

LA CORRECCIÓN GEOMÉTRICA RIGUROSA: UN MAL NECESARIO PARA LA SALUD DE SUS RESULTADOS¹

“Doctor” Thierry Toutin
Centro Canadiense de Teledetección
Calle Booth 588, 3er piso
Ottawa, Ontario, Canada K1A 0Y7
Teléfono: (613) 947-1293; Fax: (613) 947-1385
E-mail: thierry.toutin@ccrs.nrcan.gc.ca

RESUMEN

Desde la primera utilización de los datos de teledetección en 1972, en la mayoría de los sistemas de análisis digital se propagaron síntomas precursoros como un virus: el mal de la corrección geométrica. Esa enfermedad crónica adopta la forma de síndrome para quienes padecen de la misma: las repercusiones de las distorsiones y la necesidad de correcciones.

Después del análisis de los síntomas de ese mal, se llegó a un diagnóstico: es un mal necesario pero, afortunadamente, curable. Se comparan diferentes prescripciones, cualitativa y cuantitativamente, en términos de posología, efectos secundarios, convalecencia, recaída y curación: el mejor es un método fotogramétrico riguroso que da cuenta de todas las distorsiones geométricas del sistema global y que respeta la índole de cada uno de los componentes del sistema, y, por ende, la integridad de los datos.

ANÁLISIS DE LOS SÍNTOMAS

Desde 1972, en la mayoría de los sistemas de análisis digital se han propagado como un virus síntomas precursoros: el mal de la corrección geométrica. Para quienes padecen esa enfermedad crónica, ésta se manifiesta bajo la forma de un síndrome caracterizado por las repercusiones de las distorsiones y la necesidad de correcciones.

En 1972, las repercusiones de las distorsiones eran insignificantes por diferentes razones:

¹ Traducción del francés: «La correction géométrique rigoureuse : un mal nécessaire pour la santé de vos résultats, Journal canadien de télédétection, Vol. 22, No. 2, juin 1996, pp. 184-189.»

- las imágenes tenían siempre un enfoque al nadir y el pixel era bastante burdo (80 m);
- los productos resultantes del tratamiento de las imágenes eran analógicos;
- la interpretación de los productos se hacía de manera visual; y
- no existía fusión e integración de datos de múltiples fuentes.

En 1998, aunque las distorsiones continuaban siendo del mismo tipo, las repercusiones han dejado de ser desdeñables:

- las imágenes tienen a veces un enfoque lateral y el pixel se ha refinado (menos de 10 m);
- los productos resultantes son digitales;
- la interpretación de los productos se hace frecuentemente por computadora;
- la fusión de datos de múltiples fuentes (varios sensores y plataformas) es una práctica corriente;
- la integración de datos de múltiples formatos (vectorial/matricial) está conforme a la tendencia en geomática.

Se debe señalar que los datos, los tratamientos, los productos, el análisis y la interpretación han creado necesidades, para corregir las distorsiones geométricas, muy diferentes entre esos dos períodos: en 1972, estaban en la etapa embrionaria, y, en 1998, han llegado a ser vitales.

La evolución de esas necesidades, asociada a la de las técnicas y las tecnologías, nos impone el mal de la corrección geométrica, para lograr la salud de nuestros productos, de nuestros análisis y de nuestras interpretaciones. Aunque el traumatismo no sea todavía fatal, es de todas maneras apremiante.

DIAGNÓSTICO

En vistas de la evidencia de los síntomas enumerados, el diagnóstico es relativamente sencillo: es un mal necesario pero, afortunadamente, curable.

Necesario, debido al contexto epidémico en que evoluciona la geomática. Ésta integra datos de múltiples fuentes y medios para los cuales es esencial una precisión geométrica de posicionamiento. La adecuada correlación entre los diferentes datos permite un análisis más preciso y una interpretación más fiable de los datos.

Curable, ya que en todo el mundo numerosos “doctores” han examinado los orígenes del mal, identificando los diferentes factores que corrompen la creación de la imagen. Como un cáncer que gangrena las diferentes partes de su sistema, la contaminación se propaga pixel por pixel, infestando la integridad geométrica y radiométrica de sus datos. La fuente de esos males ha sido diagnosticada en el laboratorio y está vinculada a tres componentes del sistema tomavistas:

- la plataforma con su posición, su velocidad y su orientación;
- el sensor con sus ángulos de orientación, su tiempo de integración o su impulso y su campo de vista instantáneo;

- la Tierra con sus parámetros de la elipsoide que es una aproximación del geoide y la altura del terreno.

Aunque al parecer son independientes, las distorsiones relativas a esos componentes guardan una estrecha correlación, es decir, propagan el mismo efecto en el proceso de creación de la imagen. He aquí algunos ejemplos de simbiosis entre las diferentes distorsiones y deformaciones:

- el balanceo de la plataforma y el ángulo de toma de vistas del sensor;
- el efecto panorámico del sensor, la altura de la plataforma y la curvatura de la Tierra;
- la variación de la guiñada de la plataforma y la rotación de la Tierra;
- la altura del terreno, la variación de la velocidad de la plataforma y el tiempo de integración del sensor; y
- el campo de vista instantáneo del sensor; la variación lineal del balanceo y la posición geográfica sobre la Tierra; etc.

Por lo tanto, no debe concebirse el sensor solamente como instrumento de toma de vista, sino más bien adoptar un enfoque holístico en el diagnóstico: considerar la geometría total de toma de vista “plataforma + sensor + Tierra” en la evaluación de las distorsiones y de sus consecuencias. El desarrollo de un modelo de corrección geométrica debe reflejar la realidad física de la geometría global, respetando la naturaleza y la integridad de cada componente: “pensar globalmente pero actuar a nivel local...”

PRESCRIPCIÓN

Hubo una época en que los ligeros traumatismos ocasionados por las distorsiones geométricas que sufrían sus datos requerían solamente cuidados paliativos: una corrección polinómica de segundo orden, incluso, incorrectamente, de tercer orden si se diagnosticaba una urgencia. De todas maneras, el uso repetido de una prescripción de ese tipo puede dejar cicatrices a sus resultados y, en muchos casos, someter a gran estrés a su propietario.

Es por ello que, antes de pasar a los cuidados intensivos, se debe utilizar la mejor prescripción, resultado de las investigaciones relativas a las técnicas más avanzadas: un método riguroso de corrección geométrica que da cuenta de todas las distorsiones del sistema global y que respeta la naturaleza de cada uno de los componentes del sistema y, por ende, la integridad de sus datos.

Aunque desarrollada a título experimental en el laboratorio, esa prescripción se aplica fácilmente a diferentes tipos de imágenes en un contexto de producción. La posología recomendada es, una sola vez por imagen y sin ninguna restricción (incluso en caso de alergia del utilizador de los datos).

El cuadro 1 presenta un paralelo entre el método polinomio y el método riguroso, también llamado fotogramétrico (Toutin, 1995). Muestra también, en negrilla, tres de los ingredientes esenciales de la prescripción que determinan que la corrección geométrica sea rigurosa y robusta.

Aunque es bien conocido que las funciones polinómicas no están adaptadas para corregir con precisión y fiabilidad imágenes aeroportadas o espaciales, numerosos utilizadores continúan utilizándolas, sin conocer las implicaciones para los productos resultantes y los tratamientos ulteriores. Colwell (1983) da más información sobre las funciones polinómicas.

Con el fin de visualizar mejor cómo funciona esa prescripción, tomemos como ejemplo el Sistema de Rectificación de las Imágenes de la Teledetección (SRIT) elaborado por Geomática Canadá, dependencia del Ministerio de Recursos Naturales del Canadá (Toutin et Carbonneau, 1992).

Cuadro 1: Comparación de las características de los dos métodos

MÉTODO POLINOMIO	MÉTODO FOTOGRAMÉTRICO
No respeta la geometría de la toma de vistas	Respeta la geometría de la toma de vistas
No está relacionado con las causas de las distorsiones	Refleja las diferentes distorsiones
No tiene en cuenta la actitud	Utiliza los datos de efemérides y de actitud
No corrige la altura	Tiene cuenta de la altura (MDA)
Corrección local en los puntos de apoyo	Corrige globalmente la imagen
Ne filtra los errores	Filtra los errores gracias al conocimiento de la geometría
No hay compensación simultánea de las imágenes	Compensación simultánea de varias imágenes
Corrección de imagen por imagen para la integración	Corrección de imágenes sobre el terreno
Necesita muchos (20) puntos de apoyo por imagen	Utiliza contados (3-8) puntos de apoyo por imagen
Sensible a la distribución de los puntos de apoyo	Poco influenciado por la distribución de los puntos de apoyo (modelo global)
Problema de selección de los puntos de enlace	Selección de los puntos de apoyo en función de cada imagen

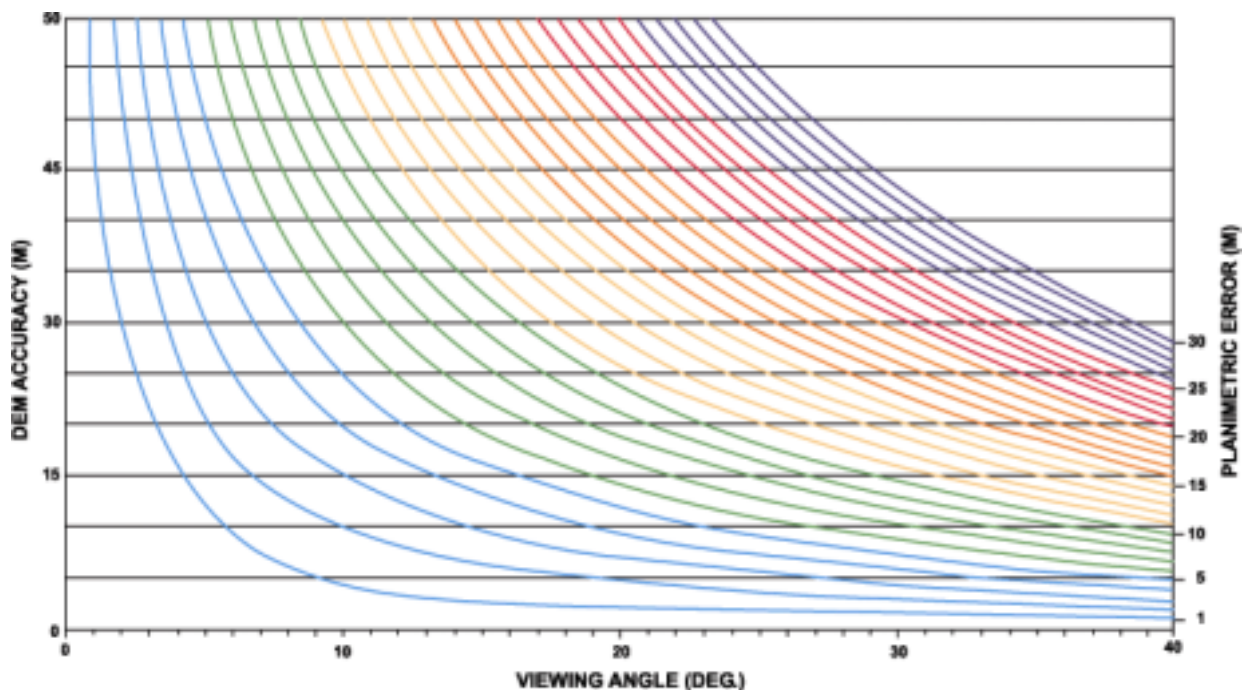
En el SRIT se han establecido cuatro módulos para las diferentes etapas del tratamiento:

- (1) lectura de las imágenes y, si existen, de los datos de efemérides y de actitud.

- (2) gestión interactiva de los puntos del terreno de una o varias imágenes, que permite encontrar el mejor conjunto de puntos de apoyo reduciendo al mínimo las residuales y los errores sobre los puntos de apoyo y de verificación, respectivamente;
- (3) cálculo de los parámetros de los modelos de corrección geométrica por un procedimiento iterativo de los cuadrados mínimos;
- (4) creación de imágenes rectificadas (orto-imágenes) y mosaicos, en el sistema de proyección cartográfica seleccionado por el utilizador (UTM, MTM, Lambert, etc.). El utilizador puede introducir un modelo digital de altura (MDA) o una altura media, dependiendo del relieve, el ángulo de toma de vistas y la precisión deseada en la aplicación.

El cuadro 2 es un ábaco que presenta cuantitativamente la relación entre los tres parámetros mencionados más arriba. Tomando en consideración sus necesidades, el utilizador, empleando ese ábaco, determina uno de esos parámetros en función de los otros dos. El ejemplo 1 muestra que con una imagen adquirida a un ángulo de 10° y un MDA con un error altimétrico de 45m, el error planimétrico engendrado sobre la rectificación de la imagen es de 9m. El ejemplo 2 demuestra que, para alcanzar una precisión planimétrica de 5 m con un MDA preciso a 10 m, la imagen debe ser captada con un ángulo de toma de vistas inferior a 23° .

Cuadro 2: Error planimétrico sobre la ortoimagen en función de la precisión del MDA y del ángulo de toma de vistas



Para los dos métodos (polinomio y fotogramétrico), las etapas del tratamiento descritas son poco más o menos similares, excepto por lo que respecta a los parámetros de toma de vistas y para la altimetría

(puntos de apoyo y MDA) que intervienen solamente en el método fotogramétrico. Antes de mostrar las repercusiones de esas dos prescripciones sobre los resultados y las imágenes en color compuesta, una imagen SPOT pancromática (SPOT-PAN) y cuatro imágenes Radar de Abertura Sintética (RAS), aeroportadas con enfoques opuestos (Este y Oeste) de la región de Sherbrooke (Quebec, Canadá) fueron corregidas geoméricamente por esos dos métodos con un MDA, y seguidamente las ortoimágenes RAS-Este y RAS-Oeste fueron presentadas en forma de mosaico. Por último, las radiometrías son combinadas utilizando la codificación intensidad-matiz-saturación (IMS) con RAS-Oeste/SPOT-PLA/RAS-Este.

El análisis de las comparaciones entre los dos métodos sobre los resultados del tratamiento geométrico se realiza en dos etapas:

- análisis cuantitativo con errores sobre 50 puntos de verificación (PV) después que los parámetros de los modelos se han calculado con 15 puntos de apoyo (PA); y
- análisis cualitativo con una comparación de los elementos cartográficos (carreteras, ríos, bosques, tala de bosques, etc.) sobre las dos ortoimágenes en color compuesta por IMS.

En el cuadro 3 se presentan los errores medios cuadráticos, máxima y el sesgo calculados sobre los 50 PV diferentes de los 15 PA. En todos los casos, el método fotogramétrico da mejores resultados que el método polinomio. En la dirección X, la desviación es todavía más visible a causa de las distorsiones altimétricas que son modelizadas rigurosamente en el método fotogramétrico.

Cuadro 3: Errores medios cuadráticos, máxima y sesgo (metros) para 50 puntos de verificación.

IMAGEN MÉTODO		SPOT-P		RAS1- Oeste		RAS-2 - Oeste		RAS1 - Este		RAS2 - Este	
		Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey	Ex	Ey
Fotogramétri co	EMQ	3,8	3,4	5,0	4,3	10,9	6,6	9,1	9,0	7,5	7,6
	Emax	-8,7	-9,9	-11,7	8,5	-24,4	-20,2	23,7	-22,8	-17,6	15,1
	Sesgo	1,4	-0,1	0,2	0,0	0,3	0,3	4,1	-1,8	0,3	-1,2
Polinomio	EMQ	30,0	16,3	13,3	10,3	21,8	14,6	15,7	10,0	21,4	9,1
	Emax	-68,1		-35,7	-	-46,0	35,1	46,9	27,5	-61,8	-17,5
	Sesgo	31,8		25,2		3,8	-2,9	3,9	-0,2	3,4	-3,3
		-11,8		-1,8	-1,4						
		11,5									

La Figura 1 es una comparación de las dos sub-ortoimágenes compuestas (4x3 km; pixel de 5 m) por el método fotogramétrico (arriba) y por el método polinomio (abajo) sobre las que se ha superpuesto el fichero vectorial de las carreteras (precisión 3-5 m). Los tratamientos radiométricos efectuados son idénticos para ambas imágenes.

La imagen de arriba es mucho más homogénea en los colores, las superficies y las variaciones. Como hay más contrastes entre los elementos, sus límites son netos y bien definidos.

En la imagen de abajo, las variaciones de los colores son mayores, lo que da una impresión de textura y la imagen parece más borrosa. Como hay menos contraste entre los elementos, parecen menos bien definidos.

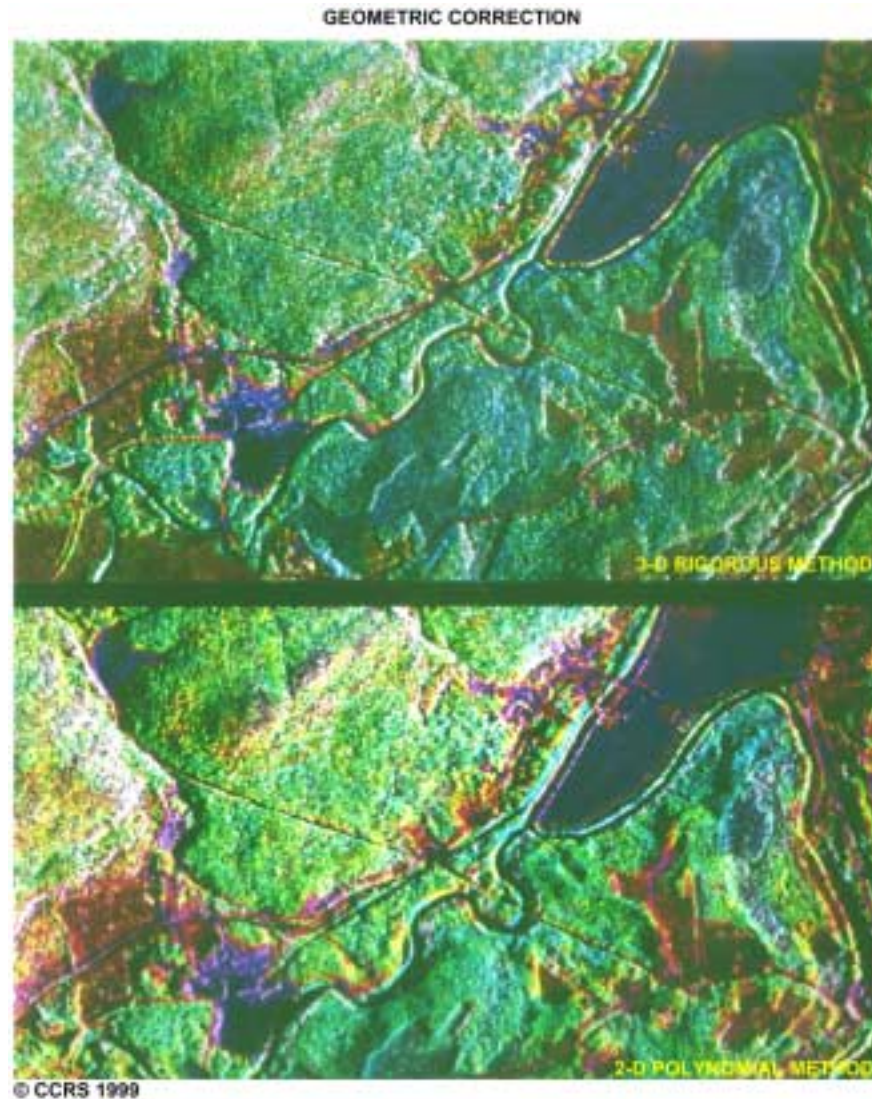


Figura 1

Utilizando el fichero vectorial de la carta topográfica, el análisis de ciertos elementos cartográficos ha mostrado que en la imagen de abajo (las letras **a**, **b**, ... están relacionadas con partes de imagen identificadas en la Figura 1):

- a:** los elementos lineales (carreteras, ríos) están duplicados o incluso han desaparecido (puente, carreteras); lo que corresponde a un error relativo de superposición;
- b:** la falta de claridad en esa parte no permite discernir la carretera del bosque y de los suelos pelados;
- c:** en los elementos de superficie, aparecen artefactos; hay una inversión entre el bosque (color verde) y los bosques talados (color vino);
- d:** la textura y las variaciones de color no corresponden a información real.

Esos ejemplos, con otros similares que pueden ser detectados sobre esas subimágenes muestran claramente que los errores de superposición geométrica han generado en la imagen en color compuesta errores de mezclado radiométrico y, por ende, artefactos e información errónea que no tienen realidad física.

El fichero vectorial de las carreteras, superpuesto a esas subimágenes, permite verificar la precisión geométrica: el análisis visual confirma los resultados estadísticos precedentes para el método polinomio (30-50m), pero muestra una mejora para el método fotogramétrico (10m) con errores máximos de veinte metros. Verificaciones en otras porciones de imágenes demuestran la coherencia de los resultados. Esos valores corresponden al error absoluto de superposición.

CONVALECENCIA Y CURACIÓN

Para toda enfermedad crónica, es necesario tomar medidas eficazmente si deseamos que la convalecencia sea más o menos larga.

Este proceso completo de corrección geométrica permite seguir y controlar la propagación de los errores de la imagen bruta a la ortoimagen en función de la precisión de los diferentes datos (imagen, puntos de apoyo, MDA). Recíprocamente, la comprensión de esa propagación da a la persona que hace uso del proceso la ocasión de administrar mejor la adquisición de los datos y reducir al mínimo los costos de adquisición de los datos (PA, MDA, imágenes). Los dos ejemplos siguientes demuestran como, dependiendo de la aplicación, se pueden establecer selecciones.

Para una aplicación topográfica que requiere una precisión de 5 m, el utilizador deberá seleccionar:

- una imagen SPOT pancromática, de 6 a 8 puntos de apoyo con coordenadas cartográficas XYZ de precisión 3 m, estereonumerizadas a partir de fotos aéreas, y coordenadas de imagen con una precisión de un tercio de pixel.
- un MDA de una precisión de 5 a 10 m en función del relieve y del ángulo de enfoque (véase el cuadro 2).

Para una aplicación temática que requiere una precisión de 20 m, el utilizador deberá seleccionar:

- una imagen SPOT multibanda o LANDSAT-TM,

- de 6 a 8 puntos de apoyo con coordenadas cartográficas digitalizadas sobre una carta topográfica a escala de 1:20.000 o 15 puntos de apoyo a partir de una carta topográfica a escala de 1:50.000 y coordenadas de imagen con una precisión de medio pixel,
- un MDA con una precisión de 50 a 100 m o un plano medio de altura en función del relieve y del ángulo de enfoque (ver el cuadro 2).

No son reglas absolutas, pero la experiencia adquirida con una corrección geométrica rigurosa sobre diferentes conjuntos de datos (tipos de imágenes, cantidad de puntos de apoyo, precisión del MDA, precisión deseada, etc.) puede fácilmente transponerse a una nueva aplicación y nuevos datos. Esto no ocurre con las correcciones polinómicas que crean artefactos cuando se superponen imágenes de múltiples fuentes. Como esos artefactos no corresponden a una realidad física y como dependen de las condiciones de toma de vistas, los resultados y los tratamientos ulteriores obtenidos por un conjunto de datos se aplican con gran dificultad o, entonces, no se aplican a otro conjunto de datos, limitando así ciertas generalizaciones y aplicaciones futuras.

La etapa siguiente de la convalecencia que conduce a la cura, es la utilización de pequeños trucos resultado de las características del método riguroso:

- los puntos de apoyo deben ser seleccionados a la altura más elevada y más baja de su sitio de estudio;
- la selección de los puntos de apoyo es específica para cada tipo de imagen. Por consiguiente, es necesario seleccionar puntos de apoyo en función de las características de cada sensor: por ejemplo, para una imagen radar de ERS-1, es mejor seleccionar lagos y ríos y, para una imagen de SPOT, las carreteras;
- la distribución regular de los puntos de apoyo en la imagen es inútil, pues es una corrección global, y no local, de la imagen;
- si no está disponible un MDA, diferentes planos de altura media pueden ser seleccionados para diferentes partes de las imágenes, y, de esa manera, reducir al mínimo esa distorsión en función de la aplicación y de la precisión deseadas;
- se puede utilizar puntos comunes a dos o más imágenes como puntos de enlace. Esa compensación simultánea aumenta la solidez geométrica entre las imágenes para obtener una mejor precisión relativa y, por lo tanto, una mejor integración radiométrica de las imágenes entre ellas.

Con la comprensión y la aplicación del método riguroso, el mal de la corrección geométrica está en buenas vías de cura. En efecto, en toda enfermedad se debe ver el elemento positivo: es decir, salir del punto muerto. Ello demanda un cambio de actitud y de mentalidad para hacer frente al mal, a fin de integrar los nuevos conceptos. Si no, incluso en casos urgentes, no se puede hacer nada por el paciente. Mientras los demás habrán salido ya del salón de operaciones y estarán en vías de curación total, ¿dónde se encontrará Ud.?

REFERENCIAS

Colwell, R.N., 1983, *Manual of Remote Sensing*, 2nd Edition, Vol. 1., Falls Church, Virginia, USA, Sheridan Press.

Toutin, Th. y Y. Carbonneau, 1992. *La création d'ortho-images avec MDA: description d'un nouveau système*, Journal canadien de télédétection, Vol. 18, No. 3, pp. 136-141.

Toutin, Th., 1995, *Intégration de données multi-sources: comparaison de méthodes géométriques et radiométriques*, International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, No. 5, pp. 2795-2811.

AGRADECIMIENTOS

El autor expresa su agradecimiento a la Sra. Chantal Seuthé del Ministerio de Recursos Naturales de Quebec por los cuidados intensivos que ha prodigado al enfermo a todo lo largo de la consulta, y de haber accedido a la utilización del texto que apareció en parte en el boletín Numérimage publicado por el Servicio de Tecnologías con Referencia Espacial.