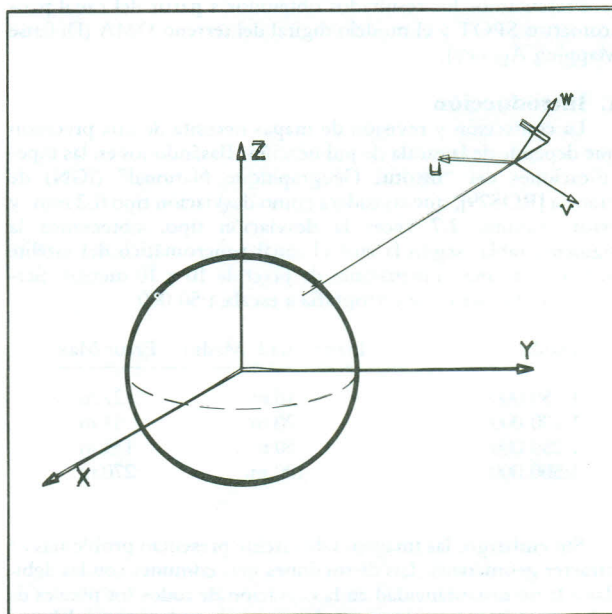


Figura c

Las ecuaciones fotogramétricas de colinearidad son absolutamente válidas para cada línea de la imagen. Dado el vector posicional de un punto de control sobre el terreno (espacio objeto) e

y el vector posicional del satélite s en el mismo espacio, podemos establecer la siguiente relación (figura d):

$$[2] \quad \begin{aligned} s - e &= -g \\ \text{siendo } s &= [X_s, Y_s, Z_s] \\ e &= [X_e, Y_e, Z_e] \end{aligned}$$

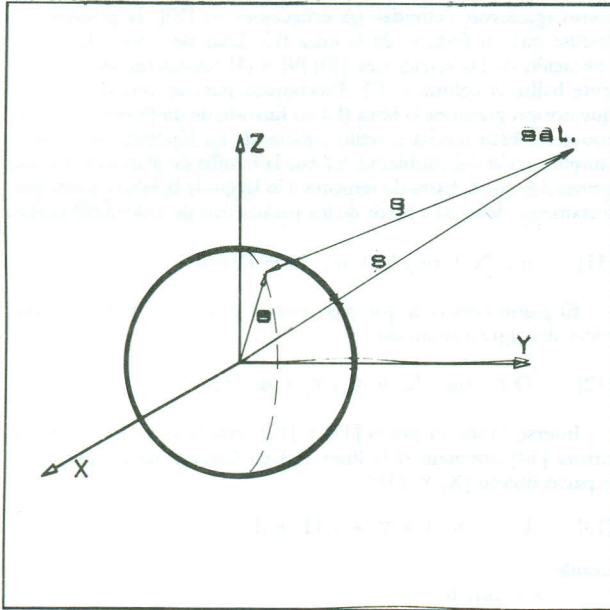


Figura d

La matriz de orientación M , que es función de los ángulos de actitud del sensor (ϖ, ρ, κ), es tal que aplicada a las coordenadas objeto de un punto nos proporciona sus coordenadas sensor. Queda definida del siguiente modo:

$$[3] \quad \begin{aligned} m_{11} &= \cos(\kappa) \cos(\rho) \\ m_{12} &= \text{sen}(\varpi) \text{sen}(\rho) \text{sen}(\kappa) + \cos(\varpi) \text{sen}(\kappa) \\ m_{13} &= -\cos(\varpi) \text{sen}(\rho) \cos(\kappa) + \text{sen}(\varpi) \text{sen}(\kappa) \\ m_{21} &= -\text{sen}(\kappa) \cos(\rho) \\ m_{22} &= -\text{sen}(\varpi) \text{sen}(\rho) \text{sen}(\kappa) + \cos(\varpi) \cos(\kappa) \\ m_{23} &= \cos(\varpi) \text{sen}(\rho) \text{sen}(\kappa) + \text{sen}(\varpi) \cos(\kappa) \\ m_{31} &= \text{sen}(\rho) \\ m_{32} &= -\text{sen}(\varpi) \cos(\rho) \\ m_{33} &= \cos(\varpi) \cos(\rho) \end{aligned}$$

Si aplicamos la matriz (M) a la ecuación [2] tenemos:

$$[4] \quad (M) (s - e) = -(M) g$$

La única diferencia entre los vectores representados en [4] y [1] es la longitud de los mismos. Así pues, podemos establecer de modo general

$$[5] \quad [u, v, w] = -k(M)(s-e)$$

que de modo más concreto para el caso SPOT según [1] y [2] se traduce en

$$[6] \quad [0, v, 1] = -k(M)[X_s - X_e, Y_s - Y_e, Z_s - Z_e]$$

Si desarrollamos [6] tenemos

$$[7] \quad \begin{aligned} 0 &= -k(m_{11}(X_s - X_e) + m_{12}(Y_s - Y_e) + m_{13}(Z_s - Z_e)) \\ v &= -k(m_{21}(X_s - X_e) + m_{22}(Y_s - Y_e) + m_{23}(Z_s - Z_e)) \\ 1 &= -k(m_{31}(X_s - X_e) + m_{32}(Y_s - Y_e) + m_{33}(Z_s - Z_e)) \end{aligned}$$

Dividiendo las dos primeras ecuaciones por la tercera podemos eliminar la constante k .

$$[8] \quad \begin{aligned} \frac{m_{11}(X_s - X_e) + m_{12}(Y_s - Y_e) + m_{13}(Z_s - Z_e)}{m_{31}(X_s - X_e) + m_{32}(Y_s - Y_e) + m_{33}(Z_s - Z_e)} &= 0 \\ v - \frac{m_{21}(X_s - X_e) + m_{22}(Y_s - Y_e) + m_{23}(Z_s - Z_e)}{m_{31}(X_s - X_e) + m_{32}(Y_s - Y_e) + m_{33}(Z_s - Z_e)} &= 0 \end{aligned}$$

3.2. Modelo simplificado

Las imágenes SPOT de nivel 1A presentan como principales distorsiones las ocasionadas por la rotación de la Tierra, la curvatura de la misma, la perspectiva, y el desnivel del terreno. Consideramos como sistema de coordenadas objeto el espacio UTM más las altitudes (figura e).

La órbita será rectilínea basándonos en las siguientes consideraciones:

- Hemos considerado la Tierra plana. El barrido de una Tierra plana, y no curvada, es coherente con una órbita rectilínea, y no elíptica.
- El tiempo de captación de una imagen SPOT es de unos 9 segundos. En este breve espacio de tiempo el arco de elipse recorrido se puede aproximar por una recta, podemos considerar que no existen variaciones en los ángulos de actitud del sensor y que el satélite vuela a una altitud constante.

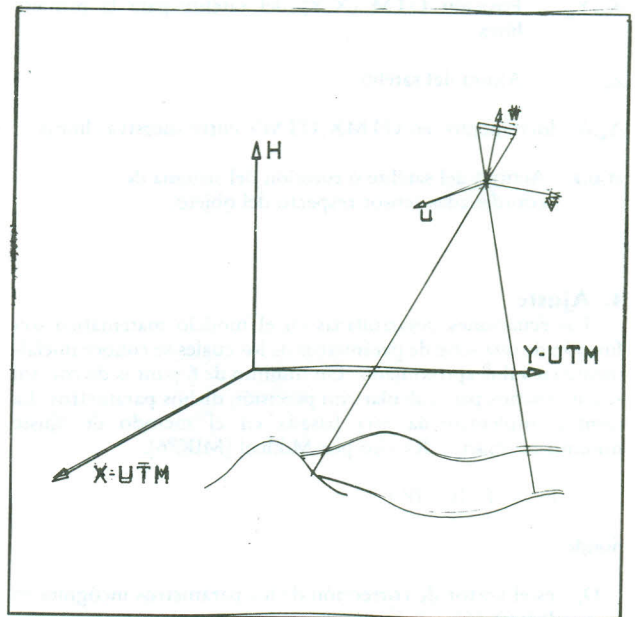


Figura e

En estas condiciones el efecto de rotación de la Tierra, que provoca un desplazamiento entre las líneas, queda resuelto por un ligero desplazamiento en dicha órbita. En cuanto a la curvatura de la Tierra, ésta puede ser aproximada por un plano y persistirán únicamente los errores residuales del geode respecto del plano. El efecto de perspectiva cabe mantenerlo pues reproducimos las condiciones de captación de la imagen donde, en el caso de visión lateral, cada pixel presenta diferentes dimensiones sobre el terreno. Por último, para corregir las deformaciones provocadas por el relieve, precisaremos de un modelo digital del terreno.

Con todo lo anterior podemos plantear las ecuaciones del modelo simplificado que proponemos:

$$[9] \quad \begin{aligned} F_x &= \frac{m_{11}(X_s - X) + m_{12}(Y_s - Y) + m_{13}(Z_s - H)}{m_{31}(X_s - X) + m_{32}(Y_s - Y) + m_{33}(Z_s - H)} = 0 \\ F_y &= v - \frac{m_{21}(X_s - X) + m_{22}(Y_s - Y) + m_{23}(Z_s - H)}{m_{31}(X_s - X) + m_{32}(Y_s - Y) + m_{33}(Z_s - H)} = 0 \end{aligned}$$

donde

- X_s, Y_s = Posición del satélite en coordenadas UTM
- Z_s = Altura del satélite constante.
- m_{ij} = Elementos de la matriz de rotación que pasa coordenadas sensor a coordenadas (UTMX, UTM Y, H)
- $[X, Y, H]$ = Coordenadas de un punto en el sistema objeto.
- $[0, v, 1]$ = Coordenadas de un punto en el sistema sensor.

A partir de la consideración de órbita rectilínea:

$$[10] \quad \begin{aligned} X_s &= X_o + \Delta_x L \\ Y_s &= Y_o + \Delta_y L \end{aligned}$$

donde:

- X_o, Y_o es la posición UTM del satélite para la primera línea de la imagen.
- Δ_x, Δ_y es el incremento en UTM (X, Y) de la órbita por cada línea de imagen.
- L = línea de la imagen.

De todas las ecuaciones planteadas los parámetros desconocidos son 8:

- X_o, Y_o Posición UTM (X, Y) del satélite para la primera línea.
- Z_s Altura del satélite.
- Δ_x, Δ_y Incrementos en UTM X, UTM Y entre sucesivas líneas
- ϖ, ρ, κ Actitud del satélite o rotación del sistema de coordenadas sensor respecto del objeto.

4. Ajuste

Las ecuaciones desarrolladas en el modelo matemático son función de una serie de parámetros de los cuales se conoce inicialmente su valor aproximado. Un mínimo de 6 puntos de control son necesarios para calcular con precisión dichos parámetros. La técnica implementada está basada en el método de ajuste mínimo-cuadrático descrito por Mikhail [MIK76].

$$D_i = (B^t B)^{-1} B^t f$$

donde

- D_i es el vector de corrección de los parámetros incógnita en la iteración i-ésima.
- B^t es la matriz traspuesta de B.
- $(\)^{-1}$ es la matriz inversa.
- $B = [B_1, B_2, \dots, B_n]^t$
n es el número de puntos de control
- B_i son las derivadas parciales de F_x, F_y [9] respecto de las 8 incógnitas.
- f es el vector resultado de la evaluación de las ecuaciones de colinearidad para el estado actual de las incógnitas.

El algoritmo finaliza cuando el término de corrección D en una determinada iteración es suficientemente pequeño para todos sus elementos.

Si la estimación inicial de los parámetros no es apropiada, el algoritmo puede no converger hacia la solución.

La obtención de los parámetros nos permite establecer las ecuaciones de colinearidad. Con ellas, a partir de las coordenadas

de un pixel (L_i, C_i), podemos obtener sus coordenadas (X_i, Y_i, H_i) por intersección de la recta definida por aquel con la superficie descrita por el modelo digital del terreno en un espacio de 3 dimensiones. Sin embargo esto supone un gasto considerable de tiempo de ordenador.

La situación ideal es el modelo inverso, es decir, a partir de (X_i, Y_i, H_i) obtener las coordenadas (L_i, C_i) del pixel asociado. Tal y como quedaron definidas las ecuaciones en [10], la posición del satélite está en función de la línea (L). Una vez conocida ésta, la aplicación de las ecuaciones [10],[9] y [1] sucesivamente nos permite hallar la columna (C). Precisamos pues de una herramienta que nos proporcione la línea (L_i) en función de un punto (X_i, Y_i, H_i) concreto. Esto resulta sencillo a partir de las hipótesis descritas de simplificación del problema, ya que la familia de planos de barrido generados por la barra de sensores a lo largo de la órbita queda perfectamente definida a partir de los parámetros de actitud del sensor:

$$[11] \quad m_{11} X + m_{12} Y + m_{13} H + D = 0$$

El plano concreto que pasa por el punto (X_i, Y_i, H_i) se establece del siguiente modo

$$[12] \quad D = -(m_{11} X_i + m_{12} Y_i + m_{13} H_i)$$

Intersectando el plano [11] y [12], con la recta que define la órbita [10] obtenemos la línea (L_i) en función de un punto del espacio objeto (X_i, Y_i, H_i):

$$[13] \quad L = a X_i + b Y_i + c H_i + d$$

donde

$$\begin{aligned} a &= m_{11}/p \\ b &= m_{12}/p \\ c &= m_{13}/p \\ d &= - \frac{(m_{11} Z_s + m_{12} X_o + m_{13} Y_o)}{p} \\ p &= \Delta_x m_{11} + \Delta_y m_{12} \end{aligned}$$

Así pues, todas las ecuaciones quedan resueltas y son cómodamente utilizables. El valor radiométrico que se asigna a cada uno de los píxeles de la imagen resultante se establece a partir de una interpolación bilineal.

5. Resultados

La metodología descrita ha sido aplicada en la corrección geométrica del canal pancromático de la imagen SPOT 45-267, registrada el 31 de Marzo de 1986, sobre un área que incluye Barcelona. Los desniveles máximos son de unos 500 metros. El ángulo de desplazamiento lateral del sensor es de 7.3 grados. Se utilizaron 19 puntos de los cuales se obtuvo las coordenadas en la imagen corregida y las UTM's a partir de los mapas topográficos de la Corporación Metropolitana de Barcelona a la escala 1:10 000. El modelo digital del terreno fue el de la DMA (Defense Mapping Agency) que contiene información de cada 3 segundos en longitud y latitud, y errores teóricos de 280 metros en planimetría y 52.5 en altimetría. A su vez se desarrolló un test a partir de las altitudes correctas de dichos puntos, comprobando que los resultados mejorarían substancialmente si dispusiésemos de un MDT más preciso. La elaboración de modelos que reproduzcan con mayor fidelidad las condiciones reales de captación de la imagen y su implementación de forma eficiente, son temas de investigación que serán abordados en el ICC. En la siguiente tabla resumizamos los resultados:

	Err.Medio X/Y m	RMS X/Y m
Modelo polinomial (grado 2)	5.53 2.68	20.87 10.06
Modelo aprox. (DMA)	-4.68 2.74	11.02 9.86
Modelo aprox. (alt. correcta)	-2.95 2.58	9.57 9.60

Cabe esperar que la mejora que se aprecia al utilizar el MDT, respecto del modelo polinomial, será más importante para zonas con un desnivel más acusado. Modelos más estrictos nos permitirán en el futuro mejorar los resultados aunque habrá que evaluar la mejora en función de la complejidad de cálculo.

6. Bibliografía

- [ROS79] R. ROSSO, 1979. "Qualite geometrique des images des capteurs a balayage". Cartographie spatiale de la Terre. pp.81-107. CNES-IGN.
- [FRE84] J. FREW, 1984. "Registering Thematic Mapper imagery to digital elevation models". 1984 Machine Processing of Remotely sensed data symposium, pp.432-435.
- [MAR87] J.W. MARVIN, M.L. LABOVITZ, R.E. WOLFE, 1987. "Derivation of a fast algorithm to account for distortions due to terrain in earth-viewing satellite sensor images". IEEE transaction of geoscience and remote sensing, vol. ge-25, no.2, pp.244-251.
- [MIK76] E.M. MIKHAIL, 1976. Observations and Least Squares. IEP 1976, New York, N.Y.
- [SAL86] P.H. SALAMONOWICZ, 1986. "Satellite orientation and position for geometric correction of scanner imagery". PE&RS, vol.52, no.4, pp. 491-499.
- [SLA80] C.C. SLAMA, 1980. Manual of Photogrammetry, 4th ed., ch. 17. American Society of Photogrammetry, Falls Church, Va., pp.906-915.
- [TEI80] P.M. TEILLET, B. GUINDON, D.G. GOODENOUGH, 1980. "Integration of Remote Sensing data sets by rectification to UTM coordinates with the use of digital terrain models". XIV Congress of the International Society for Photogrammetry, Hamburg, pp.726-733.