

**MÁSTER OFICIAL INTERUNIVERSITARIO**

**REPRESENTACIÓN Y DISEÑO EN  
INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**TRABAJO FIN DE MÁSTER**

**GENERACIÓN DE DATOS  
GEORREFERENCIADOS DE MUY ALTA  
RESOLUCIÓN A PARTIR DE IMÁGENES DE  
GeoEye-1**

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



**María del Mar Saldaña Díaz**  
**Curso 2010-2011**

**Director/es:**

**Manuel Ángel Aguilar Torres**  
**Fernando Aguilar Torres**

1. INTRODUCCIÓN .....	5
2. MATERIALES Y METODOS.....	8
2.1. DATOS DE SATÉLITE.....	8
2.2. JUSTIFICACIÓN.....	9
2.3. ZONA DE ESTUDIO .....	10
2.4. IMAGEN DE GEOEYE-1 .....	11
2.5. PUNTOS DE CONTROL Y DE COMPROBACIÓN .....	12
2.6. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO.....	14
2.6.1. DEMs a partir de vuelos fotogramétricos.....	14
2.6.2. DEMs a partir de datos <i>LiDAR</i> .....	15
2.7. MODELOS DE SENSOR.....	16
2.7.1. Funciones racionales 3D independientes del terreno con metadatos. ....	17
2.7.2. Modelos físicos 3D.....	18
3. METODOLOGÍA.....	18
3.1. ESTUDIO DE LA CALIDAD GEOMÉTRICA.....	18
3.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN PANCRÓMATICA .....	18
3.2.1. Fase de Orientación del Sensor .....	19
3.2.2. Fase de ortorectificación .....	20
3.3. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN MULTIESPECTRAL.....	21
3.3.1. Fase de orientación.....	21
3.3.2. Fase de ortorectificación .....	22
4. RESULTADOS Y DISCUSION.....	22
4.1. PRECISION EN IMAGEN PAN SIN USO DE GCPs.....	22
4.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN PANCRÓMATICA.....	23
4.2.1. Fase de orientación del sensor.....	23
4.2.2. Comparación de resultados RPC0 y RPC1 .....	26
4.2.3. Fase de ortorectificación. ....	29
4.3. EVALUACION DE LA PRECISION EN IMAGEN MULTIESPECTRAL .....	30
4.3.1. Fase de orientación del sensor.....	30
4.3.2. Fase de ortorectificación. ....	32
5. CONCLUSIONES.....	33
6. AGRADECIMIENTOS.....	34
7. BIBLIOGRAFÍA .....	35

## **RESUMEN**

En 2008 y con la cooperación del Departamento de Defensa de los Estados Unidos, se lanzó un nuevo satélite comercial de muy alta resolución (*VHR*), llamado GeoEye-1, que actualmente es el satélite comercial con mayor resolución geométrica, tanto en pancromática (*PAN*) (0,41 m) como en multiespectral (*MS*) (1,65 m). El objetivo principal de este trabajo es estudiar el nivel de precisión alcanzable, en condiciones operacionales, en ortoimágenes generadas a partir de imágenes *PAN* y *MS* del nuevo satélite *VHR* GeoEye-1. Para ello se realiza un estudio estadístico, basado en cinco repeticiones, que consta de dos fases, (i) fase de orientación del sensor, donde se estudiará la influencia del modelo de sensor, el número y la distribución de los puntos de control (*GCPs*) y (ii) fase de ortorectificación, donde se estudiará la precisión que se obtiene al crear la ortoimagen con la participación de diferentes modelos digitales de elevaciones (*DEMs*). Para llevar a cabo el estudio se adquirió una imagen de archivo GeoEye-1 (*PAN* + *MS*), capturada el 29 de septiembre de 2010, con un ángulo off-nadir de unos 20°. Tanto para la imagen *PAN* como para la *MS*, el modelo de sensor con el que se llega a mejores resultados en la fase de orientación, es *RPC0*, siendo su comportamiento prácticamente independiente al número y distribución de *GCPs*. En la fase de ortorectificación, la generación de ortoimágenes *PAN*, requiere un *DEM* con mayor precisión que para la generación de ortoimágenes *MS*.

**Palabras clave:** Ortoimagen, Ortorectificación, Clasificación, Precisión, *DEM*.

## **ABSTRAC**

In 2008, in cooperation with the United States Department of Defense, it was launched a new very high resolution (VHR) commercial satellite, called GeoEye-1, which is currently the highest resolution commercial satellite geometry, both panchromatic (PAN) (0.41 m ) and multispectral (MS) (1.65 m). The main aim of this work is to study the level of accuracy achievable under operational conditions in orthoimages generated from PAN and MS of the new VHR satellite GeoEye-1. This is done through a statistical study, based on five repetitions, that consists of two phases: (i) orientation phase of the sensor, which studies the influence of sensor type, the number and the distribution of ground control points (GCPs) and (ii) orthorectification phase, that studies the precision obtained by creating the orthoimage with the participation of different digital elevation models (DEMs). In order to conduct the study, an archive image GeoEye-1 (PAN + MS) was acquired, which was captured on September 29, 2010, with an off-nadir angle of 20°. For both, the PAN image and the MS one, the model sensor that leads to the best results in the orientation phase, it is RCP0, whose behavior is almost independent of the number and distribution of GCPs. In phase orthorectification, the creation of PAN orthoimages requires more DEM precision than the MS orthoimages.

**Keywords:** Orthoimage, Orthorectification, Classification, Accuracy, DEM.

## 1. INTRODUCCIÓN

En 1972 se puso en órbita el primero de la serie de satélites *ERTS (Earth Resource Technollogy Satellite)* destinados, como su propio nombre indica, al estudio de los recursos naturales. A partir del segundo lanzamiento, el programa se denominó *LANDSAT*, con un gran rendimiento en cuanto a explotación de información se refiere. Este hito puede ser considerado el comienzo de la exploración de la superficie terrestre mediante imágenes de satélite, sin embargo, todavía faltaba mucho para llegar a la situación actual.

Unos años más tarde, se ponen en órbita dos satélites, familia *SPOT*, uno en 1986 y otro en 1990, con varias estaciones terrestres de recepción de datos. La principal característica que los distingue de la serie *LANDSAT* es su capacidad de giro lateral, que aumenta la resolución temporal, pudiendo observarse cualquier punto de la superficie terrestre con una periodicidad de entre uno y varios días. Esto hace posible generar incluso pares estereoscópicos de la zona observada, con la consiguiente generación de modelos digitales de elevaciones (*digital elevation models, DEMs*).

La aplicación de la fotogrametría digital a las imágenes de satélite en la década de los 90 supuso una verdadera revolución en la generación de información espacial, tanto topográfica como temática, para su integración en Sistemas de Información Geográfica (*GIS*). Pero hasta entonces, las precisiones que tenían las imágenes que proporcionaba la fotogrametría digital no eran suficientes para realizar cartografías a gran escala (1:5000 a 1:10000). Con la necesidad de alcanzar una mayor precisión en las imágenes obtenidas de satélites surgen los satélites comerciales de muy alta resolución (*very high resolution, VHR*).

Actualmente existen orbitando sobre la tierra y recogiendo imágenes de su superficie nueve satélites *VHR*. Estos satélites se caracterizan por tener una gran resolución tanto geométrica, con un tamaño de píxel en la banda pancromática (*PAN*) de 1m e incluso inferior, como radiométrica (Tabla 1).

*IKONOS*, perteneciente en un principio a la compañía *Space Image* (hoy absorbida por *GeoEye, USA*), fue el primero de este nuevo tipo de satélites comerciales *VHR*. Fue lanzado en 1999 y capta imágenes terrestres tanto *PAN*, con 0.82 m (remuestreadas a 1 m) de tamaño de píxel, como multiespectrales (*MS*), con un tamaño de píxel de 3.28 m (remuestreado a 4 m) y cuatro bandas (*R-rojo, G-verde, B-azul e NIR-infrarrojo cercano*). En 2001 fue lanzado el satélite *QuickBird*, de *DigitalGlobe (USA)*, con una resolución de 0.61 m y 2.44 m en *PAN* y *MS (R, G, B e NIR)* respectivamente, para imágenes con *off-nadir 0°*, lo que le otorgó durante mucho tiempo el honor de ser el satélite comercial que presentaba la mayor resolución espacial.

Desde el lanzamiento de los satélites *IKONOS* y *QuickBird*, muchos investigadores los han considerado como posibles sustitutos de las clásicas imágenes aéreas para la obtención de cartografía a grandes escalas ([Fraser, 2002](#); [Kay et al., 2003](#); [Chmiel et al., 2004](#); [Pecci et al., 2004](#); [Aguilar et al., 2007a](#); [Aguilar et al., 2006](#)). De hecho, *IKONOS* y *QuickBird* ofrecen la posibilidad de generación rápida y precisa de ortoimágenes, capaces de competir con las generadas a partir de vuelos aéreos convencionales, como por ejemplo, la ortofotografía en blanco y negro de la Junta de Andalucía de 2002 ([Aguilar et al., 2008a](#)). Hay que tener en cuenta que la Consejería de Vivienda y Ordenación del Territorio de la Junta de Andalucía y el Centro Nacional

de Información Geográfica (CNIG) están colaborando en la generación de nuevas ortoimágenes de la Comunidad Andaluza en el marco del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). Estas ortofotografías aéreas, que se elaboran de forma sistemática en toda España, y también en Andalucía, desde 1999, son imágenes aéreas corregidas con una precisión que oscila entre 1 metro y los 50 centímetros.

Además, este tipo de imágenes de satélite han sido utilizadas para numerosas aplicaciones como son: (i) la detección de edificios (Fraser *et al.*, 2002; Weber y Ranchin, 2003; Lee *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Mayunga *et al.*, 2007; Gamba *et al.*, 2007), (ii) carreteras (Yan y Zhao, 2003; Jin y Davis, 2005), (iii) vegetación (Nichol y Lee, 2005; Castillejo-González *et al.*, 2009; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009), (iv) detección de invernaderos (Agüera *et al.*, 2006; Agüera *et al.*, 2008), e incluso (v) localización de daños ocasionados por desastres naturales (Al-Khudhairy *et al.*, 2005).

Tabla 1. Satélites de muy alta resolución existentes en la actualidad y lanzamientos previstos en los próximos años.

Satélite	País	Lanzamiento	Resolución PAN (m)	Resolución MS (m)	Tamaño Escena (km)
<b>IKONOS-2</b>	<b>US</b>	<b>09/24/99</b>	<b>1.0</b>	<b>4</b>	<b>11</b>
<b>QuickBird-2</b>	<b>US</b>	<b>10/18/01</b>	<b>0.61</b>	<b>2.44</b>	<b>16</b>
<b>EROS B1</b>	<b>Israel</b>	<b>04/25/06</b>	<b>0.7</b>		<b>7</b>
<b>Resurs DK-1</b>	<b>Russia</b>	<b>06/15/06</b>	<b>1.0</b>	<b>3</b>	<b>28</b>
<b>KOMPSAT-2</b>	<b>Korea</b>	<b>07/28/06</b>	<b>1.0</b>	<b>4</b>	<b>15</b>
<b>IRS Cartosat 2</b>	<b>India</b>	<b>01/10/07</b>	<b>0.8</b>		<b>10</b>
<b>WorldView -1</b>	<b>US</b>	<b>09/18/07</b>	<b>0.5</b>		<b>16</b>
<b>GeoEye-1</b>	<b>US</b>	<b>06/09/08</b>	<b>0.41*</b>	<b>1.65*</b>	<b>15</b>
<b>WorldView -2</b>	<b>US</b>	<b>08/10/09</b>	<b>0.46*</b>	<b>1.84*</b>	<b>16</b>
Pleiades-1	France	Previsto en 2011	0.7	2.8	20
Pleiades-2	France	Previsto en 2011	0.7	2.8	20
KOMSAT-3	Korea	Previsto en 2012	0.7	3.2	?

\*La distribución y uso de imágenes con una resolución mejor de 0.5 m en PAN y de 2.0 m en MS estará sujeta a la aprobación por el Gobierno de los Estados Unidos.

Más recientemente y financiado al 50% por la empresa GeoEye y el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, en el año 2008, fue lanzado el satélite GeoEye-1 (GeoEye, Inc.), que actualmente es el satélite comercial con mayor resolución geométrica, tanto en PAN como en MS. GeoEye-1 ofrece la posibilidad de tomar imágenes con un tamaño de píxel, como máximo, de 0.41m en PAN y 1.65 m en MS, estando compuesta esta última imagen por las clásicas cuatro bandas (R, G, B e NIR) que suelen acompañar a la mayoría de los satélites *VHR*. Los primeros resultados obtenidos con escenas de GeoEye-1 están siendo bastante superiores a los que se habían obtenido hasta ahora usando escenas de otros satélites comerciales de muy alta

resolución como IKONOS o QuickBird. Hasta el momento se han realizado pocos estudios sobre las precisiones que se pueden obtener con los productos de GeoEye-1. En uno de estos trabajos realizado por [Fraser y Ravanbakhsh \(2009\)](#), usando un estéreo par PAN de GeoEye-1, se llegó a una precisión de 0.1 m en planimetría y 0.25 en altimetría, utilizando un solo punto de control (*GCP*) para realizar la orientación del sensor, así como los coeficientes racionales (*rational polynomial coefficients, RPCs*) aportados como metadatos de la imagen de satélite. Los datos auxiliares empleados en este trabajo fueron de extremada precisión. Por ejemplo, la mayoría de puntos medido en el terreno fueron centros de rotondas, que se obtuvieron a partir del centro de la elipse ajustada a partir de al menos 10 puntos medidos en el perímetro de la misma. [Meguro y Fraser \(2010\)](#) trabajando también con un estéreo par fusionado (PAN+MS) de GeoEye-1, aunque con condiciones de trabajo reales, obtuvieron una precisión de 0.4 m en planimetría y 0.8 m en altimetría. Estos investigadores recomendaron el uso de unos 4 *GCPs* para llevar a cabo la orientación del sensor, aplicando funciones racionales y apoyándose en los *RPCs* aportados por el suministrador de la imagen. El control de calidad se realizó en 115 puntos de control independientes (*ICPs*).

En octubre de 2009 hay que remarcar otro hito en la corta historia de los satélites *VHR*, el lanzamiento del satélite WorldView-2 de DigitalGlobe. Este nuevo satélite presenta una gran resolución geométrica en PAN (0.46 m) y MS (1.84 m), aunque ligeramente inferior a la obtenida por GeoEye-1. Su principal novedad es que tiene la capacidad de almacenar 8 bandas en la imagen MS (Fig. 1): Coastal Blue (400-450 nm), Blue (450-510 nm), Green (510-580 nm), Yellow (585-625 nm), Red (630-690 nm), Red-Edge (705-745 nm), NIR1 (770-895 nm) y NIR2 (860-1040 nm). Su alta resolución espacial permite la detección de detalles pequeños, y su alta resolución espectral lo capacita para obtener información detallada sobre la calidad de superficies asfaltadas, profundidad del mar, o incluso sobre el estado de salud de un cultivo. Las imágenes de este nuevo satélite *VHR* se empezaron a comercializar a partir del 4 de enero de 2010, por lo que aún no hay demasiados estudios realizados sobre aplicaciones reales con imágenes de este satélite. Sin embargo, según un estudio piloto realizado por [DigitalGlobe, Inc. \(2009\)](#), se pueden obtener mejoras sustanciales en la precisión de la clasificación usando las 8 bandas de WorldView-1, frente a las imágenes MS tradicionales RGB-NIR de QuickBird, IKONOS o GeoEye-1. Estas mejoras se cuantifican en una mejora global de entre un 10 y un 30% en la clasificación de carreteras, vegetación o elementos acuáticos (arrecifes, barreras de arena).

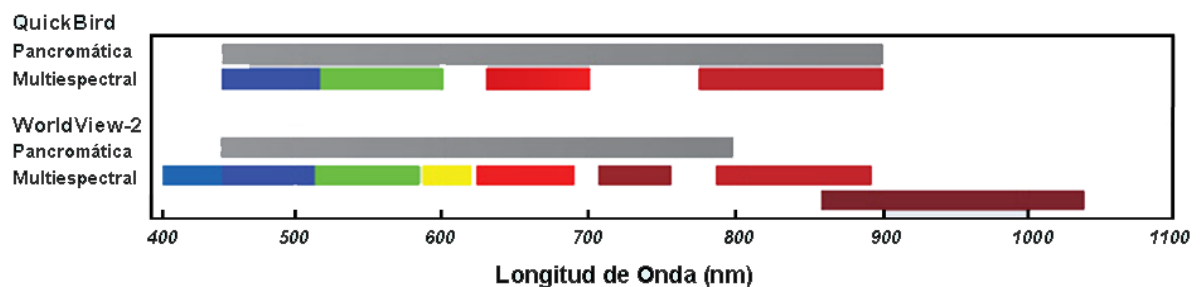


Figura 1. Comparación entre las longitudes de onda de las bandas almacenadas por los satélites QuickBird y WorldView-2, tanto en panorámico como en multispectral.

Los satélites *VHR* también ofrecen la posibilidad de generación de *DEMs* a partir de estéreo pares de imágenes, pudiéndose obtener errores medios cuadráticos de entre 1 a 2 veces el tamaño de píxel de la imagen original. Estos errores dependen, entre otros factores, de lo accidentado de la orografía, del sensor usado, del modelo de sensor utilizado en la triangulación, la calidad de puntos de control (Ridley *et al.*, 1997; Toutin 2004a; Toutin 2006; Aguilar *et al.*, 2007b). Estos errores han sido mucho menores, en torno a 0.5 veces el tamaño de píxel, cuando el *DEM* fue generado a partir de un estéreo-par de GeoEye-1 (Fraser y Ravanbakhsh, 2009).

El objetivo fundamental de este trabajo es estudiar el nivel de precisión alcanzable, en condiciones operacionales, en ortoimágenes generadas a partir de imágenes PAN y MS del nuevo satélite comercial de muy alta resolución GeoEye-1. Para ello se llevará a cabo un exhaustivo estudio estadístico en el que se diferenciarán dos fases. La primera fase, denominada como Orientación del Sensor, será donde se estudien las diferentes variables que influyen en el proceso de orientación o triangulación de la imagen de satélite. Dentro de esta fase se estudiará la influencia de los modelos de sensor usados, del número de puntos de control empleados, así como de la distribución de los mismos. La segunda fase, denominada como Ortorectificación, será donde se estudie la precisión que se obtiene al crear la ortoimagen con la participación de diferentes *DEMs*.

## 2. MATERIALES Y METODOS

### 2.1. DATOS DE SATÉLITE

El satélite GeoEye-1 (Fig. 2) fue lanzado el 6 de Septiembre de 2008 y está equipado con la tecnología más avanzada en sensores remotos de teledetección para uso comercial.



Figura 2. Satélite GeoEye-1.



Es capaz de capturar imágenes de 0.41m de resolución para imágenes PAN y de 1.65 m de resolución para imágenes MS. Sin embargo, por imposición del Gobierno de los Estados Unidos, estas imágenes deben ser remuestreadas a 0.5 m en las imágenes PAN y a 2 m en las imágenes MS. El satélite puede capturar hasta 700000 km<sup>2</sup> en PAN y 350000 km<sup>2</sup> en MS por día, con un tiempo de revisita de tres días. Las imágenes MS de este satélite tienen cuatro bandas: azul, verde, rojo e infrarrojo cercano, cuya longitud de onda se especifica en la Tabla 2.

*Tabla 2. Tabla de características del satélite GeoEye-1.*

<b>CARACTERÍSTICAS</b>	<b>GeoEye-1</b>
Resolución final (PAN)	50 cm
Resolución real en el nadir (PAN)	41 cm
Resolución 60 ° elevación (PAN)	50 cm
Resolución final (MS)	2 m
Resolución real en el nadir (PAN)	1.65 cm
Banda Azul	450-510 nm
Banda Verde	510-580 nm
Banda Roja	655-690 nm
Infrarrojo Cercano	780-920 nm
Ciclo de vida previsto	7 años
Tiempo de revisita	3 días
Altura orbital	681 km

GeoEye-1 capturó su primera imagen el 8 de octubre de 2008. La imagen que realizó fue de la Universidad de Kutztown en Pennsylvania. El 5 de febrero de 2009, GeoEye anunció oficialmente el inicio de operaciones comerciales de GeoEye-1 y comenzó a vender las imágenes a clientes comerciales de todo el mundo, incluidos clientes gubernamentales en Europa, Asia y Oriente Medio.

## **2.2. JUSTIFICACIÓN**

La casa GeoEye proporciona productos del satélite GeoEye-1 con distinto nivel de procesamiento, y por tanto, distinto precio. Dentro de estos productos encontramos:

*Imágenes Geo:* Son las imágenes de GeoEye-1 con el menor nivel de procesamiento, tanto radiométrico como geométrico. Son las imágenes que un operador con capacidades fotogramétricas debería usar para generar productos georreferenciados de la máxima calidad. Para ello, GeoEye proporciona los coeficientes de las funciones racionales (RPCs), que junto con la participación de *GCPs*, un *DEM* y software comercial, permiten la obtención de ortoimágenes muy precisas. Cabe destacar que la capacidad de geoposicionamiento (fase de orientación del sensor) de las imágenes Geo de GeoEye-1 utilizando solamente los RPCs suministrados en la propia imagen ha mejorado mucho respecto a satélites anteriores como IKONOS o QuickBird, situándose en 3 m de precisión planimétrica (GeoEye Inc., 2009), medido como error medio cuadrático (*Root Mean Square Error, RMSE*).

*Imágenes ortorectificadas:* El producto *Geo Professional Precision* se corresponde con las ortoimágenes más precisas directamente suministradas por GeoEye, presentan un *RMSE* planimétrico de 2 m (GeoEye Inc., 2009).

*Imágenes de archivo:* La casa GeoEye permite la opción de proporcionar imágenes de archivo que hayan realizado de cualquier zona una vez hayan pasado 90 días desde su toma.

La diferencia económica del uso de un tipo de imágenes a otras es considerable, como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Precios de producto GeoEye-1 en dólares americanos (\$). La imagen de archivo solo puede ser de la clase Geo.

Producto	Bundle PAN/MS (0.5m/2m)
Geo	25.00 \$
Geo Professional Precision*	40.00 \$
Imagen de Archivo	12.50 \$

\*El precio puede aumentar si es necesario el aumento de *GCPs* en algunas zonas de la imagen.

En nuestro trabajo se utiliza una imagen de archivo de la clase Geo, que es el único producto que se puede obtener como imagen de archivo, y mediante la participación de *GCPs* y *DEM* se realiza la ortoimagen. Las precisiones obtenidas, como se verá en el apartado de resultados, serán muy superiores a las que nos podrá proporcionar una ortoimagen *Geo Professional Precision*.

La posibilidad de llegar a ortoimágenes mediante una imagen de archivo, como es este caso, o incluso con el uso de una imagen Geo, reduce el coste de lo que podría ser adquirirla directamente a la casa GeoEye, por lo que resulta interesante realizar este tipo de trabajos.

### 2.3. ZONA DE ESTUDIO

La zona de estudio se sitúa en la costa de Almería, España, en una franja aproximadamente de 11 km de largo por 775 m de ancho (Fig. 3). Concretamente se sitúa entre el puerto de Garrucha y el puerto de Villaricos, centrada en las coordenadas X= 650870 m, Y= 4119869 m, expresadas en el sistema WGS84. La zona de estudio tiene una elevación media de 7 m aproximadamente, con un rango de 0 a 55 m sobre el nivel medio del mar en Alicante. El aumento de edificación en esta franja costera durante los últimos 50 años ha provocado cambios significativos en su paisaje, y ha producido catástrofes naturales, como ha sido la pérdida de 200m aproximadamente de playa en la orilla de la playa Quitapellejos, situada en Palomares.

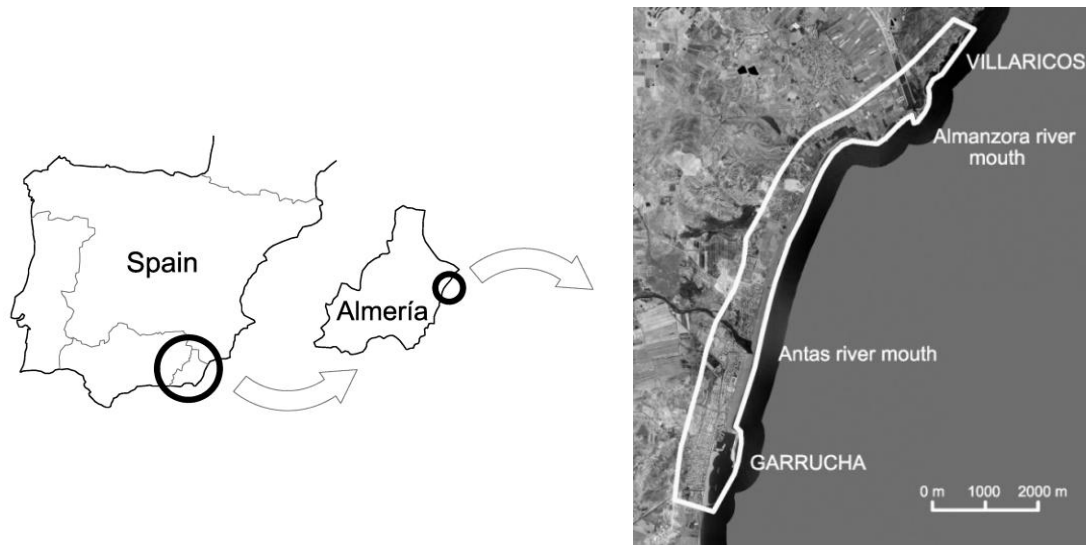


Figura 3. Localización de la zona de estudio. Centrada en coordenadas X= 650870 m, Y= 4119869 m en el sistema WGS84.

#### 2.4. IMAGEN DE GEOEYE-1

En Enero de 2011, se adquirió una imagen de archivo de GeoEye-1 (PAN + MS). La imagen fue capturada el 29 de Septiembre de 2010. La imagen obtenida fue remuestreada a 0.5 m y 2 m en PAN y MS respectivamente y ocupa aproximadamente 49 km<sup>2</sup> incluyendo las 850 ha de la zona de estudio. La imagen de archivo y el recorte solicitado de la misma se pueden ver en la Figura 4, mientras que en la Tabla 4 podemos observar las características de la imagen que hemos usado en este trabajo.

Tabla 4. Características de la imagen PAN y MS de GeoEye-1 adquirida para el trabajo.

Producto	GeoEye-1 Geo
Fecha de adquisición	29/09/10
Cobertura de nubes (%)	0
Fuente de la imagen	2010092911015041603031603264_004
Acimut del Sol	159.29 grados
Ángulo de elevación solar	48.39 grados
Ángulo de elevación del sensor	69.41 grados
Acimut del Sensor	221.92 grados
Tamaño de pixel	0.5 m PAN and 2 m MS



*Figura 4. Recorte final de imagen GeoEye-1 adquirido de una imagen de archivo*

## **2.5. PUNTOS DE CONTROL Y DE COMPROBACIÓN**

Para poder realizar este trabajo se necesitan puntos de coordenadas conocidas que sean totalmente identificables en la imagen, para poder realizar la fase de orientación y ortorectificación que requiere la finalidad de este proyecto. En este trabajo se seleccionaron y midieron cuidadosamente 119 puntos para la imagen PAN y 92 puntos para la imagen MS (Fig. 5).

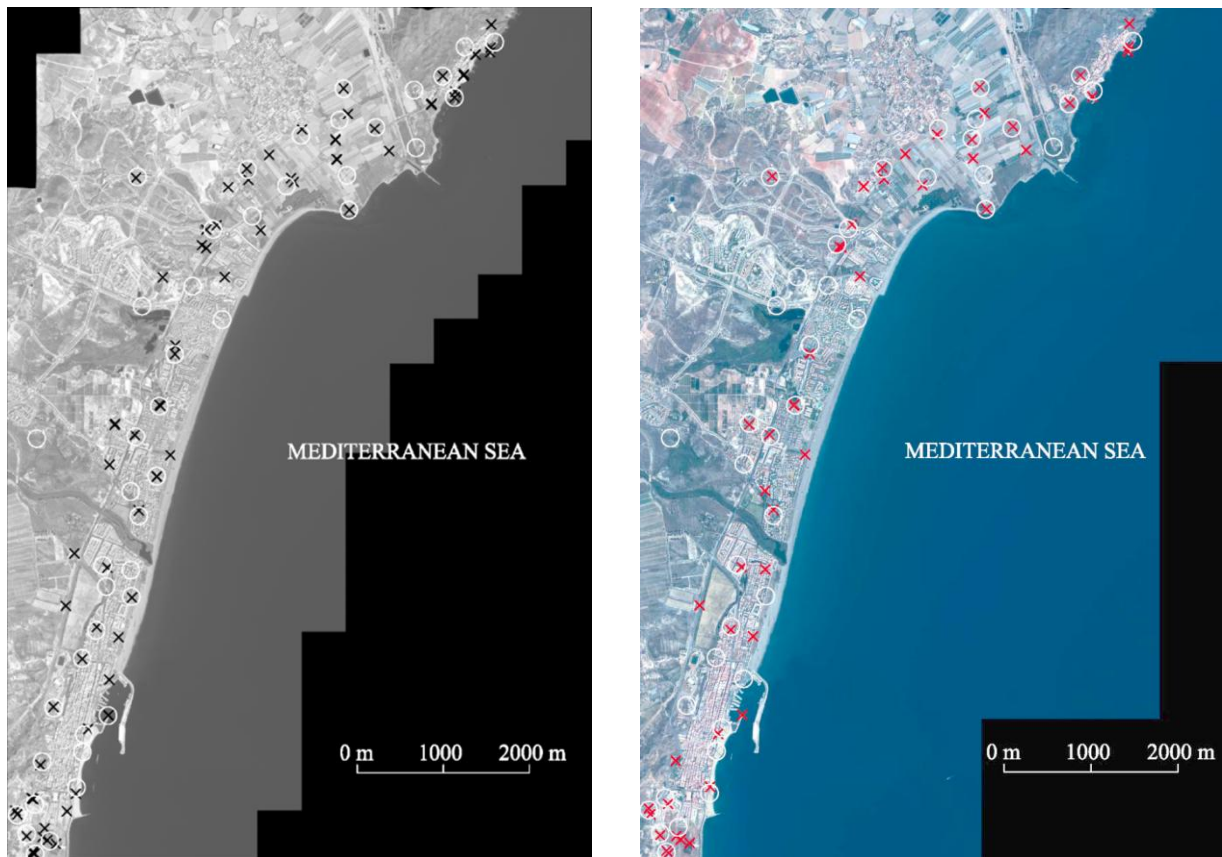


Figura 5. Situación de los GCPs (marcados como cruces) e ICPs (marcados como círculos) sobre la zona de trabajo. Izquierda imagen PAN con 75 ICPs y 44 GCPs. Derecha imagen MS con 50 ICPs y 42 GCPs.

La obtención de coordenadas de los puntos elegidos, que posteriormente serán identificados en la imagen, se realizó con un GPS Topcon Hiper PRO, mediante el método estático relativo, desde el vértice geodésico “Juan Jordana”. Las coordenadas estarán en el sistema de referencia *European Terrestrial Reference System 1989* (ETRS89), y proyección UTM. El datum vertical está referido al nivel medio del mar en Alicante, cota ortométrica.

Los trabajos DGPS se apoyan en once puntos de campo conocidos, de los cuales, cuatro pertenecen a la red geodésica nacional, uno perteneciente a la red REGENTE (obtenido con técnicas de alta precisión espacial), y seis puntos pertenecen a la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Los valores de *RMSE* obtenidos finalmente en estos puntos tras los ajustes, fueron de 5.6 cm, 3.3 cm, 7.6 cm en X, Y, Z respectivamente.

Se usó un gran número de puntos de comprobación (*ICPs*), ya que la fiabilidad del resultado que se obtenga en el valor de *RMSE* dependerá del número de *ICPs* que se utilicen. La *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA) citada por el *Federal Geographic Data Committee* (FGDC, 1998) y el *Joint Research Centre, European Commission* (JRC, 2008) recomiendan el uso de un mínimo de 20 *ICPs*,

aunque algunos autores sugieren que el número de puntos debería ser mayor (Li, 1991; Ariza y Atkinson, 2005; Aguilar et al., 2008b).

## 2.6. MODELOS DIGITALES DEL TERRENO

En el proceso de ortorectificación de imágenes de satélite *VHR*, es necesario corregir el desplazamiento debido a la inclinación del sensor y al relieve del terreno. Por ello es necesario el uso de un *DEM*.

Un Modelo Digital del Terreno (*Digital Terrain Model, DTM*) constituye una representación numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua. Cuando la variable representada son las cotas o elevaciones del terreno, el *DTM* pasa a denominarse *DEM*.

Los *DTM* o *DEM* deben cumplir dos condiciones adicionales: (i) la primera es que debe existir una estructura interna de los datos que represente las relaciones espaciales entre los mismos y, (ii) que la variable a representar debe de ser variable continua y de tipo cuantitativo. En un *DTM*, las variables a representar son extraordinariamente diversas, aunque la más frecuente sin duda es la representación de la cota o altitud de los puntos que definen la superficie de terreno, dado lugar a los *DEM*. Los *DEM* pueden considerarse la versión digital de los mapas topográficos clásicos.

Se acepta que la elevación representada en un *DEM* es la elevación de la superficie del terreno, por lo que deberíamos obviar estructuras como edificios o elementos como árboles. En el caso de incluir estos elementos, se suele hablar de modelos digitales de superficie (*Digital Surface Model, DSM*). Este término se está usando cada vez con mayor frecuencia debido a que algunos nuevos métodos de captura de datos de elevación (e.g., *LiDAR, Light Detection And Ranging*) incluyen todos los elementos superficiales, sin aislar el terreno del resto de estructuras (Cuartero, 2003). Los *DEMs* pueden ser obtenidos generalmente a partir de vuelos fotogramétricos, aunque más recientemente, la tecnología *LiDAR* se está imponiendo cada vez más en la captura de datos altimétricos.

En este trabajo se han testado dos *DEM* diferentes: (i) uno el proporcionado por la Junta de Andalucía, procedente de un vuelo fotogramétrico y (ii) un *DEM* obtenido a partir de datos *LiDAR*. En ambos casos se realiza el estudio para la imagen PAN y la imagen MS.

### 2.6.1. DEMs a partir de vuelos fotogramétricos.

Las técnicas más empleadas para la generación de los *DEM* son las fotogramétricas. La fotogrametría se basa en el análisis de pares estereoscópicos y extracción de la información de los mismos durante la fase de restitución, con ayuda de la visión estereoscópica. Entre los métodos fotogramétricos utilizados para la captura de la información (restitución fotogramétrica) puede hablarse de restitución numérica, analítica y digital. También pueden distinguirse los métodos en función del grado de automatización que introduzcan en el proceso de captura de la información, por ello, puede hablarse de métodos manuales, semiautomáticos y automáticos.

Generalmente en la generación de un *DEM* el objetivo que se plantea es obtener una adecuada representación de la superficie del terreno con la menor cantidad posible de puntos. En el caso de malla regular la información obtenida puede ser completada con

información de líneas de ruptura, ancho de la malla y otros elementos geomorfológicos de la zona.

El *DEM* usado en este caso es el que proporciona la Junta de Andalucía, con una resolución de 10 m, obtenido a partir del vuelo fotogramétrico a escala aproximada 1/20000, realizado en 2001-2002. Este *DEM* fue publicado en el año 2005 (Junta de Andalucía, 2005). El *DEM* de la Junta de Andalucía debió ser transformado del sistema UTM 30 N ED 50 al nuevo sistema de referencia oficial en España, *ETRS89*, sobre el elipsoide GRS80. El sistema de referencia geodésico *ETRS89* fue el elegido para el desarrollo del trabajo presentado. Todos los datos georreferenciados fueron obtenidos o representados en este datum.

Para calcular la precisión de este modelo se usaron 62 *ICPs*, distribuidos por toda la zona de trabajo, obteniendo una precisión vertical de unos 1.34 m (expresada como *RMSE*).

### **2.6.2. DEMs a partir de datos LiDAR.**

La tecnología *LiDAR* representa un procedimiento alternativo a los métodos de medida indirecta a partir de fotografías aéreas (fotogrametría) o medida directa en campo a través de sistemas GPS, para la generación automática de *DEMs*, que responde a las necesidades del sector geomático de búsqueda y desarrollo de nuevos procedimientos de adquisición de datos que sean capaces de llevar a cabo tareas propias del sector de formas cada vez más eficientes y que den cabida a un mayor número de aplicaciones.

El *DEM* usado en este caso, a partir de datos *LiDAR*, tiene una resolución de 1 m. Este *DEM* se generó a partir de un vuelo combinado de fotogrametría y *LiDAR*, realizado sobre la zona de estudio el 28 de Agosto de 2009. La altura de vuelo fue de unos 1000 m, y se usó un laser escáner Leica ALS60 con 35° FOV. Una estación GPS fija de referencia en el terreno también fue utilizada. Para calcular la precisión vertical que obtenemos en el *DEM* se usaron 62 *ICPs*, distribuidos por toda la zona de trabajo. La precisión vertical obtenida para este *DEM* fue de 8.9 cm.

Todos los procesos para filtrar la nube de punto de láser, ajustando las cuatro pasadas de vuelo y manejando datos *LiDAR* fueron realizados mediante TerraMatch® y TerraScan® 010.

La diferencia de precisión de los datos que encontramos en los dos *DEM* utilizados, se pueden apreciar en las Figuras 6 y 7.

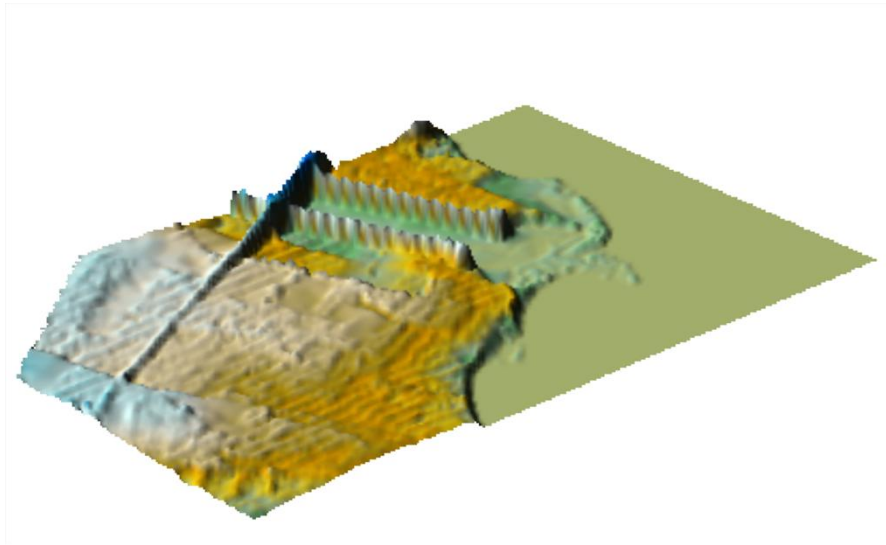


Figura 6. DEM Junta de Andalucía.

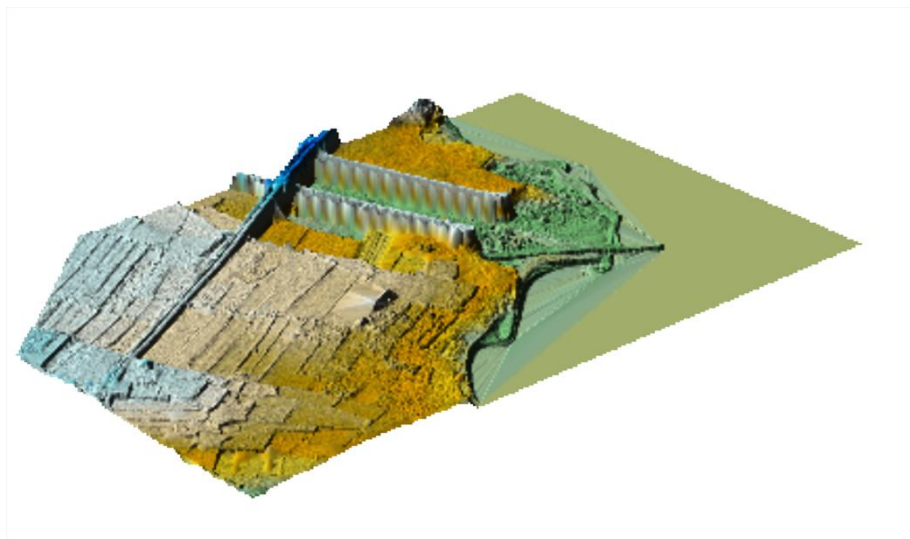


Figura 7. DEM datos LiDAR

Se puede observar que la diferencia de detalle en una y otra es bastante significativa, por lo que se llega a la conclusión de que los datos *LiDAR* (Figura 7) ofrece un *DEM* mucho más preciso que el *DEM* que presenta la Junta de Andalucía (Figura 6).

## 2.7. MODELOS DE SENSOR

Un modelo de sensor o modelo de corrección geométrica es una ecuación matemática que relaciona la posición de puntos en el espacio objeto ( $X, Y, Z$ ) con su correspondiente posición bidimensional (2D) en la imagen ( $x, y$ ).

Cuando se realiza la corrección de imágenes de satélite *VHR*, varios modelos de sensor pueden ser usados, aunque muchos de los investigadores recomiendan el uso de (i) funciones racionales 3D independientes del terreno que usan metadatos suministrados



por la empresa suministradora, y, (ii) modelos físicos 3D o modelos rigurosos (Toutin, 2004a; Wolniewicz et al., 2004; Aguilar et al., 2007a; Dolloff y Settergren, 2010).

### 2.7.1. Funciones racionales 3D independientes del terreno con metadatos.

Con el modelo físico del sensor disponible para las empresas suministradoras de imágenes de satélite, los *RPC* pueden ser resueltos usando una malla en el espacio terreno con sus nodos calculados a través del modelo físico (Tao y Hu, 2001). Estos 39 coeficientes, correspondientes a funciones racionales de tercer grado, son suministrados junto con las imágenes de satélite *VHR*, como IKONOS, QuickBird o GeoEye-1.

Este modelo puede ser aplicado sin *GCP*, por eso es conocido como independiente del terreno, aunque las precisiones geométricas en la fase de orientación del sensor así obtenidas no son muy buenas.

Una posibilidad muy interesante de este método es que el usuario puede mejorar esa precisión, refinando los coeficientes racionales mediante la introducción en el modelo de unos pocos *GCP*. Los *RPC* pueden ser refinados directa o indirectamente (Hu et al., 2004).

Los métodos directos actualizan los *RPC* facilitados por la empresa suministradora (Hu y Tao, 2002), mientras que los métodos indirectos introducen transformaciones complementarias (normalmente polinómicas) en el espacio imagen o en el espacio terreno, no cambiando los *RPC* originales. Hay numerosas publicaciones sobre resultados obtenidos usando distintas variaciones de los métodos indirectos (Di et al., 2003; Fraser y Hanley, 2003; Grodecki y Dial, 2003; Noguchi et al., 2004).

Para este trabajo, fueron usadas las versiones de PCI Geomática OrthoEngine v.10.3.2, desarrolladas por PCI Geomatics. El método indirecto empleado por este software para refinar los resultados de los coeficientes de las funciones racionales suministrados con la imagen está basado en el ajuste de bloque desarrollado por Grodecki y Dial (2003) para el espacio imagen.

$$\begin{aligned}\Delta x &= x' - x = a_0 + a_1x + a_2y + a_3xy + a_4x^2 + a_5y^2 \\ \Delta y &= y' - y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3xy + b_4x^2 + b_5y^2\end{aligned}\tag{1}$$

dónde  $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  y  $b_2$  son los coeficientes de ajuste de una imagen,  $\Delta x$  y  $\Delta y$  expresan las diferencias entre las coordenadas imagen medidas para los nuevos *GCP* empleados para refinar los resultados ( $x', y'$ ) y las coordenadas imagen obtenidas para los mismos *GCP* ( $x, y$ ) según los coeficientes racionales originales.

Para la transformación de orden cero (*RPC0*), solo es necesario el uso de un *GCP*, ya que se trata de un cambio simple ( $a_0$  y  $b_0$ ). Para la transformación afín (*RPC1*) son necesarios tres *GCP*, ya que se necesitan seis coeficientes de la ecuación 1 ( $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1$  y  $b_2$ ) para su cálculo. Por último, para funciones racionales 3D con metadatos, se realiza el ajuste mediante un polinomio de segundo orden (*RPC2*) para el que son necesarios seis *GCPs*, ya que se necesitan doce coeficientes ( $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$ ) para su cálculo.

### 2.7.2. Modelos físicos 3D

Los modelos físicos, también conocidos como rigurosos, paramétricos o determinísticos, intentan reflejar la geometría física de la escena en el momento de la toma de la misma. Para ello, es necesario incluir en el modelo el tiempo exacto de la toma de las imágenes que componen la escena, información sobre la distancia focal y distorsiones, y un completo conjunto de datos sobre la situación exacta del satélite y efemérides. Este método, en teoría, ofrece la mayor precisión geométrica (Robertson, 2003) y es muy robusto sobre toda la imagen usando sólo unos pocos *GCP* (Cheng *et al.*, 2003).

Un modelo físico 3D desarrollado por el Dr. Toutin del Centre for Remote Sensing de Canada (Toutin y Cheng, 2002; Toutin, 2003) es probado en este trabajo (*CCRS*). Este modelo físico, inicialmente desarrollado para sensores de media resolución en la banda visible e infrarroja así como para señales radar (Toutin, 1995), fue más tarde adaptado para datos de satélite VHR (Toutin 2004b). El modelo *CCRS* requiere un mínimo de 6 *GCP*.

## 3. METODOLOGÍA

### 3.1. ESTUDIO DE LA CALIDAD GEOMÉTRICA

La ortorectificación transforma la proyección de la imagen a una proyección ortogonal con escala uniforme, eliminando las deformaciones producidas por el relieve y por la inclinación de la toma de la imagen. El error geométrico de la ortoimagen ( $\sigma_{ortho}$ ) puede ser expresado como la suma del error en la fase de orientación ( $\sigma_o$ ) del sensor más el debido al *DEM* ( $\sigma_{DEM}$ ). Todos los términos son expresados como desviación estándar.

$$\sigma_{ortho}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{DEM}^2 \quad (2)$$

La ecuación 2 está basada en la teoría de propagación de error general, asumiendo que las fuentes de error son independientes y no correladas y, al mismo tiempo, estos errores son distribuidos al azar.

En este trabajo se estudian para la imagen PAN y MS de GeoEye-1, las dos fases mencionadas: orientación del sensor y ortorectificación.

### 3.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN PANCROMÁTICA

En este apartado se estudio la influencia de algunas variables en la precisión geométrica que se obtienen en la ortoimagen final.

Para poder realizar este estudio diferenciamos dos fases:

### **3.2.1. Fase de Orientación del Sensor**

En esta fase se estudia la influencia de variables como son: el modelo de sensor utilizado (*RPC0*, *RPC1*, *RPC2* y *CCRS*), el número de puntos que se utilizan para el cálculo de cada modelo de sensor, y por último, la distribución de los mismos para cada estudio realizado, diferenciando entre buena y mala distribución.

Para la imagen pancromática se dispone de 119 puntos, de los cuales 44 se toman como *GCPs* y el resto, 75, se quedan como *ICPs*.

De los 44 *GCPs* se hacen combinaciones de 2, 3, 4, 7, 10 y 12 de forma que los puntos queden distribuidos por toda la imagen. Se realizan cinco repeticiones para cada combinación de *GCPs*, intentando que tengan una buena distribución en planimetría y en altimetría. Se considera que los puntos están bien distribuidos cuando la posición de los mismos están a lo largo de toda la imagen, lo más separados posible, en el caso de pocos puntos, y en los casos de mayor número de *GCPs*, se intentan que estén distribuidos por todas las zonas de la imagen y teniendo en cuenta el rango de cotas. Se repite el proceso con 44 *GCPs*, pero con una mala distribución de los mismos. Se considera que los puntos están mal distribuidos cuando se concentran en zonas específicas, de manera que están a poca distancia y no se tiene en cuenta el rango de cotas. En este caso también se realizan cinco repeticiones. (Figura 8).

No para todos los modelos de sensor se pueden realizar repeticiones con todas las posibles combinaciones de *GCPs*. Para el modelo de sensor *RPC0*, se realizan repeticiones con 2, 3, 4, 7, 10 y 12 *GCPs*; para *RPC1* se realizan repeticiones con 4, 7, 10 y 12; para *RPC2* y *CCRS* se realizan repeticiones con 7, 10 y 12 *GCPs*.

Para estudiar la influencia de factores en los resultados obtenidos para la fase de orientación, se realiza un análisis de la varianza (ANOVA). La variable que se estudia en este análisis es el *RMSE* planimétrico obtenido en las cinco repeticiones en los mismos 75 *ICPs* para cada repetición. Las variables que se estudian son el modelo de sensor, el número de *GCPs*, la distribución de los puntos y la intersección entre ambas. Cuando los resultados del análisis (ANOVA) presentan diferencias significativas, se separan mediante el test de Duncan, a un nivel de confianza de 95%.

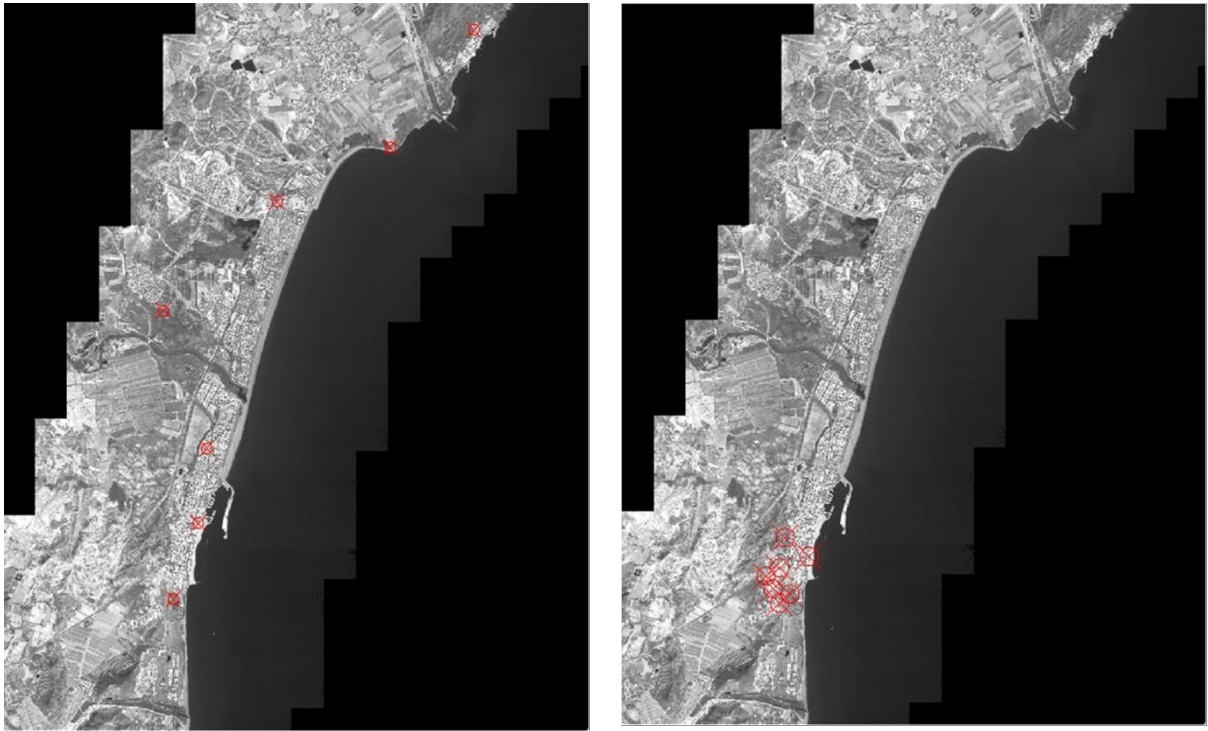


Figura 8. Imagen considerando buena distribución de 7 GCPs (izd.) y mala distribución de 7 GCPs (dcha.)

### 3.2.2. Fase de ortorectificación

En esta fase se quiere conocer la precisión geométrica que se obtiene en las imágenes ortorectificadas usando los *DEM*s de datos *LiDAR* y de la Junta de Andalucía.

Se generan diez ortoimágenes pancromáticas generadas con *RPC0* y siete puntos de control bien distribuidos, generando dos imágenes para cada repetición, una para el *DEM LiDAR* y otra para el *DEM* de la Junta de Andalucía.

De los 75 *ICPs* que se tienen como puntos de chequeo, para el estudio de la precisión en la generación de la ortofotografía, solo 48 *ICPs* son usados para esta fase. Esto se debe a que al generar la orto con los diferentes *DEM*, se encuentran puntos que no son localizables o puntos que por su altura no son recomendables para el estudio de precisión en planimetría. Todas las ortofotos que se crean tienen una resolución de 0.5m. En el proceso de ortorectificación, se realice un remuestreo sinusoidal ( $\sin(x)/x$  con ventanas de  $16 \times 16$ ) (Toutin, 2004a) aplicada a la imagen original.

Para estudiar la precisión obtenida finalmente, se estudia el *RMSE* obtenido de los incrementos en coordenadas de los *ICPs*, que se obtienen de la diferencia de coordenadas que existen entre las coordenadas de los puntos en la ortoimagen y las coordenadas obtenidas mediante técnica GPS.

### 3.3. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN MULTIESPECTRAL.

Al igual que en la imagen pancromática, se realiza un estudio de la influencia de variables en precisión geométrica que se obtiene en la ortoimagen final.

En este caso, el estudio de la multiespectral también se diferencia en dos fases: orientación y ortorectificación.

#### 3.3.1. Fase de orientación

En esta fase se estudia la influencia de variables como son: el modelo de sensor utilizado (*RPC0*, *RPC1* y *RPC2*) y el número de puntos que se utilizan para el estudio de cada modelo de sensor. En este caso, solo se realiza el estudio para puntos bien distribuidos.

Para la imagen multiespectral se dispone de 92 puntos, de los cuales, 42 se toman como *GCPs* y 50 se toman como *ICPs*. El número de puntos disminuye en la imagen MS respecto de la PAN, debido a la resolución de la misma. Para la imagen PAN, la resolución es de 0.5 m frente a los 2 m que tiene la MS. Esta diferencia de resolución dificulta la localización de algunos de los puntos, que son claramente identificables en la imagen PAN (Fig. 9).

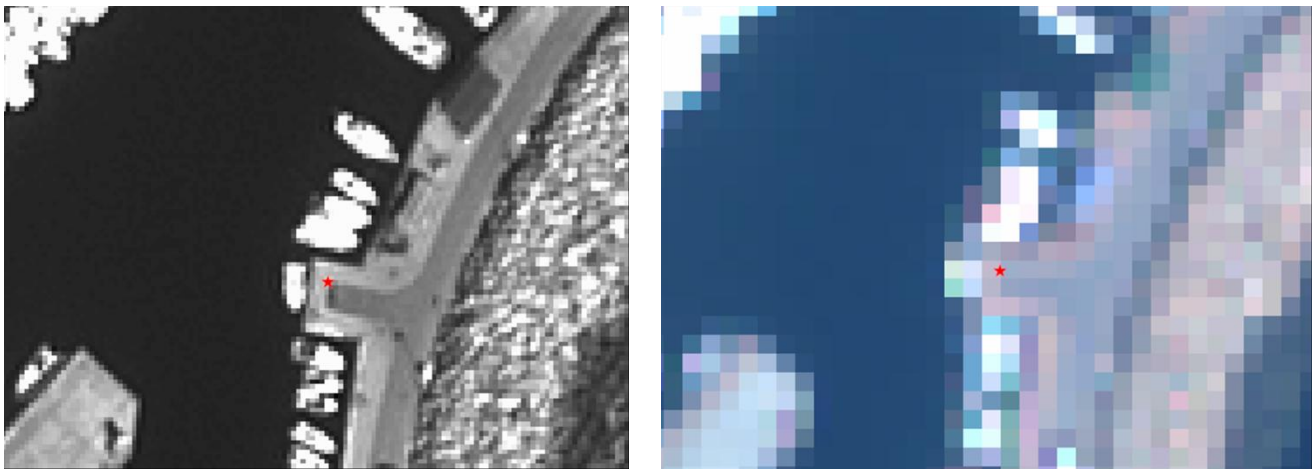


Figura 9. Imagen PAN a la izquierda, con resolución de 0.5m e imagen MS a la derecha, con resolución de 2m.

De los 42 *GCPs* que se hacen combinaciones de 2, 3, 4, 7, 10 y 12 de forma que los puntos queden distribuidos por toda la imagen. Se realizan cinco repeticiones para cada combinación de *GCPs*, intentando que tengan una buena distribución en planimetría y en altimetría.

Para la imagen MS se sigue el mismo criterio que para la imagen PAN en cuanto al número de puntos que se combinan para cada modelo de sensor que se estudia. De manera que se obtienen 30 proyectos para *RPC2*, 40 proyectos para *RPC1* y 50 proyectos para *RPC0*.

### 3.3.2. Fase de ortorectificación

Al igual que en la imagen PAN, en esta fase se quiere conocer la precisión geométrica que se obtiene en las imágenes ortorectificadas usando los *DEMs* de datos *LiDAR* y de la Junta de Andalucía.

Se generan diez ortoimágenes pancromáticas generadas exactamente igual que en la fase de ortorectificación de imágenes PAN.

En este caso, de los 50 *ICPs* que se tienen como puntos de chequeo, para el estudio de la precisión en la generación de la ortofotografía, solo 32 *ICPs* son usados para esta fase. Todas las ortos que se crean, tienen una resolución de 2m. . En el proceso de ortorectificación, se realice un remuestreo sinusoidal ( $\sin(x)/x$  con ventanas de  $16 \times 16$ ) (Toutin, 2004a) aplicada a la imagen original.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1. PRECISIÓN EN IMAGEN PAN SIN USO DE GCPs.

La empresa GeoEye proporciona, junto con la imagen adquirida, coeficientes racionales que son suficientes para crear una ortofoto sin necesidad de usar *GCPs*. Tanto para la imagen PAN como para la imagen MS se han realizado directamente un estudio sin el uso de *GCPs*, obteniendo como errores sistemáticos 2.65m en el eje *X* y 0.57 m en el eje *Y* para imagen PAN con 75 *ICPs*, y obteniendo unos resultados muy parecidos para la imagen MS (i.e., 2.21m en *X* y 0.65 en *Y*, en 50 *ICPs*). Estos resultados están dentro de los límites marcados por GeoEye para las imágenes *Geo* (i.e., 3m medidos como  $RMSE_{2d}$ ). En planimetría, las desviaciones estándar para los errores en coordenadas son de 0.33m y 1.30m para PAN (75 *ICPs*) y MS respectivamente (50 *ICPs*). Esto debería poder ser alcanzado usando unos pocos *GCPs*.

Las imágenes de satélites *VHR* son un valioso instrumento para diferentes aplicaciones *GIS* como son mapas topográficos, actualización de mapas, generación de ortofotos o detección de cambios. Para muchas de estas aplicaciones se puede usar imágenes *pan-sharpened* (e.g., Dennison et al., 2010) que son una fusión de imagen PAN e imagen MS. Por lo tanto, es posible realizar el *pan-sharpening* o algoritmo de fusión sobre los datos originales antes de la fase de orientación del sensor. Así podemos obtener los mejores resultados geométricos posibles. De este modo, cuando se crea una imagen *pan-sharpened*, usando el algoritmo *PANSHARP* de PCI-Geomática, el archivo generado *RPC* es el mismo que el suministrado por la casa GeoEye de la imagen PAN. Por lo tanto, si las coordenadas de los *GCP* e *ICP* son las mismas, los resultados que se obtengan para la imagen PAN serán los mismos que se obtengan para la imagen *pan-sharpened*, por lo que los resultados de una imagen PAN podrían ser extrapolados a una imagen *pan-sharpened*.

## 4.2. EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN EN LA IMAGEN PANCRÓMÁTICA.

### 4.2.1. Fase de orientación del sensor.

Según la clasificación anteriormente citada, se distinguen dos tipos de datos para la fase de orientación dentro de la imagen PAN (buena y mala distribución). En ambos casos el ensayo consta de cinco repeticiones sobre la zona de estudio, donde se evalúa el Modelo de sensor utilizado (*RPC0*, *RPC1*, *RPC2* y *CCRS*) y el número de *GCPs* utilizados para los mismos.

- Buena distribución de los datos.

Considerando una buena distribución de los *GCPs* utilizados para cada repetición (Fig. 8), el estudio estadístico de los datos se encuentra resumido en la Tabla 5.

Tabla 5. ANOVA para *GCPs* bien distribuidos en la imagen PAN.

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS		MEDIA		SIGNIFICACIÓN
	GL	CUADRÁTICA	F		
Modelo	16,525	15	1,102	15,339	0,000
MODELO	0,920	3	0,307	4,270	0,008
N_GCPS	0,504	4	0,126	1,754	0,150
MODELO*N_GCPS	0,765	6	0,109	1,521	0,178
Error	4,310	60	0,072		
Total	20,835	75			

Se puede observar que según el grado de significación, el modelo de sensor, MODELO, es el dato más significativo. Ya que el estudio se ha realizado a un nivel de confianza del 95%, para que un dato sea significativo,  $p$  debe estar por debajo de 0.05 ( $p < 0.05$ ), en este caso, como se observa en la Tabla 5, la significación del MODELO es del 0.008.

Una vez que, de las dos variables, se destaca cual es la más significativa, se procede al estudio de la misma por separado. El objetivo de este estudio es determinar que modelo de sensor será el adecuado, que se completará, posteriormente, con el número de *GCPs* que recomendamos para el mismo.

Siendo el MODELO la variable significativa, se realiza el estudio de la misma, cuya separación de medias se presenta en la Tabla 6.

Tabla 6. Estudio de la separación de medias en la variable modelo para una buena distribución de 75 GCPs en imagen PAN a un nivel de confianza del 95%.

	MODELO	N	SUBCONJUNTO	
			1	2
DUNCAN	RPC0	25	0,357496	
	RPC1	20	0,3371975	
	RPC2	15	0,438987	
	CCRS	15		0,653387
	Significación		0,397	1,000

En este caso se usará el test de Duncan que separará el modelo que estadísticamente tenga el *RMSE* significativamente diferente.

Como se muestra en la Tabla 6, el modelo *CCRS*, es el único que muestra diferencias significativas con el resto de modelos, ya que se muestra en un subconjunto diferente al resto. Se observa, que para los tres modelos que se encuentran dentro del mismo subconjunto, modelos *RPC0*, *RPC1* y *RPC2*, el modelo que mejor resultados obtiene es *RPC0*, aunque la diferencia con *RPC1* es muy pequeña.

– Mala distribución:

Considerando una mala distribución de los *GCPs* utilizados para cada repetición, el estudio estadístico de los datos se encuentra resumido en la Tabla 7.

Tabla 7. ANOVA para *GCPs* mal distribuidos en la imagen PAN.

FUENTE	SUMA DE CUADRADOS		MEDIA		
	GL	CUADRÁTICA	F	SIGNIFICACIÓN	
Modelo	15	7041,341	13,976	0,000	
MODELO	3	12169,46	24,154	0,000	
N_GCPS	4	5464,879	10,847	0,000	
MODELO*N_GCPS	7	5314,62	10,549	0,000	
Error	59	503,826			
Total	74	135345,838			

Se observa que todos los datos son significativos, aunque si nos fijamos en el estadístico F, la variable *MODELO*, sigue siendo la más significativa, ya que en este caso, a mayor valor de F, mayor significación.

Al igual que en el caso de la buena distribución, se estudia la variable modelo por separado, obteniendo la siguiente tabla:



Tabla 8. Estudio de la separación de medias en la variable modelo para una mala distribución de 75 GCPs en imagen PAN a un nivel de confianza del 95%.

	MODELO	N	SUBCONJUNTO		
			1	2	3
DUNCAN	RPC0	25	0,371596		
	RPC1	20	1,513765		
	RPC2	15		19,594407	
	CCRS	15			56,1742
	Significación			0,881	1,000

En este caso son más las diferencias significativas encontradas entre los diferentes modelos. El modelo 2, correspondiente a *RPC2*, es significativamente diferente a *RPC0* y *RPC1*, al igual que *CCRS*. Sin embargo no se encuentra diferencias significativas entre los dos primeros modelos, *RPC0* y *RPC1*, aún obteniéndose un mejor valor de *RMSE* con el primer modelo, *RPC0*.

Pasamos al estudio del número de *GCPs* utilizados para ambos casos y con los diferentes modelos correspondientes

En la Tabla 9, se muestran resumidos los resultados obtenidos:

Tabla 9. Comparación de medias de los resultados obtenidos para  $RMSE_{2d}$  en imagen PAN dependiendo del número y la distribución de *GCPs*. En cada columna se diferencian con diferentes letras de superíndice las diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%.

Modelo de sensor	Nº GCPs	$RMSE_{2d}$ (m)	
		Buena Distribución	Mala Distribución
RPC0	2	0,375 <sup>a</sup>	0,385 <sup>a</sup>
	4	0,376 <sup>a</sup>	0,374 <sup>a</sup>
	7	0,346 <sup>ab</sup>	0,364 <sup>a</sup>
	10	0,350 <sup>ab</sup>	0,378 <sup>a</sup>
	12	0,340 <sup>b</sup>	0,357 <sup>a</sup>
RPC1	4	0,419 <sup>a</sup>	3,854 <sup>a</sup>
	7	0,353 <sup>b</sup>	0,937 <sup>b</sup>
	10	0,371 <sup>b</sup>	0,749 <sup>b</sup>
	12	0,345 <sup>b</sup>	0,515 <sup>b</sup>
RPC2	7	0,559 <sup>a</sup>	38,618 <sup>a</sup>
	10	0,375 <sup>a</sup>	14,246 <sup>a</sup>
	12	0,384 <sup>a</sup>	5,919 <sup>a</sup>
CCRS	7	1,039 <sup>a</sup>	152,768 <sup>a</sup>
	10	0,512 <sup>a</sup>	24,315 <sup>b</sup>
	12	0,410 <sup>a</sup>	10,759 <sup>b</sup>

EL  $RMSE$  que se muestra en la Tabla 9, es la media que resulta de las cinco repeticiones para cada conjunto de  $GCPs$  en los diferentes modelos.

$RPC2$  y  $CCRS$  muestran ser muy dependientes del número de  $GCPs$  utilizados y de la distribución de los mismos. En el caso de  $RPC1$ , muestra una dependencia de la distribución de los  $GCPs$ . Los mejores resultados se obtienen con  $RPC0$ , indiferente a su distribución y con  $RPC1$ , con una buena distribución de los  $GCPs$ .

Para los datos obtenidos de  $RPC0$ , vemos datos homogéneos entre mala y buena distribución, aunque el mejor resultado se obtiene en la repetición de 7  $GCPs$ .

Curiosamente, usando el modelo de  $RPC0$ , la precisión para 115  $ICPs$  es de 0.38 m en planimetría (casi el mismo resultado que en nuestro trabajo) (Meguro y Fraser 2010) usando un estereopar pan-sharpened de GeoEye-1. Otros autores trabajan con varias imágenes de Ikonos, como estereopares, estereo tripletas, una sola imagen, y usando correcciones mediante  $RPCs$ , el  $RMSE_{2d}$  varía de 1.59 a 0.73 (Fraser and Hanley, 2005; Li et al., 2009; Xiong and Zhang, 2009).

En otros estudios semejantes realizados (Aguilar et al., 2008a), al realizar pruebas sobre imágenes de Ikonos, obtienen para  $RMSE_{2d}$  valores de 0.60 m, 0.63 m y 1.09 m para  $RPC0$ ,  $RPC1$  y  $CCRS$  respectivamente (estos mismos valores podría ser expresado en píxeles, teniendo en cuenta que el tamaño de pixel de producto Ikonos es 1 m). Por otra parte GeoEye-1 con 0.5 m de tamaño de pixel y realizando el análisis sobre las cinco repeticiones generadas para  $GCPs$  bien distribuidos,  $RMSE_{2d}$  estará entre 0.67 y 0.84 pixel (media de 0.72 píxeles) para  $RPC0$ , 0.65 y 0.94 píxeles (media de 0.74 píxeles) para  $RPC1$ , y finalmente, en los límites de 5.58 a 0.74 píxeles (media de 1.31 píxeles) para  $CCRS$ .

Ahora, pasamos al modelo  $CCRS$ . Debido a la poca información que proporciona GeoEye sobre sus satélites, resulta difícil desarrollar un modelo de sensor paramétrico que refleje la realidad física de la geometría para el sensor de Ikonos y GeoEye-1 (Tao et al., 2004). En nuestro trabajo se realizan estudios usando este modelo físico integrado dentro de OrthoEngine, obteniendo resultados mediocres. Estudios realizados sobre estereopares de imágenes PAN GeoEye-1, han obtenido resultados, tras aplicar el modelo  $CCRS$  de 1-2 pixel (Crespi et al., 2010).

### **4.2.2. Comparación de resultados $RPC0$ y $RPC1$**

Pasamos a realizar una comparación entre los dos mejores modelos obtenidos en el estudio de esta fase para la imagen PAN de GeoEye-1. Hasta ahora, tanto  $RPC0$  como  $RPC1$  con siete  $GCPs$  podrían ser la mejor opción. Pero se podrían obtener errores sistemáticos. De ahí, el estudio de la media de los residuos, tanto para X como para Y, para los 75  $ICPs$  en  $RPC0$  y  $RPC1$ , y siempre con 7  $GCPs$  para las cinco repeticiones que se realizan.

Los errores sistemáticos originales eran de 2.65m en X y 0.57m en Y, al aplicar  $RPC0$  y  $RPC1$ , los errores disminuyen como se muestra en la Tabla 10, aunque los mejores resultados se muestran con  $RPC1$ . En la misma tabla también se muestran los límites, tanto por exceso como por defecto, a un nivel de confianza del 95%. Por lo que para  $p < 0.05$  se puede aplicar la siguiente fórmula:

$$L\acute{i}mite = Media \pm \frac{1.96 \times \sigma_{media}}{\sqrt{75}} \quad (3)$$

Donde *Media* es el valor de la media de los residuos generados en los 75 *ICPs*, y  $\sigma_{media}$  es la desviación para cada repetición.

Tabla 10. Valores medios de los residuos obtenidos para el X e Y con un nivel de confianza del 95% para 75 *ICPs* durante la fase de orientación del sensor en imagen PAN.

Repeticiones	Ejes	RPC0 con 7 GCPs bien distribuidos			RPC1 con 7 GCPs bien distribuidos		
		Media (m)	Límite inferior	Límite superior	Media (m)	Límite inferior	Límite superior
1	X	-0,009	-0,056	0,038	-0,026	-0,073	0,021
	Y	0,001	-0,057	0,059	0,030	-0,028	0,088
2	X	0,017	-0,030	0,064	-0,019	-0,070	0,031
	Y	<b>-0,059</b>	-0,116	-0,001	-0,051	-0,107	0,004
3	X	<b>0,094</b>	0,047	0,141	0,028	-0,032	0,087
	Y	<b>-0,183</b>	-0,241	-0,125	<b>-0,105</b>	-0,169	-0,040
4	X	0,041	-0,006	0,088	-0,004	-0,056	0,048
	Y	<b>-0,069</b>	-0,127	-0,011	-0,040	-0,094	0,015
5	X	0,015	-0,033	0,062	-0,006	-0,064	0,052
	Y	<b>-0,103</b>	-0,160	-0,045	<b>-0,089</b>	-0,145	-0,033

Si no existiesen errores sistemáticos, la media de los residuos sería prácticamente cero, pero como se puede observar en la Tabla 10, hay algunos valores de la media que no están dentro de los límites calculados. Para *RPC0*, cinco de los diez valores no entraron dentro de los límites, mientras que para *RPC1*, solo dos de los datos no entraron dentro de los límites.

Para poder asegurar que *RPCs* será el que mejores resultados obtenga, se realiza un estudio gráfico, que se muestra en la Figura 10.

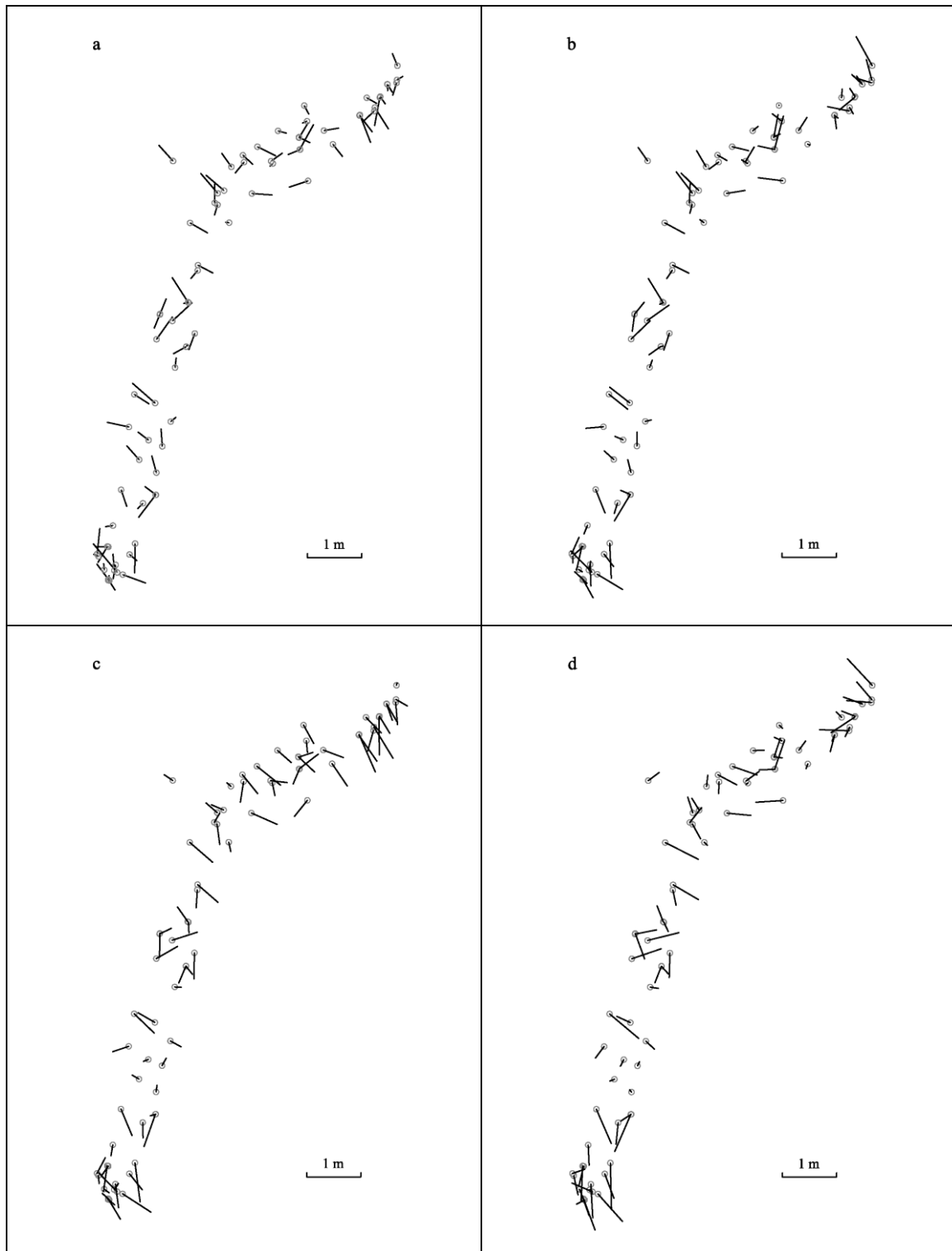


Figura 10. Distribución de los residuos en coordenadas de la imagen pancromática después de la fase de orientación en 75 ICPs para siete GCPs bien distribuidos. (a) primera repetición RPC0, (b) primera repetición RPC1, (c) tercera repetición RPC0, (d) tercera repetición RPC1.

En la imagen se muestran la mejor y la peor repetición para *RPC0* y *RPC1* que se muestran en la Tabla 10.

Para los residuos de la repetición 1, la figura 10.a y 10.b muestran una distribución arbitraria, lo que nos lleva a pensar que no existen errores sistemáticos. Sin embargo, para la repetición 3, en *RPC0*, al norte se muestra una pequeña tendencia hacia el sudeste, seguramente causada por algún *GCPs* que no se encuentra bien situado en la imagen.

Teniendo en cuenta que para *RPC1*, tanto el número como la posición de *GCPs* es importante, y las diferencias entre estos dos modelos de sensor son mínimas, parece razonable recomendar *RPC0* para la fase de orientación de sensor en imágenes PAN de GeoEye-1, como ya hicieron Fraser y Ravanbakhsh (2009) y Meguro y Fraser (2010).

#### 4.2.3. Fase de ortorectificación.

Para estudiar la precisión en este apartado se realizan diez ortofotos para *RPC0*, con siete *GCPs*.

En la Tabla 11 se muestran las medias obtenidas para los *ICPs* usados en la ortorectificación PAN de la imagen de GeoEye-1. Se realizaron cinco ortofotos correspondientes a las cinco repeticiones que se hicieron, con siete puntos de control bien distribuidos, usando el modelo *RPC0* para cada *DEM* (*LiDAR* y Junta de Andalucía). El error producido en la ortoimagen es el resultado de la suma de el error producido en la fase de orientación, más el generado por el *DEM* (ecuación 2).

Tabla 11. Resumen  $RMSE_{2d}$  obtenido para la imagen PAN usando *DEM LiDAR* y *DEM* de la Junta de Andalucía, para 7 *GCP* bien distribuidos con *RPC0*.

PAN <i>LiDAR</i>	$RMSE_{2d}$ en 48 <i>ICPs</i>		PAN JUNTA	$RMSE_{2d}$ en 48 <i>ICPs</i>	
	(m)	(pixel)		(m)	(pixel)
	0,456	0,911		0,605	1,21
	0,432	0,864		0,628	1,256
	0,473	0,946		0,644	1,289
	0,48	0,961		0,622	1,244
	0,48	0,961		0,609	1,218
<b>MEDIA</b>	0,464	0,928	<b>MEDIA</b>	0,622	1,243

Como se pueden ver en los resultados mostrados en la Tabla 11, el uso de un *DEM* u otro, mejora visiblemente el  $RMSE_{2d}$  obtenido para las cinco repeticiones. La precisión del modelo *LiDAR* frente a la precisión que muestra el *DEM* de la Junta de Andalucía, influye notablemente en los resultados.

En imágenes de satélites de alta resolución, el campo de visión es muy importante, ya que el error que produce el *DEM* al producir la ortoimagen puede ser reducido a cero si las imágenes tienen un nadir próximo a cero. La imagen que se usa para este trabajo tiene un off-nadir de más de 20°, por lo que no es la imagen ideal para un proceso de ortorectificación muy preciso. Ya que los *DEM* usados tiene buenas precisiones, el error

propagado por el off-nadir podría reducirse. De modo que el hecho de que el área sea pequeña y el relieve sea suave también influye en las precisiones al generar la ortoimagen.

Al igual que se crea una ortoimagen PAN con diferentes *DEM*, se realiza una ortoimagen con una Modelo Digital de Superficie (*DSM*). El *DSM* utilizado se obtuvo mediante la digitalización manual de la base de los edificios de una ortoimagen obtenida con el *DEM LiDAR* de 2009. Una de las posibles aplicaciones que podemos darle a una ortoimagen es su uso para clasificación de objetos. Para ello debemos tener una ortoimagen donde todos los objetos que aparezcan en la imagen se encuentren situados donde están realmente. En la Figura 11, los edificios muestran su inclinación debido al off-nadir de la toma con el uso del *DEM*, con respecto a la posición que presenta los edificios con el uso del *DSM*. Aunque a simple vista el uso del *DSM* parece situar a los objetos donde realmente se encuentran, debido a que corrige la inclinación de la toma de la imagen, se presenta el inconveniente de que las zonas que antes aparecían tapadas debido a la inclinación de los edificios se han tenido que realizar sin datos, por lo que no se asegura que se muestre tal y como es en la realidad. A la hora de realizar una clasificación de objetos con este tipo de imágenes, se encontraría con la dificultad de elementos no clasificados ya que no se tendrían los datos suficientes para ello o de una clasificación donde aparecerían elementos que no son realmente lo que parecen.

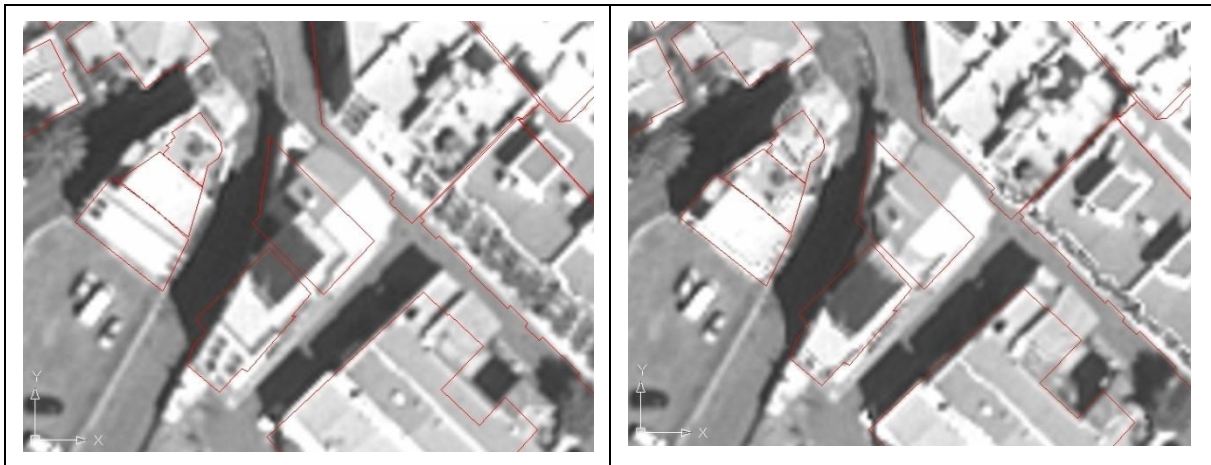


Figura 11. Ortofoto realizada con *DEM* (izq.) y ortofoto realizada con *DSM* (dch.) señalando en ambas el perímetro de la base de los edificios que aparecen en ambas imágenes. En ambas imágenes se presenta la misma zona.

### 4.3. EVALUACION DE LA PRECISION EN IMAGEN MULTIESPECTRAL

#### 4.3.1. Fase de orientación del sensor

En esta fase de orientación se realizan cinco repeticiones, ya solo para los datos que se han considerado como bien distribuidos, donde se estudia el modelo de sensor, en este caso *RPC0*, *RPC1* y *RPC2*, y el número de *GCPs*. Se realiza el estudio sobre una imagen

MS de GeoEye-1, con 50 *ICPs* que serán los puntos que muestren los siguientes resultados:

Tabla 12. ANOVA para *GCPs* bien distribuidos en la imagen MS.

FUENTE	SUMA	MEDIA		F	SIGNIFICACIÓN
	DE CUADRADOS	GL	CUADRÁTICA		
Modelo	125,65	12	10,471	471,136	0,000
MODELO	0,291	2	0,146	6,552	0,003
N_GCPS	0,274	4	0,069	3,087	0,024
MODELO*N_GCPS	0,110	5	0,022	0,989	0,434
Error	1,067	48	0,022		
Total	126,717	60			

Al igual que para la imagen PAN de GeoEye-1, al realizar el estudio estadístico a un nivel de confianza del 95%, se obtiene que la variable MODELO, modelo de sensor, es la variable más significativa. Al ser el MODELO la variable más significativa, pasamos a un estudio estadístico de separación de medias de la variable.

Tabla 13. Estudio de la separación de medias en la variable modelo para una mala distribución de 75 *GCPs* en imagen PAN a un nivel de confianza del 95%.

	MODELO	N	SUBCONJUNTO	
			1	2
DUNCAN	0	25	1,385	
	1	20	1,449	1,449
	2	15		1,535
	Significación		0,190	0,790

En este caso son más las diferencias significativas encontradas entre los diferentes modelos. El modelo 2, correspondiente a *RPC2*, es significativamente diferente a *RPC0*, sin embargo, no se encuentra diferencias significativas entre los dos primeros modelos, *RPC0* y *RPC1*, aún obteniendo un mejor resultado con el primer modelo, *RPC0*, ni tampoco se encuentra diferencias significativas entre *RPC1* y *RPC2*, aunque en ambos casos, se obtienen peores resultados que para *RPC0*.

Una vez que se ha estudiado el modelo de sensor que mejor resultados obtiene, pasamos al estudio del número de *GCPs* empleados para cada modelo de sensor. Si nos fijamos en la Tabla 14, *RPC0* obtiene mejores resultados que los demás sensores estudiados. Aunque para todos los casos no se encuentra diferencia significativa al usar un número determinada de *GCPs*, para *RPC0*, se observa que, es para dos *GCPs*, cuando peor resultado se obtiene, esto puede ser debido a la poca redundancia de datos con los que se calcula el modelo.

Se muestran diferencias importantes al uso de un *RPC* u otro, ya que, según se muestra en la Tabla 14, hay diferencias de hasta 20 cm al usar un modelo u otro.

Tabla 14. Comparación de medias de los resultados obtenidos para  $RMSE_{2d}$  en imagen PAN dependiendo del número y la distribución de *GCPs*. En cada columna se diferencian con diferentes letras de superíndice las diferencias significativas a un nivel de significación del 95%.

MODELO DE SENSOR	$RMSE_{2d}$ (m)	
	Nº <i>GCPs</i>	Buena Distribución
RPC0	2	1,494 <sup>a</sup>
	4	1,394 <sup>b</sup>
	7	1,331 <sup>b</sup>
	10	1,362 <sup>b</sup>
	12	1,330 <sup>b</sup>
RPC1	4	1,484 <sup>a</sup>
	7	1,581 <sup>a</sup>
	10	1,379 <sup>a</sup>
	12	1,351 <sup>a</sup>
RPC2	7	1,663 <sup>a</sup>
	10	1,440 <sup>a</sup>
	12	1,502 <sup>a</sup>

#### 4.3.2. Fase de ortorectificación.

Para estudiar la precisión en este apartado se realizan diez ortofotos para *RPC0*, con siete *GCPs*, al igual que para la imagen PAN.

En la Tabla 15 se muestran las medias obtenidas para los *ICPs* usados en la ortorectificación MS de la imagen de GeoEye-1. Se realizaron cinco ortofotos para 7 *GCPs* usando el modelo *RPC0*. El error producido en la ortoimagen es el resultado de la suma del error producido en la fase de orientación más el generado por el *DEM* (ecuación 2).



Tabla 15. Resumen  $RMSE_{2d}$  obtenido para la imagen MS usando DEM LiDAR y DEM de la Junta de Andalucía, para 7 GCP bien distribuidos con RPC0.

PAN_LiDAR	$RMSE_{2d}$ en 48 ICPs		PAN_JUNTA	$RMSE_{2d}$ en 48 ICPs	
	(m)	(pixels)		(m)	(pixels)
	1,445	0,723		1,513	0,757
	1,694	0,847		1,747	0,873
	1,458	0,729		1,572	0,786
	1,464	0,732		1,563	0,782
	1,746	0,873		1,655	0,828
<b>MEDIA</b>	1,562	0,781	<b>MEDIA</b>	1,610	0,805

Para la imagen MS, la diferencia al usar un modelo u otro es significativo, aunque no tanto como en el caso de la imagen PAN. Hay que tener en cuenta que la resolución de la imagen MS es de 2m frente a 0.5m de la PAN. Por lo que esto también influye en el estudio realizado. La dificultad del proceso de marcar un punto en la imagen PAN o en la imagen MS se puede observar en la Figura 9. Por eso, en este caso, no importa tanto la precisión del DEM usado. Mientras el DEM LiDAR presenta mejor precisión que el DEM de la Junta de Andalucía, los resultados obtenidos no son significativamente diferentes.

## 5. CONCLUSIONES

En base a los estudios estadísticos que se realizan en este trabajo, se llega a las siguientes conclusiones:

- En condiciones operacionales, el modelo de sensor con el que se llega a mejores resultados en la fase de orientación, tanto para la imagen pancromática como para la multiespectral es RPC0. Además, su comportamiento es prácticamente independiente al número y distribución de GCPs. Aunque RPC0 puede ser calculado con un solo GCP, se recomienda más de 4 GCPs para compensar posibles errores en la imagen.
- Con respecto a la imagen pancromática, se podría plantear el estudio del modelo de RPC1 para reducir errores sistemáticos, sin embargo en este caso si es necesario un alto número de GCPs (alrededor de siete) bien distribuidos.
- Para la generación de ortoimágenes pancromáticas con precisión subpixel, es necesario un DEM con una gran precisión, como puede ser el DEM LiDAR, con un  $RMSE_z$  de 0.09 m aproximadamente, mientras que para la generación de ortoimágenes multiespectrales, podríamos usar un DEM menos preciso, como el de la Junta, con un  $RMSE_z$  de 1.34m.
- Cabe destacar, que los resultados obtenidos se han realizado sobre una imagen de GeoEye-1, con una off-nadir y un relieve muy específicos. Por lo que no

podemos extrapolar estos resultados a imágenes con unas características diferentes a estas.

## **6. AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo fue apoyado por el Ministerio de Innovación y Ciencia del Gobierno de España y la Unión Europea (Fondos FEDER) en el marco de la Beca de referencia CTM2010-16573. También se reconoce el apoyo de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Investigación RNM-3575. Así como la inestimable ayuda del Departamento de Dibujo de la UAL.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Agüera, F., Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., 2006. Detecting greenhouses changes from QuickBird imagery on the Mediterranean coast. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21): 4751-4767.
- Agüera, F., Aguilar, F.J., Aguilar, M.A., 2008. Using texture analysis to improve per-pixel classification of very high resolution images. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(6): 635-646.
- Aguilar, F. J., Carvajal, F., Aguilar, M A., Agüera, F., 2006. Developing digital cartography in rural planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture* 55 (2007) 89–106
- Aguilar, M.A., F.J. Aguilar, F. Agüera, and J.A. Sánchez, 2007a. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 73(12):1321–1332.
- Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Carvajal, F., Agüera, F., 2007b. Comparison of two commercial solutions for generating DSMs from QuickBird stereo imagery. 2007 Annual Conference of the Remote Sensing & Photogrammetry Society (RSPSoc2007). September 2007, NewCastle, U.K., unpaginated CD ROM.
- Aguilar, M.A., F. Agüera, F.J. Aguilar, and F. Carvajal, 2008a. Geometric accuracy assessment of the orthorectification process from very high resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. *International Journal of Remote Sensing*, 29(24): 7181-7197.
- Aguilar, M.A., F.J. Aguilar, and F. Agüera, 2008b. Assessing Geometric Reliability of Corrected Images from Very High Resolution Satellites. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 74(12): 1551-1560.
- Al-Khudhairy, D.H.A., Caravaggi, I., Giada, S., 2005. Structural Damage Assessments from Ikonos Data Using Change Detection, Object-Oriented Segmentation, and Classification Techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(7): 825-837.
- Ariza, F.J., and A.D.J. Atkinson, 2005. Sample size and confidence when applying the NSSDA. *Proceedings of the 21<sup>th</sup> International Cartographic Conference*, 9-16 July, A Coruña, Spain (The International Cartographic Association), unpaginated CD-ROM.
- C. Weber and T. Ranchin, 2003. Extraction of urban features in Strasbourg, France: Comparison of two fusion algorithms for Quickbird MS and Pan data. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on “Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas”.
- Castillejo-González, I.L., García-Castillo, R., García-Ferrer, A., Sánchez de la Orden, M., López-Granados, F., 2009. Grado de influencia de las variables espectrales y de forma en la detección de olivos mediante técnicas basadas en objetos. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud.
- Cheng, P., Toutin, T., and Zhang, Y., 2003a. QuickBird-Geometric correction, data fusion, and automatic DEM extraction. *Proceedings of the 24th Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2003) and 2003 International Symposium on Remote Sensing*, 03–07 November, Busan, Korea, unpaginated CD-ROM.

Chmiel, J.; Kay, S. and Spruyt, P., 2004. Orthorectification and geometric quality assessment of very high spatial resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B4): 5 p. Istanbul, 2004 (On DVD). European Commission, 2003. Guidelines for Quality Checking of Ortho Imagery. <http://mars.jrc.it/marspac/CwRS/default.htm> [accessed 12 April 2005]

Crespi, M., P. Capaldo, F. Fratarcangeli, A. Nascetti, and F. Pieralice, 2010. DSM generation from very high optical and radar sensors: problems and potentialities along the road from the 3D geometric modeling to the surface model, 30<sup>th</sup> IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS 2010, 25-30 July, Honolulu, U.S.A, pp. 3596-3599

Cuartero, A., 2003. Análisis de Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) generados con imágenes SPOT-HRV y TERRA-ASTER. Tesis Doctoral. Universidad de Jaén.

Dennison, P.E., A.R. Brunelle, and V.A. Carter, 2010. Assessing canopy mortality during a mountain pine beetle outbreak using GeoEye-1 high spatial resolution satellite data, *Remote Sensing of Environment*, 114(2010): 2431-2435.

Di, K., Ma, R., and Li, R., 2003. Geometric processing of Ikonos Geo-stereo imagery for coastal mapping applications. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(8):873–879.

DigitalGlobe, Inc., 2009. The Benefits of the 8 Spectral Bands of WorldView-2. Disponible en: [http://worldview2.digitalglobe.com/docs/WorldView-2\\_8-Band\\_Applications\\_Whitepaper.pdf](http://worldview2.digitalglobe.com/docs/WorldView-2_8-Band_Applications_Whitepaper.pdf)

Doloff, J., and R. Settergren, 2010. An assesment of WorldView-1 positional accuracy based on fifty contiguous stereo pairs of imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 76(8): 935-943.

FGDC, 1998. Geospatial Positioning Accuracy Standards Part 3: National Standard for Spatial Data Accuracy.

URL:<http://www.fgdc.gov/standards/projects/FGDCstandardsprojects/accuracy/part3/apter3>, U.S. Federal Geographic Data Committee, Reston, Virginia. (last date accessed: 6 April 2011).

Fraser, C.S.; Hanley, H.B. and Yamakewa, T., 2002. Three-dimensional geopositioning accuracy of Ikonos imagery. *Photogrammetric Record*, 17 (99): 465-479.

Fraser, C.S., and H.B. Hanley, 2003. Bias compensation in rational function for Ikonos satellite imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1):53–57

Fraser C.S., and H.B. Hanley, 2005. Bias-compensated RPCs for sensor orientation of high-resolution satellite imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 71(8): 909-915.

Fraser, C.S., Ravanbakhsh, M., 2009. Georeferencing Accuracy of GeoEye-1 Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(6): 634-638.

Fraser, C.S., Ravanbakhsh, M., 2009. Georeferencing Accuracy of GeoEye-1 Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 75(6): 634-638.

Gamba, P., Dell'Acqua, F., Lisini, G., Trianni, G., 2007. Improved VHR urban area mapping exploiting object boundaries. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 45(8): 2676-2682

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. URL: [http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye\\_Product\\_Guide.pdf](http://www.geoeye.com/CorpSite/assets/docs/brochures/GeoEye_Product_Guide.pdf) (last date accessed: 1 April 2011).

Grodecki, J., and G. Dial, 2003. Block adjustment of high-resolution satellite images described by rational polynomials. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1):59–68.

Hu, Y., C.V. Tao, and A. Croitoru, 2004. Understanding the rational function model: Methods and applications. *Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B5), 12–23 July, Istanbul, Turkey, unpaginated CD-ROM.

Hu, Y., y C.V. Tao, 2002. Updating solution of the rational function model using additional control information. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 68(7):715–724.

Jin, X., Davis, C.H., 2005. An integrated system for automatic road mapping from high-resolution multi-spectral satellite imagery by information fusion. *Information Fusion*, 6: 257-273.

JRC, Joint Research Centre, ISPRA, 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, v 3.0. URL: <http://mars.jrc.it/mars/Bulletins-Publications/Guidelines-for-Best-Practice-and-Quality-Checking-of-Ortho-Imagery-v-3.0> (last date accessed: 6 April 2011).

Junta de Andalucía, 2005. Modelo Digital del Terreno de Andalucía. Relieve y orografía. Junta de Andalucía, Sevilla, España (em DVD).

Kay, S., P. Spruyt, and K. Alexandrou, 2003. Geometric quality assessment of orthorectified VHR space image data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(5):484–491.

Kim, T., Lee, T. Y., Kim, K. O., 2006. Semiautomatic building line extraction from Ikonos images through monoscopic line analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72: 541-549.

Lee, S. D., Shan, J., Bethel, J., 2003. Class-guided buildings extraction from Ikonos imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(2): 143-150.

Li, Z., 1991. Effects of check points on the reliability of DTM accuracy estimates obtained from experimental tests, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 57(10): 1333-1340.

Li, R., Niu, X., Liu, C., Wu, B., and Deshpande, S., 2009. Impact of Imaging Geometry on 3D Geopositioning Accuracy of Stereo Ikonos Imagery, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(9): 1119-1125.

Martínez-Casasnovas, J.A., Concepción Ramos, M., Vallés, D., 2009. Análisis de la relación entre las propiedades del suelo, el índice de vigor del cultivo y el rendimiento

en un viñedo de la D.O. Costers del Segre (Lleida). XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección, Calatayud.

Mayunga, S. D., Coleman, D. J., Zang, Y., 2007. A semi-automated approach for extracting buildings from QuickBird imagery applied to informal settlement mapping. *International Journal of Remote Sensing*, 28(10): 2343-2357

Meguro Y., and C.S Fraser, 2010. Georeferencing accuracy of GeoEye-1 stereo imagery: Experiences in a Japanese test field, *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Volume XXXVIII, Part 8, ISPRS Commission VIII, pp. 1069-1072.

Metodología y resultados, XI Congreso Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, 20–23 September, Murcia, Spain, pp. 301–312.

Nichol, J., Lee, C.M., 2005. Urban vegetation monitoring in Hong Kong using high resolution multispectral images. *International Journal of Remote*, 26(5): 903-918.

Noguchi, M., Fraser, C.S., Nakamura, T., Shimono, T., and Oki, S., 2004. Accuracy assesment of QuickBird stereo imagery. *The Photogrammetric Record*, 19(106):128–137.

Pecci, J., F. Cano, y G. Maza, 2004. Generación de una ortoimagen QuickBird del año 2003 de la comunidad autónoma de la región de Murcia: Weber, C., Ranchin, T., 2003. Extraction of urban features in Strasbourg, France: Comparison of two fusion algorithms for Quickbird MS and Pan data. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on “Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas”.

Ridley, H., Atkinson, P., Aplin, P., Muller, J.P., Dowman, I., 1997. Evaluating the potential of the forthcoming commercial U.S. high-resolution satellite sensor imagery at the Ordnance Survey. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 63(8): 997-1005.

Robertson, B.C., 2003. Rigorous geometric modelling and correction of QuickBird Imagery, *Proceedings of International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 21–25 July, Toulouse, France, pp. 797–802.

Tao, C.V., and Y. Hu, 2001. A comprehensive study of the rational function model for photogrammetric processing, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(12): 1347-1357.

Tao, C.V., Y. Hu, and W. Jiang, 2004. Photogrammetric exploitation of IKONOS imagery for mapping applications, *International Journal of Remote Sensing*, 25(14): 2833-2853.

Toutin, T., 1995. Multi-source data integration with an integrated and unified geometric modelling. *EARSeL Journal Advances in Remote Sensing*, 4(2):118–129.

Toutin, T., 2004b. Comparison of stereo-extracted DTM from different high-resolution sensors: SPOT-5, EROS-A, IKONOS-II, and QuickBird. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(10):2121–2129.

- Toutin, T., 2004a. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods, *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924.
- Toutin, T., 2006. Comparison of 3D Physical and empirical models for generating DSMs from stereo HR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(5): 597-604.
- Toutin, T., and P. Cheng, 2002. QuickBird- A milestone for highresolution mapping. *Earth Observation Magazine*, 11(4):14-18.
- Toutin, T., 2003. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric model, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 69(1):43-51. Toutin, T., 2006. Comparison of 3D Physical and empirical models for generating DSMs from stereo HR images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(5): 597-604.
- Weber, C., Ranchin, T., 2003. Extraction of urban features in Strasbourg, France: Comparison of two fusion algorithms for Quickbird MS and Pan data. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas".
- Wolniewicz, W., 2004. Assessment geometric accuracy of VHR satellite images. *Proceeding of the XX<sup>th</sup> International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B1), 12-23 July 2004, Istanbul, Turkey, unpaginated CD ROM.
- Xiong, Z., and Y. Zhang, 2009. A generic method for RPC refinement using Ground Control information, *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 75(9): 1083-1092.
- Yan, D., Zhao, Z., 2003. Road Detection from Quickbird Fused Image Using HIS Transform and Morphology. 2nd GRSS/ISPRS Joint Workshop on "Data Fusion and Remote Sensing over Urban Areas".