

CORRECCIÓN GEOMÉTRICA PARA LA COMPARACIÓN DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE DISTINTA RESOLUCIÓN¹

V. Arévalo Espejo, J. González Jiménez y G. Ambrosio Cestero

Departamento de Ingeniería de Sistemas y Automática, E.T.S.I de Ingenieros en Informática, Universidad de Málaga, Boulevard Louis Pasteur, S/N, 29071 Málaga.

RESUMEN

En este artículo se presenta un procedimiento de corrección geométrica para la comparación de imágenes de satélite de distinta resolución basado en la búsqueda y emparejamiento automático de puntos control y en el empleo de métodos robustos de regresión para el cálculo de las transformaciones geométricas.

El procedimiento al que hacemos referencia comprende varias fases: una fase inicial en la que se iguala la resolución espacial de las imágenes que intervienen en el análisis; una fase en la que se alinean para incrementar su grado de solapamiento y una fase final en la que se ajustan con gran precisión. Para completar cada una de las etapas se hace uso de transformaciones proyectivas (homografías) que se calculan a partir de pares de puntos de control obtenidos de forma automática. El alineamiento de las imágenes se realiza a partir de contornos de ambas imágenes que son emparejados mediante descriptores invariantes a rotaciones. Por otro lado, el ajuste preciso se lleva a cabo mediante la búsqueda de puntos de interés en ambas imágenes y su emparejamiento mediante correlación cruzada. Para asegurar la robustez del procedimiento, el cálculo de las homografías se efectúa mediante técnicas de regresión estadística que garantizan la no inclusión de pares espurios en el procesamiento. También se presenta una técnica de interpolación de niveles de gris basada en un procesamiento piramidal de la imagen a muestrear.

El método propuesto ha sido probado satisfactoriamente con imágenes de los satélites IRS-1C y QuickBird, con unas resoluciones espaciales de 5 y 0.6 metros/píxel, respectivamente.

Palabras Clave: Corrección geométrica, comparación de imágenes, detección de cambios, imágenes de satélite.

1. INTRODUCCIÓN

La detección de cambios en la superficie terrestre para seguir la evolución de áreas forestales, superficies quemadas, crecimiento urbano, etc. requiere un ajuste geométrico muy preciso de las imágenes que intervienen en el estudio para evitar que los desajustes entre ellas sean considerados en el proceso de comparación como cambios reales en la cubierta terrestre (falsos positivos). Por otro lado, cada vez hay más satélites capaces de proporcionar imágenes de alta resolución susceptibles de ser utilizadas en procesos de detección de cambios. Es decir, es bastante probable que dispongamos de imágenes pertenecientes a distintos satélites y con resoluciones espaciales muy diferentes. Surge, por tanto, la necesidad de igualar sus resoluciones espaciales como paso previo del procedimiento de corrección geométrica de las imágenes que intervienen en el proceso de detección.

El funcionamiento general de los procedimientos de corrección suele consistir en: a) la búsqueda de puntos de control en las imágenes que intervienen en el análisis; b) el emparejamiento de los puntos detectados; c) la construcción del modelo geométrico a partir de los pares localizados y d) el ajuste geométrico de las imágenes a corregir con el modelo construido utilizando para ello algún tipo de función de interpolación (*Brown*, 1992).

Hoy en día, siguen siendo muchas las aplicaciones de teledetección que realizan la búsqueda de puntos de control de forma totalmente manual, siendo el usuario quien se encarga de la selección y emparejamiento de los puntos. Lógicamente, este procedimiento está supeditado a errores de precisión que son mayores cuando se utilizan imágenes de distinta resolución. Surge,

¹ Este trabajo ha sido financiado por el proyecto CICYT DPI-2002-01319.

por tanto, la conveniencia de localizar los puntos de control de forma automática. En el campo de la visión por computador, este tipo de técnicas se aplican habitualmente en un gran número de problemas como la visión estéreo, el seguimiento de objetos, etc., donde se detectan esquinas (Hsiev *et al.*, 1992), regiones (Flusser y Suk, 1994), líneas (Moss y Hancock, 1997), contornos (Eugenio y Marqués, 2003), etc.

Cuando las imágenes presentan distinta resolución, el problema de la búsqueda automática de puntos de interés se plantea como una búsqueda en un espacio de escalas² (Chiou-Ting y Rob, 2000; Dufournaud *et al.*, 2001; Brown y Lowe, 2003) ya que un cambio de resolución es análogo a un cambio de escala en la imagen. En teledetección, sin embargo, esto puede simplificarse, puesto que es habitual disponer de información relativa a la resolución espacial de las imágenes.

Por otro lado, el emparejamiento de los puntos detectados se puede realizar atendiendo a los niveles de gris de los píxeles de su entorno, su distribución espacial o una descripción simbólica de las características locales (Brown, 1992). Según el caso, se emplea correlación cruzada (Fonseca y Manjunath, 1996) y/o técnicas basadas en descriptores invariantes, como por ejemplo el algoritmo SIFT (Brown y Lowe, 2003) o descriptores de contornos (Li y Kittler, 1995). Dada la complejidad y limitación de estos últimos métodos, sólo se justifica su utilización cuando las escalas de las imágenes son variables (distintos ángulos de observación –“foreshortening”– y/o desconocidas). En otro caso, como el que aquí nos ocupa, resulta mucho más conveniente el empleo de correlación cruzada, si bien se requiere que la resolución y orientación de las imágenes sean exactamente las mismas. En este artículo se presenta un procedimiento en etapas que, antes de aplicar un procedimiento de búsqueda automática de puntos de interés y emparejamiento mediante correlación cruzada, realiza un ajuste de las imágenes en este sentido, es decir, iguala la resolución y alinea las imágenes, antes de iniciar dicho proceso.

Por último, para estimar la transformación geométrica entre ambas imágenes a partir de los pares de puntos de control establecidos se utiliza el estimador RANSAC (RANDOM Sample Consensus) que asegura un cálculo robusto de la transformación y la detección de pares espurios. El procedimiento ha sido probado satisfactoriamente con imágenes de los satélites IRS-1C y QuickBird, con unas resoluciones espaciales de 5 y 0.6 metros/píxel, respectivamente, en un sistema de detección de cambios urbanos como el expuesto en (Ambrosio *et al.*, 2003).

Este artículo está organizado del siguiente modo: a continuación, se describe de forma general el método propuesto, en la sección 3 se detallan de forma pormenorizada cada una de las etapas del procedimiento de corrección geométrica propuesto, en la sección 4 se muestran los resultados obtenidos, finalmente, se presentan algunas conclusiones.

2. DESCRIPCIÓN GENERAL DEL MÉTODO PROPUESTO

Cuando se comparan imágenes que proceden de distintos satélites (multimodales), tanto la resolución espacial como la orientación son distintas, lo que dificulta la búsqueda automática de pares de puntos de control. En tal caso se requiere una serie de etapas previas que adecuen las imágenes. Estas etapas se detallan en el procedimiento general propuesto a continuación (ver figura 1):

1. La resolución espacial de las imágenes se iguala tomando como referencia una de ellas³. Se aplica una transformación de similaridad.
2. La imagen escalada se alinea con respecto a la imagen de referencia mediante una transformación euclídea. Para completar esta etapa: a) se buscan automáticamente pares

² El espacio de escalas de una imagen consiste en una representación de la misma mediante un conjunto de imágenes de escalas conocidas y establecidas a priori.

³ El método propuesto asume, sin pérdida de generalidad, que la resolución espacial de la imagen de referencia es menor o igual que las resoluciones de las imágenes a corregir.

de puntos de control empleando para ello técnicas basadas en contornos y momentos invariantes a rotaciones, b) los pares de puntos de control localizados se emplean para aplicar una transformación euclídea que gira y desplaza la imagen a corregir con respecto a la de referencia.

3. Se aplica una transformación proyectiva para ajustar de forma precisa ambas imágenes. Para completar esta etapa: a) se buscan automáticamente pares de puntos de control empleando técnicas basadas en puntos de interés y correlación cruzada, b) los pares de puntos de control localizados se utilizan para calcular una transformación proyectiva que nos permite ajustar geoméricamente la imagen a corregir con respecto a la de referencia.

En las etapas 2 y 3 se requiere el cálculo de transformaciones geométricas a partir de pares de puntos de control, en ambas etapas se hacen uso de métodos robustos de regresión para el computo de la transformación geométrica y la detección de correspondencias espurias.

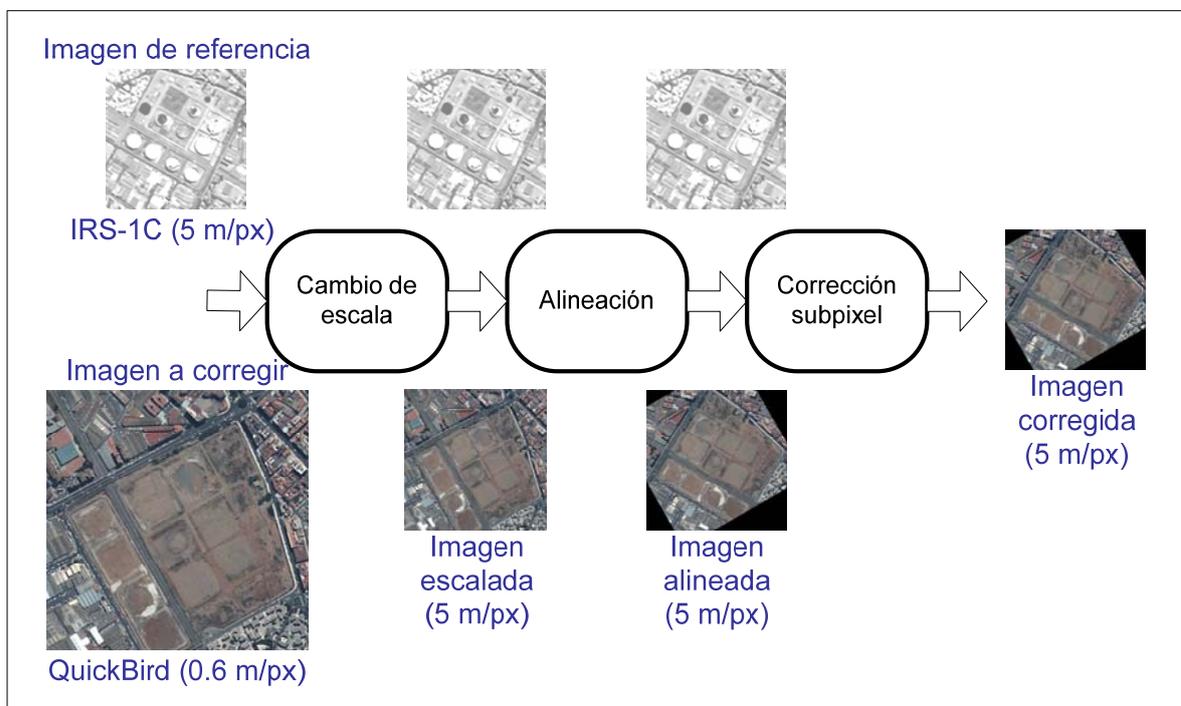


Figura 1: Esquema general del procedimiento de corrección geométrica previo a la detección de cambios.

A continuación se describen pormenorizadamente cada una de las etapas del procedimiento de corrección.

3. DESCRIPCIÓN DE LAS ETAPAS DEL PROCESO

En las siguientes secciones se detallan las distintas etapas de que consta el proceso de corrección geométrica. Siguiendo el enfoque habitual en visión por computador, las distintas transformaciones geométricas se expresarán en coordenadas homogéneas en lugar de coordenadas tradicionales, lo que aportará: a) un tratamiento homogéneo de todas las transformaciones (traslación, escalado, proyección, etc.) y b) un modo simple de agrupar un conjunto de transformaciones en una única matriz.

3.1. Cambio de resolución de las imágenes

Un cambio de resolución espacial es análogo a un cambio de escala en la imagen. Suponiendo conocidas las resoluciones, el cambio de resolución se puede expresar como una transformación de similitud \mathbf{H}_s con un factor de escala conocido e igual a la relación que existe entre la resolución de la imagen de referencia r' y la resolución de la imagen a corregir r . La transformación geométrica \mathbf{H}_s viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_s \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} r'/r & 0 & 0 \\ 0 & r'/r & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad 1)$$

donde \mathbf{x} y \mathbf{x}' son las coordenadas homogéneas⁴ de la imagen a corregir y de la imagen de referencia, respectivamente. En el caso de los satélites IRS-1C y QuickBird, las imágenes presentan una resolución espacial es de 5 y 0.6 m/píxel, respectivamente, es decir, un factor de escalado de 0.12.

3.2. Alineación geométrica de las imágenes

El objetivo de esta etapa es alinear, es decir, orientar y desplazar la imagen a corregir con respecto a la de referencia, para poder utilizar en la fase de ajuste preciso, una técnica de emparejamiento de puntos de interés basada en correlación cruzada. La técnica empleada para alinear geoméricamente las imágenes se basa en la detección de contornos mediante el detector de Canny (*Canny*, 1986), la descripción de los contornos mediante los momentos invariantes de Hu (*Hu*, 1962) y su posterior emparejamiento mediante un técnica que mide el grado de similitud de dos contornos (*Li y Kittler*, 1995). Antes de proceder a la extracción de contornos, la imagen a corregir es modificada radiométricamente mediante la especificación de su histograma (*González*, 1999). La figura 2 ilustra gráficamente el proceso de alineación.

⁴ Nótese que aquí, el uso de coordenadas homogéneas no aporta nada a la formulación. No obstante, se emplean por uniformidad con los desarrollos matemáticos posteriores.

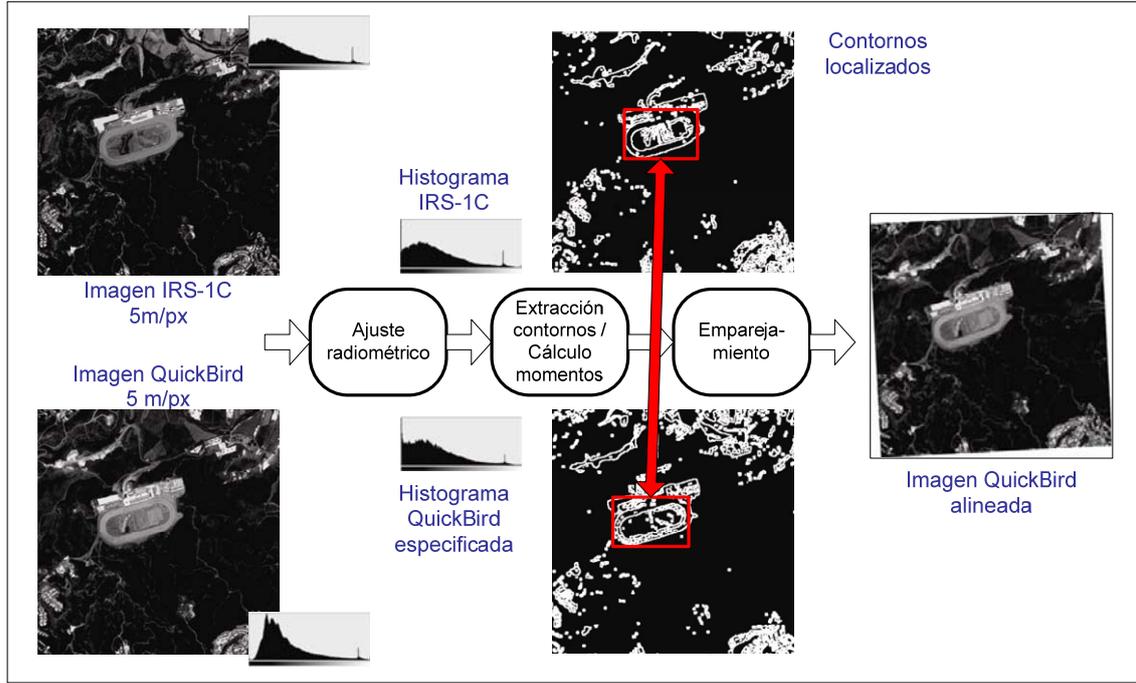


Figura 2: Esquema de la etapa de alineación.

Una vez detectados los contornos en las imágenes que intervienen en el análisis, se procede a su emparejamiento. De tal forma que dos contornos están emparejados si la distancia d entre sus descriptores es inferior a un determinado umbral t . La distancia d entre dos contornos C_1 y C_2 viene dada por la siguiente expresión:

$$d(C_1, C_2) = \sum_{i=1}^4 |h_i^{C_1} - h_i^{C_2}| \quad (2)$$

donde $h_i^{C_1}$ y $h_i^{C_2}$ son los momentos de Hu i -ésimos normalizados de los contornos C_1 y C_2 (Intel®, 2001), respectivamente. Los resultados obtenidos han demostrado que con 4 momentos invariantes de Hu se obtiene suficiente poder discriminatorio.

A continuación, se determina la transformación euclídea \mathbf{H}_E que modela el cambio de orientación y el desplazamiento de la imagen a corregir. La transformación \mathbf{H}_E tiene 3 grados de libertad: el ángulo de giro θ y las dos componentes del vector de traslación $(t_u \ t_v)^T$ y se puede calcular a partir de 2 pares de puntos como mínimo. Los pares de puntos de control utilizados en el proceso de estimación son los centroides de los contornos emparejados anteriormente. La transformación geométrica \mathbf{H}_E viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_E \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & t_u \\ \sin \theta & \cos \theta & t_v \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

donde \mathbf{x} y \mathbf{x}' son las coordenadas homogéneas de la imagen a corregir y de la imagen de referencia, respectivamente.

Finalmente, se estima de forma robusta la transformación euclídea \mathbf{H}_E y se interpola la imagen a corregir. Ambos procesos se exponen con detalle en las secciones 3.4 y 3.5, respectivamente.

3.3. Ajuste preciso de las imágenes

La técnica empleada para ajustar de forma precisa las imágenes se basa en la detección automática de puntos de interés con precisión subpixel mediante el detector de Harris (*Harris y Stephens, 1988*) y su posterior emparejamiento mediante correlación cruzada normalizada (*González, 1999*). El procedimiento consiste en asignar a cada uno de los puntos de interés un determinado vecindario de niveles de gris, vecindario que se utiliza para medir el grado de similitud de los pares de puntos candidatos (ver figura 3).

Una vez detectados los puntos de interés en las imágenes que intervienen en el análisis, se procede a su emparejamiento. De tal forma que dos puntos están emparejados si el coeficiente de correlación cruzada c de sus vecindarios es superior a un determinado umbral t . El coeficiente de correlación cruzada normalizada c entre los vecindarios v_1 y v_2 de dos puntos viene dado por la siguiente expresión:

$$c(x, y) = \frac{\sum_{x', y'} [v_1(x', y') - \bar{v}_1][v_2(x + x', y + y') - \bar{v}_2]}{\sqrt{\sum_{x', y'} [v_1(x', y') - \bar{v}_1]^2 \sum_{x', y'} [v_2(x + x', y + y') - \bar{v}_2]^2}} \quad (4)$$

donde \bar{v}_1 y \bar{v}_2 son las medias de los niveles de gris de ambos vecindarios, respectivamente.

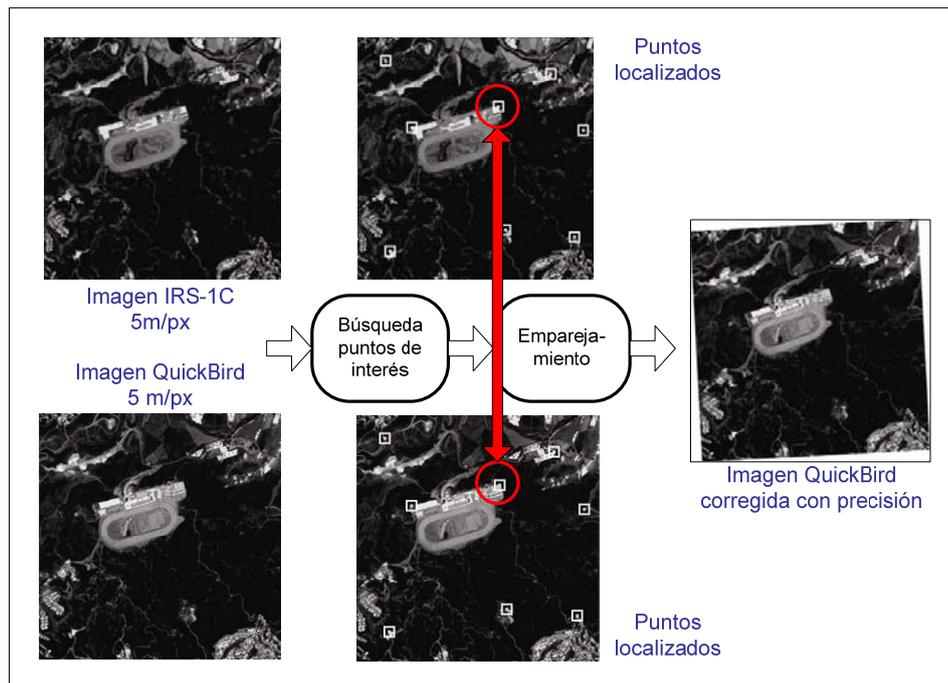


Figura 3: Esquema de la etapa de ajuste preciso.

A continuación, se determina la transformación proyectiva \mathbf{H}_p que modela las distintas deformaciones proyectivas que presenta la imagen a corregir. La transformación \mathbf{H}_p tiene 8 grados de libertad y se puede calcular a partir de 4 pares de puntos como mínimo. La transformación geométrica \mathbf{H}_p viene dada por la siguiente expresión:

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_p \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix} \quad (5)$$

donde \mathbf{x} y \mathbf{x}' son las coordenadas homogéneas de la imagen a corregir y de la imagen de referencia y h_{ij} el parámetro ij -ésimo de la transformación proyectiva, respectivamente.

Finalmente, se estima de forma robusta la transformación proyectiva \mathbf{H}_p y se interpola la imagen a corregir. Ambos procesos se exponen con detalle en las secciones 3.4 y 3.5, respectivamente.

3.4. Cálculo robusto de la transformación geométrica

En las secciones anteriores se propusieron las transformaciones que modelaban las distintas deformaciones que presentan las imágenes que intervienen en el análisis. El proceso operativo para ambas es el mismo, con la única particularidad del número mínimo de emparejamientos que se requieren para su cálculo; 2 puntos para la transformación euclídea y 4 para la proyectiva. Las homografías se pueden calcular fácilmente con el algoritmo DLT (Direct Linear Transformation) normalizado (Hartley y Zisserman, 2001). Sin embargo, en la práctica, los emparejamientos obtenidos, independientemente del método empleado, suelen incluir emparejamientos espurios. Para evitar que estos emparejamientos afecten al cálculo de los parámetros geométricos se utilizan procedimientos robustos de regresión. Los métodos robustos de regresión tratan de explotar la redundancia de emparejamientos para obtener una solución consistente con la mayoría de ellos (por ejemplo: el error de proyección en ambas imágenes debe estar por debajo de un determinado umbral t , normalmente 1 píxel). El método de regresión utilizado en este trabajo es el RANSAC-DLT normalizado (Hartley y Zisserman, 2001). En figura 4 se puede observar el pseudo código del método utilizado.

Objetivo

Dado $n \geq 2$ (Transf. euclídea \mathbf{H}_E) o $n \geq 4$ (Transf. proyectiva \mathbf{H}_p) pares de puntos de control $\{\mathbf{x}_i \leftrightarrow \mathbf{x}'_i\}$, determinar la homografía \mathbf{H} tal que $\mathbf{x}'_i = \mathbf{H}\mathbf{x}_i$.

Algoritmo

- Repetir N veces, donde N se determina adaptativamente:
 - * Seleccionar una muestra de 2 (Transf. euclídea \mathbf{H}_E) ó 4 (Transf. proyectiva \mathbf{H}_p) emparejamientos y calcular \mathbf{H} con el algoritmo DLT normalizado.
 - * Calcular el error de proyección en ambas imágenes para cada correspondencia.
 - * Determinar el número de correspondencias consistentes con \mathbf{H} .
 - * Recalcular N adaptativamente.
- Elegir la homografía \mathbf{H} con el mayor número de emparejamientos consistentes con \mathbf{H} .
- Recalcular \mathbf{H} con los emparejamientos consistentes con \mathbf{H} .

Figura 4: Método RANSAC-DLT normalizado para el cálculo de homografías.

Una vez se han determinado los parámetros de las transformaciones geométricas \mathbf{H}_E y \mathbf{H}_p por el método expuesto anteriormente, la siguiente etapa del procedimiento de corrección consiste en aplicar dichas transformaciones para interpolar las imágenes a corregir.

3.5. Interpolación de las imágenes

En el proceso de interpolación se pueden utilizar distintas funciones dependiendo del tipo de aplicación (Brown, 1992). En nuestra aplicación de detección de cambios hemos optado por una función bicúbica. El proceso operativo consiste, básicamente, en determinar qué píxeles de la imagen a corregir se han de considerar en el cálculo del nuevo píxel en la imagen corregida (ventana de trasvase) y a continuación aplicarles la función de interpolación elegida, para calcular el nivel de gris correspondiente en la nueva imagen.

Este proceso es perfectamente válido para las transformaciones geométricas definidas por \mathbf{H}_E y \mathbf{H}_P , sin embargo, para aplicar la transformación \mathbf{H}_S encargada de modelar un cambio de escala considerable (en nuestro caso un factor de escala de 0.12 –ver apdo. 3.1–), la elección de la técnica de interpolación no es trivial. En efecto, si el proceso de interpolación no considera los niveles de gris de todos los píxeles de la ventana de trasvase (ver figura 5 arriba) se produce el denominado efecto *stair-stepped* o efecto escalón (ver figura 5 abajo). Es decir, el nivel de gris que se obtiene de interpolar los píxeles de la ventana de interpolación⁵ no es representativo de toda la ventana de trasvase, sino tan sólo, de un fragmento de ella.

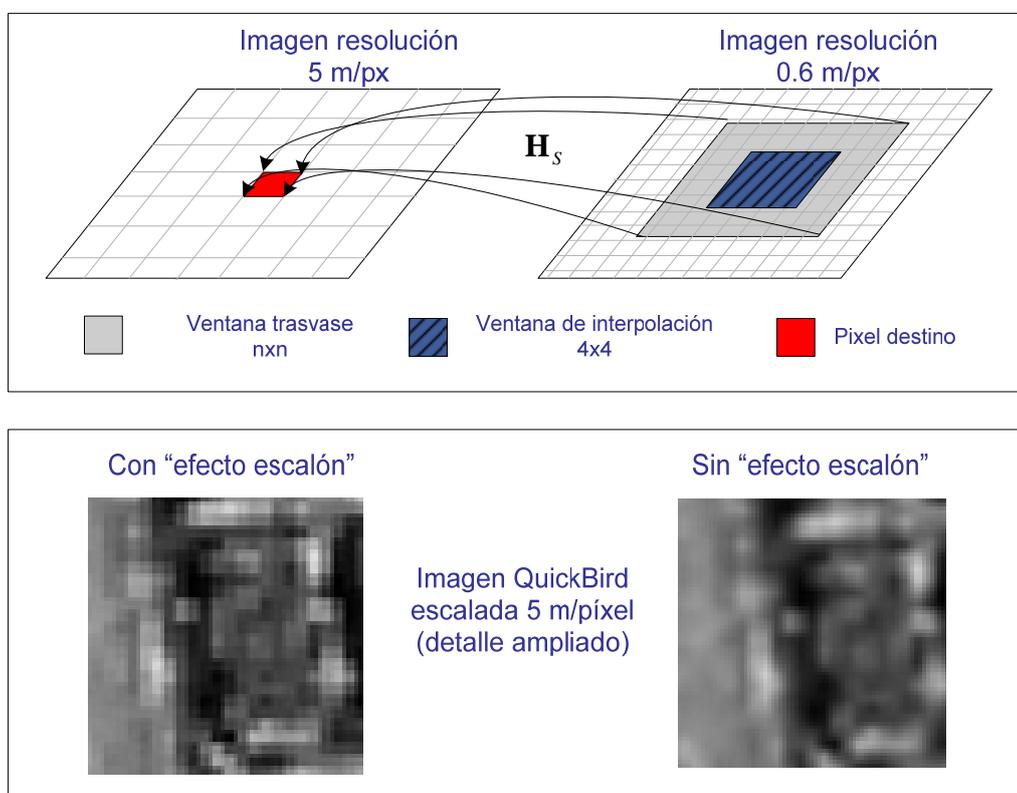


Figura 5: Efecto escalón debido a diferencias entre las ventanas de interpolación y de trasvase.

Para evitar esto, la transformación geométrica \mathbf{H}_S se puede expresar como un producto de n transformaciones geométricas \mathbf{H}_{S_i} que verifican que el tamaño de su ventana de trasvase es menor que el tamaño de la ventana de interpolación (ver figura 6), es decir, controlamos el tamaño de la ventana de trasvase ya que el tamaño de la ventana de interpolación es conocido y viene definida por la función de interpolación utilizada (4×4 si la función de interpolación es bicúbica). Las n transformaciones geométricas \mathbf{H}_{S_i} vienen dadas por la siguiente expresión:

⁵ La dimensión de la ventana de interpolación es de 4×4 píxeles si la función es bicúbica.

$$\mathbf{x}' = \mathbf{H}_s \mathbf{x} = \left(\prod_{i=1}^n \mathbf{H}_{S_i} \right) \mathbf{x} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} u' \\ v' \\ 1 \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt[n]{r'/r} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt[n]{r'/r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_{S_1}} \cdots \underbrace{\begin{bmatrix} \sqrt[n]{r'/r} & 0 & 0 \\ 0 & \sqrt[n]{r'/r} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\mathbf{H}_{S_n}} \begin{pmatrix} u \\ v \\ 1 \end{pmatrix}$$

$$n = \max \left\{ \text{int} \left(\frac{w}{4} \right) + 1, \text{int} \left(\frac{h}{4} \right) + 1 \right\}$$

donde n es el número de niveles de la estructura piramidal y w, h el ancho y alto de la ventana de trasvase original, respectivamente.

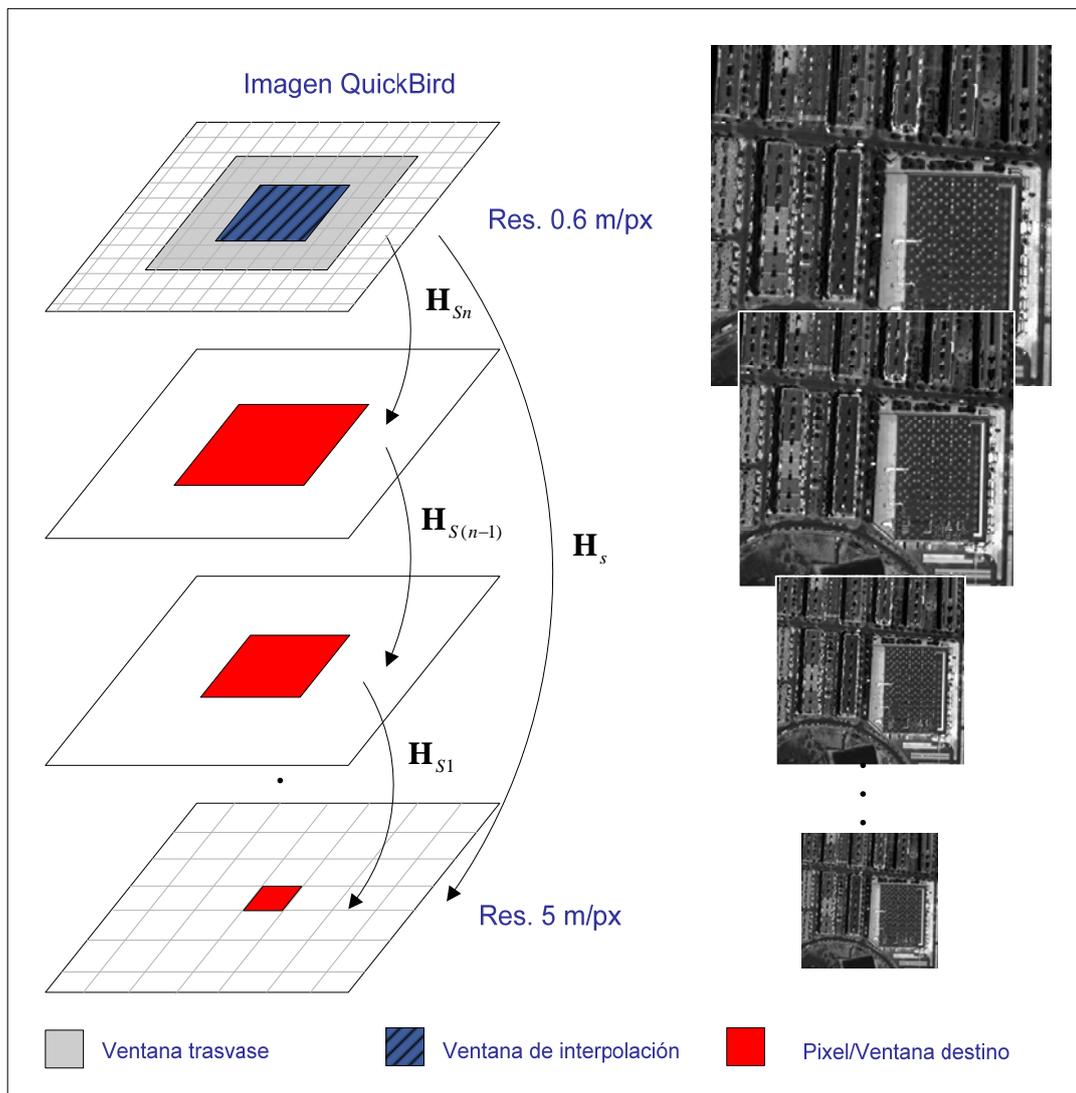


Figura 6: Aplicación de la transformación geométrica \mathbf{H}_s mediante una técnica piramidal.

Geoméricamente, la descomposición de la transformación geométrica \mathbf{H}_s en n transformaciones \mathbf{H}_{S_i} se interpreta como un escalado piramidal de la imagen a corregir en n etapas.

4. RESULTADOS

A continuación, se presenta uno de los experimentos realizados con el procedimiento expuesto. En el experimento se han utilizado imágenes pertenecientes a los satélites IRS-1C y QuickBird con una resolución espacial de 5 m/píxel y 0.6 m/píxel, respectivamente. En la figura 7 podemos observar las imágenes utilizadas.

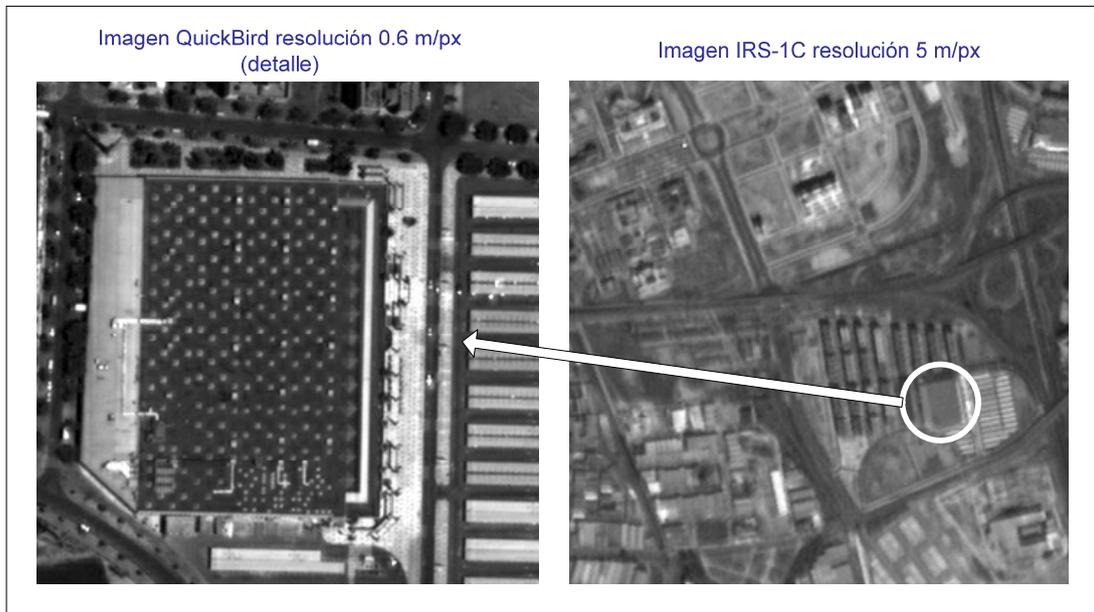


Figura 7: Detalle de la imagen a corregir e imagen de referencia utilizadas en el experimento.

En la figura 8 se puede observar la imagen a corregir conveniente escalada y alineada, obtenida como resultado de aplicar las transformaciones geométricas calculadas en la primera y segunda fase del procedimiento.

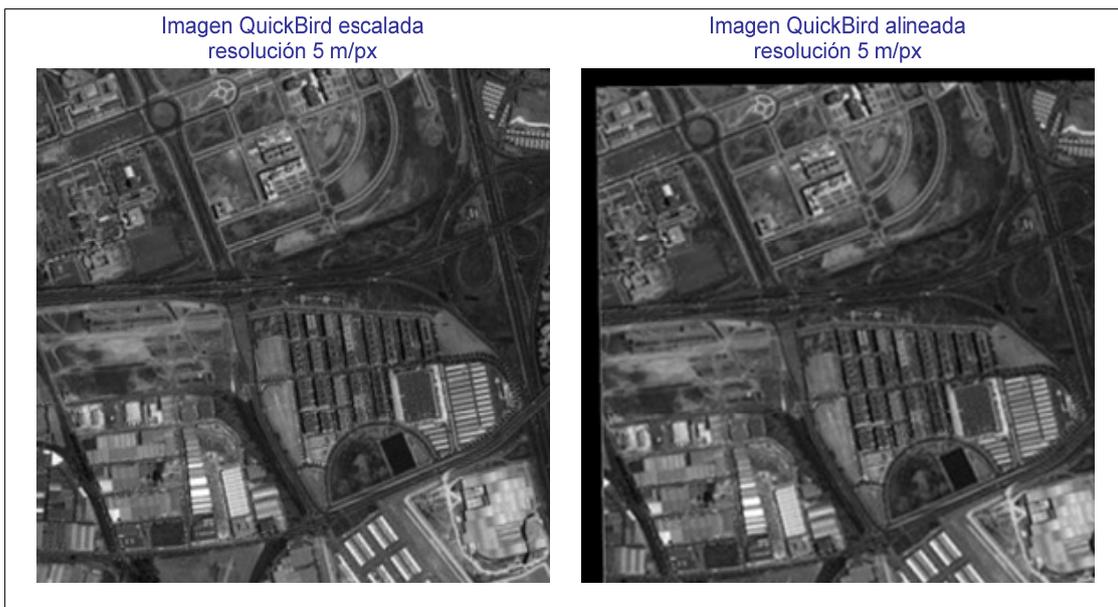


Figura 8: Imagen a corregir escalada y alineada.

La figura 9 muestra la imagen de referencia, la imagen corregida, la imagen de cambios obtenida en la detección de cambios y la imagen de cambios colocada sobre la imagen original a corregir (resolución espacial de 0.6 m/píxel), obtenida de aplicar secuencialmente las transformaciones geométricas calculadas en el procedimiento de corrección de forma invertida.

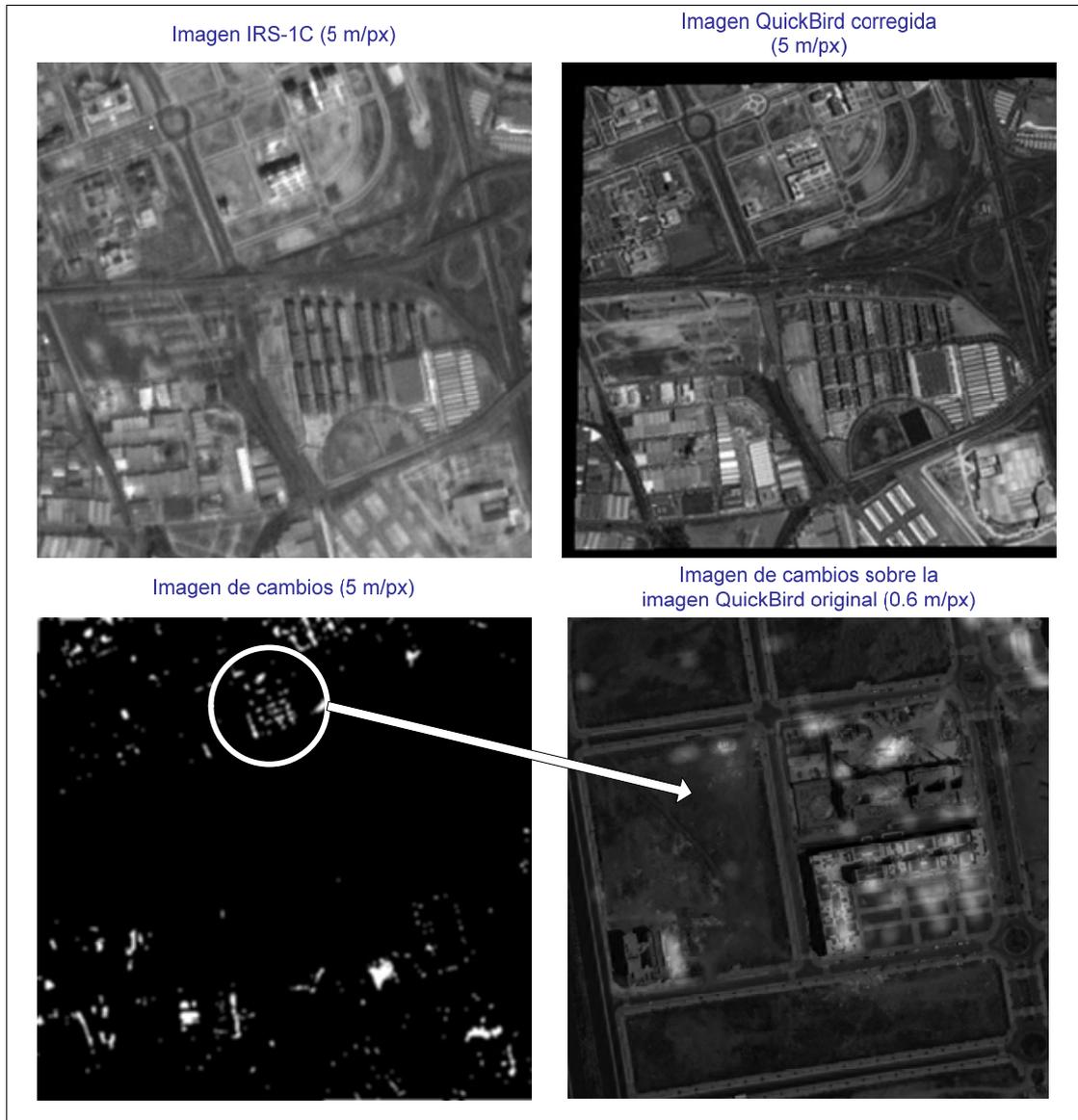


Figura 9: Imagen de referencia y corregida (arriba); imagen de cambios (abajo izquierda), imagen original a corregir con la imagen de cambios sobrepuesta (abajo derecha).

CONCLUSIONES

Según lo expuesto a lo largo de este artículo, el procedimiento descrito permite corregir de un modo automatizado dos imágenes de distinta resolución espacial para su posterior comparación en cualquier aplicación de detección de cambios. El empleo del algoritmo RANSAC-DLT normalizado en el cálculo de las distintas homografías asegura la robustez del proceso y la detección de pares espurios. Por último, la técnica de interpolación piramidal propuesta, permite interpolar imágenes de gran resolución para su comparación con imágenes de una resolución menor o para su integración en algún sistema de información geográfica.

$$d(C_1, C_2) =$$

REFERENCIAS:

- Ambrosio, G., González, J. y Arévalo V. (2003). "Detección de Cambios Urbanos mediante Comparación de Imágenes Multi-temporales". *X Congreso Nacional de Métodos Cuantitativos, SIG y Teledetección*.
- Brown, L.G. (1992). "A Survey of Image Registration Techniques". *ACM Computing Surveys*. Vol. 24 No. 4.
- Brown, M. y Lowe, D. (2003). "Recognising Panoramas". *Proceedings of International Conference on Computer Vision (ICCV'03), Nice, France, (October 2003)*. Vol. 1.
- Canny, J.F. (1986). "A Computational Approach to Edge Detection". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 8, No. 6, Nov.
- Chiou-Ting, H. y Rob A., B. (2000). "Multiresolution Feature-Based Image Registration". *Proceedings of SPIE, Perth, Australia*, pp.1490-1498.
- Dufournaud, Y., Schmid, C. y Horaud, R. (2001). "Image Matching with Scale Adjustment". *Technical Report No. 4458 (INRIA, Sophia-Antipolis)*
- Eugenio, F. y Marqués, F. (2003). "Automatic Satellite Image Georeferencing Using a Contour-Matching Approach". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, No. 12, pp. 2869-2880.
- Flusser, J. y Suk, T. (1994). "A Moment-Based Approach to Registration of Images with Affine Geometric Distortion". *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, No. 32, pp. 382-387.
- Fonseca, L.M.G. y Manjunath, B.S. (1996). "Registration Techniques for Multisensor Remotely Sensed Imagery". *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, No. 62, pp. 1049-1056.
- González, J. (1999). "Visión por Computador". *Paraninfo*.
- Harris, C. y Stephens, M. (1988). "A Combined Corner and Edge Detector". In *Proceedings Alvey Conference*, pp. 189-192.
- Hartley, R. y Zisserman, A. (2001). "Multiple View Geometry in Computer Vision". *Cambridge University Press*.
- Hsieh, Y.C., McKeown, D.M. y Perlant, F.P. (1992) "Performance Evaluation of Scene Registration and Stereo Matching for Cartographic Feature Extraction". *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, No. 14, pp. 214-237
- Hu, M. (1962). "Visual Pattern Recognition by Moments Invariants". *IRE Transactions on Information Theory*, Vol. 8 No. 2, pp. 179-187.
- Intel® Corporation (2001). "The Open Source Computer Vision Library. Reference Manual". <http://developer.intel.com>.
- Li, S.Z. y Kittler, J. (1995). "A Contour-Based Approach to Multisensor Image Registration". *IEEE Transactions on Image Processing*, No. 18, pp. 320-334.
- Moss, S. y Hancock, E.R. (1997). "Multiple Line-Template Matching with EM Algorithm". *Pattern Recognition Letters*, No. 18, pp. 1283-1292.