

Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2

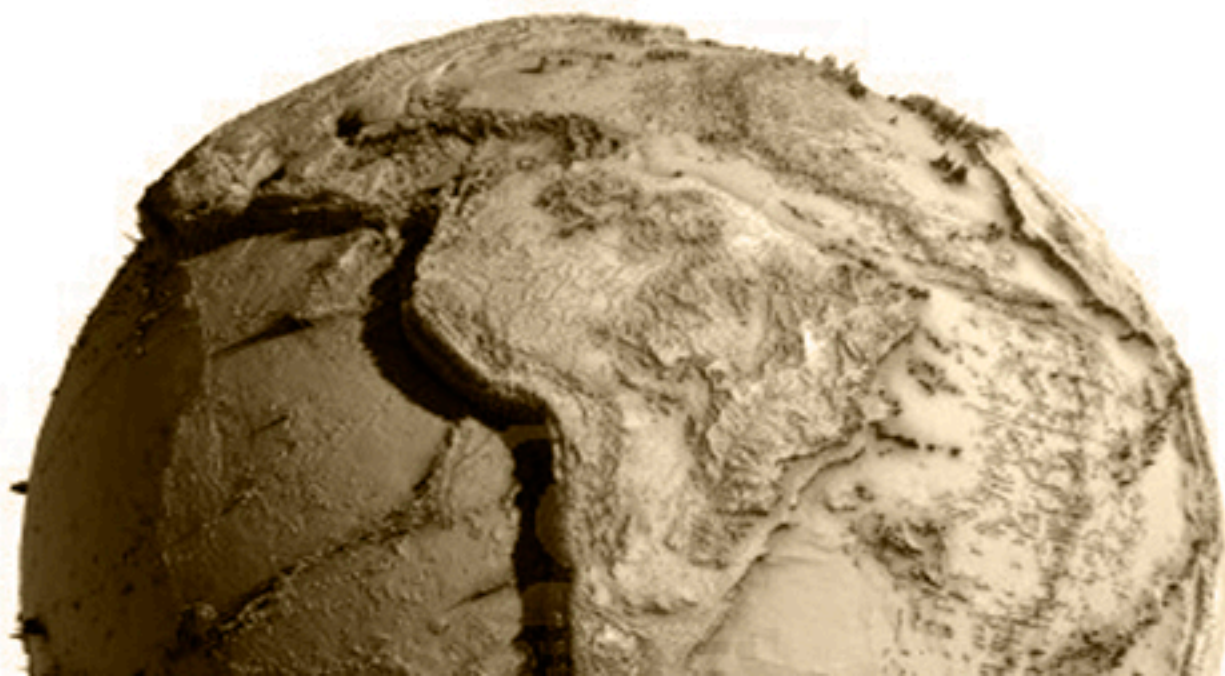
TESIS DOCTORAL

María del Mar Saldaña Díaz

DIRECTORES

Dr. Manuel Ángel Aguilar Torres

Dr. Fernando José Aguilar Torres



TESIS DOCTORAL

Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2.

Memoria presentada por María del Mar Saldaña Díaz para optar al
Grado de Doctor por la Universidad de Almería.

DIRECTORES

Dr. Manuel Ángel Aguilar Torres.

Dr. Fernando José Aguilar Torres.

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA-2013

Departamento de Ingeniería.



TESIS DOCTORAL

Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2.

AUTOR

María del Mar Saldaña Díaz

VºBº Director Tesis

VºBº Director Tesis

Dr. Manuel Ángel Aguilar Torres

Dr. Fernando José Aguilar Torres

UNIVERSIDAD DE ALMERÍA-2013

Departamento de Ingeniería.



Esta Tesis se ha podido llevar a cabo gracias al proyecto subvencionado por el Ministerio de Innovación y Ciencia del Gobierno de España y la Unión Europea (Fondos FEDER) en el marco del Proyecto de Investigación del Plan Nacional, con referencia CTM2010-16573, titulado “Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de los satélites GeoEye-1 y WorldView-2” que le da título a esta tesis.



Agradecer también el apoyo de la Junta de Andalucía a través del Proyecto de Investigación de Excelencia denominado: “Integración y análisis exploratorio de datos geoespaciales multifuente para el seguimiento y modelado de la evolución y vulnerabilidad de áreas costeras. Aplicación a una zona del Levante de Almería”, con referencia RNM-3575.



AGRADECIMIENTOS.

El día que entré a mi primera clase de Geomática no pude imaginar hasta donde me llevaría, y mucho menos que este tiempo pararía tan rápido.

En primer lugar me gustaría agradecer a mis directores de tesis, Manuel Ángel Aguilar y Fernando Aguilar toda su dedicación, disponibilidad y apoyo. Agradecerles todo el trabajo que han realizado para poder llevar a cabo esta Tesis. Su cariño y consejos a lo largo de todo este tiempo en el ámbito personal y laboral, y agradecerles el haber confiado en mí desde el primer día que decidí realizar mi proyecto con ellos.

Me gustaría también agradecer a Ismael Fernández toda su ayuda, que no ha sido poca, desde el primer día que nos conocimos. Apoyando y animándome siempre a seguir con este trabajo. Gracias por tus explicaciones y opiniones personales, que han hecho que vea todo desde un punto de vista diferente.

A mis compañeros de la universidad, con los que he pasado muy buenos momentos. Gracias por vuestros consejos y por vuestra predisposición. Por hacer los ratos de comida y café más entretenidos, por formar parte de mi grupo durante todo este tiempo.

A mis amigos, por intentar hacerme ver en todo momento que todo tiene su recompensa, que siempre hay algo bueno que está por llegar. Gracias por vuestro apoyo.

A mi familia, en especial a mis padres, por su gran esfuerzo, por apoyarme desde el comienzo de mis estudios, por aconsejarme siempre con cariño y respeto, y por confiar en mí más que yo misma.

Por último me gustaría agradecer a Borja esa infinita paciencia y ese cariño incondicional que me ha demostrado a lo largo de este camino. Por tener siempre esas palabras de apoyo en el momento justo y por entenderme en cada momento. Gracias por haber sido mi gran apoyo durante todo este tiempo.

A mis padres.

*Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como una oportunidad
para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber.*

Albert Einstein.

ÍNDICE

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
ÍNDICE DE TABLAS	xvii
CAPÍTULO 1. INTORDUCCIÓN	1
1.1. TELEDETECCIÓN	1
1.2. SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS	4
1.2.1. Resolución espacial.	4
1.2.2. Resolución radiométrica	5
1.2.3. Resolución espectral.	5
1.2.4. Resolución temporal.	6
1.2.5. Estéreo adquisición.	7
1.3. SATÉLITES DE MUY ALTA RESOLUCIÓN	8
1.3.1. GeoEye-1.	11
1.3.2. WorldView-2.	13
1.4. OBTENCIÓN DE DATOS A PARTIR DE IMÁGENES <i>VHR</i>	15
1.5. BIBLIOGRAFÍA	18
CAPÍTULO 2. OBJETIVOS	25
2.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA	25
2.2. OBJETIVOS	26
CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y RADIOMÉTRICAS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN EMPLEADAS	29
3.1. INTRODUCCIÓN	29
3.2. ZONA DE ESTUDIO	31

3.3. IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN.....	32
3.3.1. GE-1.....	32
3.3.2. WV-2.....	34
3.4. CALIDAD RADIOMÉTRICA PAN Y MS. METODOLOGÍA.....	36
3.4.1. Histogramas de <i>DNs</i>	37
3.4.2. Inspección visual.....	37
3.4.3. Evaluación de la calidad de la imagen.....	37
3.5. RESULTADOS DE CALIDAD RADIOMÉTRICA PARA IMÁGENES PAN.....	41
3.5.1. Histogramas de <i>DNs</i> sobre imágenes PAN.....	41
3.5.2. Inspección visual de imágenes PAN.....	43
3.5.3. Evaluación de la calidad de imágenes PAN mediante ratios.....	45
3.6. RESULTADOS DE CALIDAD RADIOMÉTRICA PARA IMÁGENES MS.....	47
3.6.1. Histogramas de <i>DNs</i> sobre imágenes MS (<i>bandas R, G, B y Nir</i>).....	48
3.6.2. Inspección visual de imágenes MS (<i>bandas R, G, B y Nir</i>).....	52
3.6.3. Histogramas de <i>DNs</i> e inspección visual sobre el conjunto de bandas MS2 de WV-2.....	58
3.6.4. Evaluación de la calidad de las imágenes MS.....	61
3.7. CONCLUSIONES.....	64
3.8. BIBLIOGRAFÍA.....	65
CAPÍTULO 4. ESTUDIO DE LA PRECISIÓN GEOMÉTRICA ALCANZABLE EN LA FASE DE ORIENTACIÓN DEL SENSOR A PARTIR DE IMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2	69
4.1. INTRODUCCIÓN.....	69
4.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA.....	72
4.2.1. Zona de estudio.....	72
4.2.2. Imágenes de satélite de alta resolución.....	73
4.2.3. Puntos de control y de comprobación.....	73

4.3. METODOLOGÍA.....	76
4.3.1. Modelos de sensor.	76
4.3.1.1. <i>Funciones Racionales 3D</i>	76
4.3.1.2. <i>Modelos Físicos</i>	80
4.3.2. Precisión geométrica en la orientación de imágenes <i>PAN</i>	80
4.3.2.1. <i>Precisiones alcanzadas sin el soporte de GCPs</i>	80
4.3.2.2. <i>Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes PAN incluyendo el soporte de GCPs</i>	80
4.3.3. Precisión geométrica en la orientación de imágenes <i>MS</i>	82
4.3.3.1. <i>Precisiones alcanzadas sin el soporte de GCPs</i>	82
4.3.3.2. <i>Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes MS incluyendo el soporte de GCPs</i>	82
4.4. RESULTADOS.....	83
4.4.1. Precisión geométrica en la orientación de imágenes <i>PAN</i>	83
4.4.1.1. <i>Precisiones alcanzadas sin soporte de GCPs</i>	83
4.4.1.2. <i>Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes PAN incluyendo el soporte de GCPs</i>	84
4.4.2. Precisión geométrica en la orientación de imágenes <i>MS</i>	92
4.4.2.1. <i>Precisiones alcanzadas sin el soporte de GCPs</i>	92
4.4.2.2. <i>Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes MS incluyendo el soporte de GCPs</i>	93
4.5. CONCLUSIONES.....	96
4.6. BIBLIOGRAFÍA.....	97
CAPÍTULO 5. GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MODELOS DIGITALES DE SUPERFICIES GENERADOS A PARTIR DE ESTÉREO PARES FORMADOS POR IMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2.	105

5.1. INTRODUCCIÓN.....	105
5.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS.....	108
5.2.1. Zona de estudio.....	108
5.2.2. Imágenes de satélite <i>VHR</i>	109
5.2.3. Puntos de control y comprobación. Datos <i>LiDAR</i>	109
5.3. METODOLOGÍA.....	110
5.3.1. Estéreo pares.....	110
5.3.2. Extracción de <i>DSMs</i> a partir de imágenes de satélite <i>VHR</i>	112
5.3.3. Evaluación de la calidad de los <i>DSMs</i>	115
5.4. RESULTADOS.....	117
5.4.1. Precisión de los <i>DSMs</i>	117
5.4.2. Completitud de los <i>DSMs</i>	124
5.4.3. Características Radiométricas.....	127
5.5. CONCLUSIONES.....	129
5.6. BIBLIOGRAFÍA.....	131
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN DE LA CALIDAD GEOMÉTRICA DE ORTOIMÁGENES GENERADAS A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN.....	137
6.1. INTRODUCCIÓN.....	137
6.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA.....	140
6.2.1. Zona de estudio.....	140
6.2.2. Puntos de control y de comprobación.....	140
6.2.3. Modelos digitales de elevaciones.....	140
6.2.3.1. Modelos digitales de elevaciones generados a partir de vuelos fotogramétricos.....	142
6.2.3.2. Modelos digitales de elevaciones a partir de datos <i>LiDAR</i>	143
6.3. METODOLOGÍA.....	145

6.3.1. Estudio de la calidad geométrica.....	145
6.3.2. Evaluación de la precisión en ortoimágenes <i>PAN</i>	145
6.3.3. Evaluación de la precisión en ortoimágenes <i>MS</i>	147
6.4. RESULTADOS.....	147
6.4.1. Evaluación de la precisión en ortoimágenes <i>PAN</i>	147
6.4.2. Precisión geométrica 2D en la orientación de imágenes <i>MS</i>	152
6.5. CONCLUSIONES.....	155
6.6. BIBLIOGRAFÍA.....	156
CAPÍTULO 7. CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN ZONAS URBANAS MEDIANTE TÉCNICAS OBIA A PARTIR DE ORTOIMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2.....	161
7.1. INTRODUCCIÓN.....	161
7.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS.....	164
7.2.1. Zona de estudio.....	164
7.2.2. Ortoimágenes de satélites <i>VHR</i>	165
7.2.3. Modelo digital de superficies normalizado.....	166
7.3. METODOLOGÍA.....	167
7.3.1. Segmentación de la imagen.....	167
7.3.2. Clasificación manual.	169
7.3.3. Áreas de entrenamiento.....	173
7.3.4. Extracción y selección del vector de características.....	175
7.3.5. Clasificación y evaluación de la precisión.	177
7.3.6. Análisis estadístico.	179
7.4. RESULTADOS.....	179
7.4.1. Diferencias entre las imágenes examinadas.....	179
7.4.2. Precisión de la clasificación global.....	180

7.4.2.1. Vectores de características.....	182
7.4.2.2 Porcentaje de entrenamiento.....	183
7.4.3. Edificios.....	184
7.4.4. Sombras.....	185
7.4.5. Vegetación.....	187
7.4.6. Carreteras, Suelo Desnudo y Calles.....	188
7.5. DISCUSIÓN.....	189
7.6. CONCLUSIONES.....	191
7.7. BIBLIOGRAFÍA.....	193
CAPÍTULO 8. CONCLUSIONES GENERALES.....	201
MERITOS RELACIONADOS CON EL TEMA DE LA TESIS.....	209
GLOSARIO.....	213

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. I.1. Componentes de un sistema de Teledetección.	2
Fig. I.2. Visualización a diferentes escalas de una misma imagen <i>Pancromática</i>	4
Fig. I.3. Bandas espectrales del espectro electromagnético.	6
Fig. I.4. Adquisición de estéreo pares en modo <i>across-track</i> (a) y <i>along-track</i> (b). ...	8
Fig. I 5. Adquisición de imágenes de satélite en sentido directo (A) e inverso (B). 12	
Fig. I.6. Comparación entre las longitudes de onda de las bandas almacenadas por los satélites QuickBird (similares a las captadas por IKONOS o GE-1) y WV-2, tanto en <i>PAN</i> como en <i>MS</i>	15
Fig. III.1. Localización de la zona de estudio.....	32
Fig. III.2. Histogramas de los <i>DNs</i> de las seis imágenes <i>PAN</i> de satélites <i>VHR</i> para toda el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV22, (e) GE13 y (f) WV23.....	42
Fig. III.3. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m): (a) Imagen <i>PAN</i> GE11, (b) Imagen <i>PAN</i> WV21, (c) Imagen <i>PAN</i> GE12, (d) Imagen <i>PAN</i> WV22, (e) Imagen <i>PAN</i> GE13 y (f) Imagen <i>PAN</i> WV23.	44
Fig. III.4. Imagen tomada de Agugiaro <i>et al.</i> (2012), donde se representan las imágenes de una misma zona de edificios de los satélites WV-2 (a y b) y GE-1 (c y d)..	45
Fig. III.5. Comportamiento del ratio <i>Br</i> con el ángulo off-nadir y el tipo de suelo para las imágenes PAN de GE-1..	47
Fig. III.6. Comportamiento del ratio <i>Br</i> con el ángulo off-nadir y el tipo de suelo para las imágenes PAN de WV-2.....	47
Fig. III.7. Histogramas de los <i>DNs</i> de la banda <i>Red</i> de las cinco imágenes <i>MS</i> de satélites <i>VHR</i> sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13..	49
Fig. III.8. Histogramas de los <i>DNs</i> de la banda <i>Green</i> de las cinco imágenes <i>MS</i> de satélites <i>VHR</i> sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13..	50
Fig. III.9. Histogramas de los <i>DNs</i> de la banda <i>Blue</i> de las cinco imágenes <i>MS</i> de satélites <i>VHR</i> sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13..	51

Fig. III.10. Histogramas de los <i>DNs</i> de la banda <i>NIR</i> (GE-1) y <i>NIR1</i> (WV-2) de las cinco imágenes <i>MS</i> de satélites <i>VHR</i> sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.	52
Fig. III.11. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) en las bandas <i>RGB</i> : (a) Imagen <i>MS</i> GE11, (b) Imagen <i>MS</i> WV21, (c) Imagen <i>MS</i> GE12, (d) Imagen <i>MS</i> WV23, (e) Imagen <i>MS</i> GE13.....	53
Fig. III.12. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda <i>Red</i> de las imágenes <i>MS</i> : (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.....	54
Fig. III.13. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda <i>Green</i> de las imágenes <i>MS</i> : (a) GE11, (b) <i>MS</i> WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13... ..	55
Fig. III.14. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda <i>Blue</i> de las imágenes <i>MS</i> : (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.	56
Fig. III.15. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda <i>NIR</i> (GE-1) y <i>NIR1</i> (WV-2) de imágenes <i>MS</i> : (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.	57
Fig. III.16. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para las bandas <i>Coastal</i> y <i>Yellow</i> de las imágenes <i>MS</i> : (a) <i>Coastal</i> Imagen <i>MS</i> WV21, (b) <i>Coastal</i> Imagen <i>MS</i> WV23, (c) <i>Yellow</i> Imagen <i>MS</i> WV21, (d) <i>Yellow</i> Imagen <i>MS</i> WV23.	59
Fig. III.17. Inspección visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para las bandas <i>Red Edge</i> y <i>NIR2</i> de las imágenes <i>MS</i> : (a) <i>Red Edge</i> Imagen <i>MS</i> WV21, (b) <i>Red Edge</i> Imagen <i>MS</i> WV23, (c) <i>NIR2</i> Imagen <i>MS</i> WV21, (d) <i>NIR2</i> Imagen <i>MS</i> WV23	60
Fig. III.18. Comportamiento del ratio de borrosidad (<i>Br</i>) en función del ángulo off-nadir y el tipo de uso del suelo para las bandas <i>MS</i> de GE-1 y <i>MS1</i> de WV-2.....	62
Fig. III.19. Comportamiento del ratio de borrosidad (<i>Br</i>) en función del ángulo off-nadir y el tipo de uso del suelo para las bandas <i>MS2</i> de WV-2.....	63
Fig. IV.1. <i>GCPs</i> (cruces) e <i>ICPs</i> (círculos) sobre la zona de trabajo. Izquierda: imagen <i>PAN</i> con 75 <i>ICPs</i> y 44 <i>GCPs</i> . Derecha: imagen <i>MS</i> con 50 <i>ICPs</i> y 42 <i>GCPs</i>	75
Fig. IV.2. Visualización de un mismo punto identificado en una imagen de GE-1 <i>PAN</i> 0.5 m <i>GSD</i> , a la izquierda, y sobre la imagen <i>MS</i> 2 m <i>GSD</i> a la derecha	76
Fig. IV.3. Relación entre el <i>GSD</i> (dependiente del ángulo off-nadir) y el <i>RMSE_{2D}</i> obtenido en la fase de orientación del sensor mediante el modelo <i>RPC0</i> para las imágenes GE-1 Geo y WV-2 ORS2A.	90

Fig. V.1. Posición de las imágenes de satélite en relación al azimut y ángulo de elevación del sensor (complementario del ángulo off-nadir) en el momento de la toma de la imagen.	109
Fig. V.2. Áreas para evaluar la calidad de los <i>DSMs</i> . Las zonas urbanas están delineadas en color blanco, las áreas sin cambios aparecen coloreadas en negro, y el área de trabajo está delimitada con línea negra discontinua.....	116
Fig. V.3. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) Imagen <i>PAN</i> original GE12, (b) Imagen <i>PAN</i> original WV23, (c) <i>DSM LiDAR</i> , (d) <i>DSM</i> del estéreo par ID 1, (e) <i>DSM</i> del estéreo par ID 2, y (f) residuos verticales obtenidos como diferencia entre el <i>DSM</i> del estéreo par de WV-2 (ID 2) y el <i>DSM LiDAR</i>	120
Fig. V.4. Relación ente las diferencias estadísticas en <i>z</i> , tras eliminar los valores atípicos, y el ángulo de convergencia de cada estéreo par. Todos los estadísticos presentados han sido calculados sobre zonas sin cambios. Las diferencias en <i>z</i> se refieren a la diferencia de altura entre cada <i>DSM</i> extraído de los estéreo pares y los datos de elevación del <i>LiDAR</i> . Los datos de los estéreo pares puros están señalados por un círculo discontinuo.	122
Fig. V.5. Relación entre las diferencias estadísticas encontradas en <i>z</i> tras eliminar los valores atípicos y el ángulo de convergencia de cada estéreo par. Los estadísticos presentados corresponden con la zona de Villaricos o toda el área de trabajo. Las diferencias de <i>z</i> se refieren a la diferencia de altura entre cada <i>DSM</i> obtenido por las imágenes de satélite y los datos <i>LiDAR</i> . Los estéreo pares puros están señalados con un círculo negro discontinuo. Los cinco estéreo pares que usan la imagen GE11 son representados con figuras sin relleno.....	123
Fig. V.6. Completitud de cada <i>DSM</i> extraído para estéreo pares de satélites <i>VHR</i> sobre todo el área de trabajo en relación con: (a) diferencia temporal entre la adquisición de las imágenes y (b) ángulo de convergencia.....	125
Fig. V.7. Completitud sobre un área de estudio limitada (160 m x 160 m): (a) imagen original <i>PAN</i> WV21, (b) <i>score channel DSM</i> ID 2 (ver Tabla V.1), (d) <i>score channel DSM</i> ID 13 (ver Tabla V.1).	125
Fig. V.8. Completitud para cada <i>DSM</i> derivado de estéreo pares sobre las zonas sin cambios y zonas urbanas dependiendo del ángulo de convergencia. Líneas de tendencia lineal. Los estéreo pares puros se han indicado con una elipse discontinua.....	126
Fig. V.9. Relación entre la completitud sobre todo el área de trabajo y el valor medio de <i>Br</i> (ratio de borrosidad) para cada estéreo par.	128
Fig. VI.1. Representación de la captura de imágenes de la superficie del terreno y efecto de desplazamiento debido al relieve.....	141

Fig. VI.2. Representación de datos altimétricos de una misma zona de los *DEMs* empleados para la ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR*: a) *DEM* obtenido a partir del vuelo fotogramétrico de la Junta de Andalucía; b) *DEM* obtenido a partir del vuelo *LiDAR*. 144

Fig. VI.3. Relación entre el *GSD* real (dependiente del ángulo off-nadir) y el valor medio del *RMSE_{2D}* obtenido en la fase de ortorrectificación para cada *DEM* e imagen *PAN* analizada. 151

Fig. VI.4. Relación entre el *GSD* real y el *RMSE_{2D}* obtenido en la fase de ortorrectificación para cada *DEM* e imagen *MS* original..... 155

Fig. VII.1. Localización de la zona de trabajo. Población de Villaricos (Almería). . 165

Fig. VII.2. Información detallada (rectángulo de 110 m por 135 m) obtenida de la zona de trabajo: a) ortoimagen *pan-sharpened* de GE-1, b) ortoimagen *pan-sharpened* de WV-2 y c) *nDSM*. 166

Fig. VII.3. Segmentación multi-resolución (110 m por 135 m): a) GE-1 y b) WV-2 169

Fig. VII.4. Fila superior: ortoimagen *pan-sharpened* de GE-1 (izquierda) y clasificación manual de la segmentación de GE-1 (derecha). Fila inferior: ortoimagen *pan-sharpened* de WV-2 (izquierda) y clasificación manual de la segmentación de WV-2 (derecha). 172

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Clases de imágenes según la resolución espacial (<i>f. Poli (2005)</i>).....	5
Tabla I.2. Satélites de muy alta resolución existentes en la actualidad y lanzamientos previstos en los próximos años.....	9
Tabla III.1. Características de las imágenes <i>PAN</i> y <i>MS</i> de GE-1 adquiridas.....	34
Tabla III.2. Características de las imágenes <i>PAN</i> y <i>MS</i> de WV-2 adquiridas.....	36
Tabla III.3. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes <i>PAN</i> originales de GE-1 y WV-2.....	42
Tabla III.4. Ratios de borrosidad (<i>Br</i>) y ruido (<i>Nr</i>) para cada una de las imágenes <i>PAN</i> de GE-1 y WV-2.....	46
Tabla III.5. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes <i>MS</i> de GE-1 y WV-2 en el conjunto de bandas <i>MS1</i>	48
Tabla III.6. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes <i>MS</i> originales de WV-2 correspondientes al conjunto de bandas <i>MS2</i>	58
Tabla IV.1. Precisiones en 75 <i>ICPs</i> presentadas como Error Medio y Desviación Estándar (σ). Imágenes <i>PAN</i> individuales de GE-1 y WV-2 sin el soporte de <i>GCPs</i>	84
Tabla IV.2. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ calculados en 75 <i>ICPs</i> en imágenes <i>PAN</i> de GE-1 y WV-2 en función del número de <i>GCPs</i> (No. <i>GCPs</i>). Para cada modelo de sensor, valores a largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$. Para el modelo de sensor <i>RPC0</i> , los valores en negrita muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a su valor medio para <i>RPC1</i> , mientras que los valores con la anotación (*) denotan diferencias significativa a un nivel de significación $p < 0.10$	85
Tabla IV.3. Comparación de los valores medios de $RMSE_{2D}$ calculados en 75 <i>ICPs</i> para las imágenes de WV-2 tomadas el 18 de Agosto de 2011, tanto en formato ORS2A (WV22 y WV23) como en formato Básico (WV24 y WV25). (N.S.S: diferencias no significativas al nivel $p < 0.05$).....	87

Tabla IV.4. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ para imágenes PAN de GE-1 Geo y WV-2 ORS2A en función del ángulo off-nadir. Para cada modelo de sensor y tipo de imagen, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$. Los valores del modelo de sensor *RPC0* presentados en negrita muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a su valor medio para *RPC1*.89

Tabla IV.5. Precisiones en 50 *ICPs* presentadas como Error Medio y Desviación Estándar (σ). Imágenes multiespectrales simples de GE-1 y WV-2 sin el soporte de *GCPs*.92

Tabla IV.6. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ calculados en 50 *ICPs* sobre imágenes MS de GE-1 y WV-2 en función del número de *GCPs* (No. *GCPs*). Para cada modelo de sensor, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas al nivel $p < 0.05$94

Tabla IV.7. Comparación de medias para valores de $RMSE_{2D}$ (*RPC0* y soporte de siete *GCPs*) calculados en 50 *ICPs* para imágenes MS GE-1 Geo y WV-2 (ORS2A y Básicas) en función del ángulo off-nadir. Para cada grupo de imágenes, valores seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas al nivel $p < 0.05$95

Tabla V.1. Características geométricas de los estéreo pares conformados a partir de las seis imágenes PAN empleadas en este estudio. 111

Tabla V.2. Resultados de la orientación del sensor realizada para los estéreo pares de GE-1 y WV-2 (ID 1 e ID 2), y resultados estadísticos (media y desviación estándar) obtenidos a partir de la comparación con los datos *LiDAR* en las zonas sin cambios. 118

Tabla VI.1. Separación de medias del $RMSE_{2D}$ para el One-way ANOVA para cada factor. $RMSE_{2D}$ estimado sobre 48 *ICPs* en ortoimágenes PAN de GE-1 Geo y WV-2 ORS2A, usando *RPC0* y 7 *GCPs*. Los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$ 148

Tabla VI.2. Valores medios y desviaciones estándar del $RMSE_{2D}$ (cinco repeticiones) estimados sobre 48 *ICPs* en ortoimágenes PAN GE-1 Geo y WV-2 ORS2A y usando el modelo de orientación de sensor *RPC0* con soporte de 7 *GCPs*. Para cada *DEM* e imagen analizada, los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indica diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$ 150

Tabla VI.3. Separación de medias del $RMSE_{2D}$ para los factores principales (One-way ANOVA). $RMSE_{2D}$ estimado sobre 32 *ICPs* en ortoimágenes MS de GE-1 Geo, WV-2 ORS2A y WV-2 Básicas, usando *RPC0* y 7 *GCPs*. Valores en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$ 153

Tabla VI.4. Valores medios de $RMSE_{2D}$ estimados sobre 32 <i>ICPs</i> (para las cinco repeticiones) en ortoimágenes generadas a partir de imágenes <i>MS</i> de GE-1 y WV-2 usando <i>RPCO</i> con soporte de 7 <i>GCPs</i> . Para cada <i>DEM</i> e imagen analizada, los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$	154
Tabla VII.1. <i>IOs</i> de la segmentación de GE-1 clasificados manualmente de acuerdo con las clases consideradas.....	171
Tabla VII.2. <i>IOs</i> de la segmentación de WV-2 clasificados manualmente de acuerdo con las clases consideradas.....	171
Tabla VII.3. Número de <i>IOs</i> usados para el entrenamiento del clasificador <i>NN</i> en cada imagen después de la segmentación y la clasificación manual con las clases consideradas.	174
Tabla VII.4. Características (<i>Features</i>) de cada objeto imagen (<i>IO</i>) usadas en la fase de clasificación. <i>NIR1</i> = Infrarrojo cercano 1; <i>NIR2</i> = Infrarrojo cercano 2	176
Tabla VII.5. Comparación de los valores medios ANOVA de Precisión Global (<i>OA</i>) y Kappa (<i>KIA</i>) para los tres factores principales evaluados. Para cada factor estudiado, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$	181
Tabla VII.6. Comparación de los valores medios de la precisión global (<i>OA</i>) y Kappa (<i>KIA</i>) para los set de <i>features</i> o estrategias y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indican diferencias significativas a un nivel de significación de $p < 0.05$	182
Tabla VII.7. Comparación de los valores medios de la precisión global (<i>OA</i>) y Kappa (<i>KIA</i>) en función del porcentaje de muestras de entrenamiento y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$	184
Tabla VII.8. Comparación de los valores medios para la clase <i>Edificios</i> de <i>Producer's Accuracy (PA)</i> , <i>User's Accuracy (UA)</i> y <i>Kappa (KIA_{Edificios})</i> para cada set de <i>features</i> y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$	185
Tabla VII.9. Comparación de los valores medios para la clase <i>Sombras</i> de <i>Producer's Accuracy (PA)</i> , <i>User's Accuracy (UA)</i> y <i>Kappa (KIA_{Sombras})</i> para cada set de <i>features</i> y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$	186

Tabla VII.10. Comparación de los valores medios para la clase *Vegetación* de *Producer's Accuracy (PA)*, *User's Accuracy (UA)* y *Kappa (KIA_{Vegetación})* para cada set de *features* y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$ 187

Tabla VII.11. Comparación de los valores medios del *Kappa* por clase para las clases *Carreteras*, *Suelo Desnudo* y *Calles* en función del vector de características y sensor utilizados..... 189

CAPÍTULO 1.

INTRODUCCIÓN.

1.1. TELEDETECCIÓN.

El termino teledetección es una traducción latina del inglés *remote sensing*, utilizándose a partir de 1960 para describir las observaciones de un objeto efectuadas sin mediar contacto físico con él. En este sentido, dicho término no solo engloba los procesos que nos permiten obtener imágenes, sino también su posterior tratamiento, en el contexto de una determinada aplicación. Lillesand *et al.*, (2008) definieron la teledetección como la ciencia y el arte de obtener información de utilidad acerca de objetos, áreas o fenómenos, a través del análisis de los datos obtenidos por un dispositivo que no se encuentra en contacto directo con el objeto, área o fenómeno bajo investigación.

Con carácter más restrictivo, el término teledetección se reserva a las técnicas electromagnéticas de adquisición de información en las zonas del espectro electromagnético comprendidas entre las ondas de radio de baja frecuencia y los rayos X, gamma e incluso cósmicos.

En un esquema general de los procesos que engloba la teledetección (Fig. I.1), los elementos que forman parte del proceso de adquisición de datos son: (i) las fuentes de energía, que supone la emisión de radiación electromagnética que detecta el sensor desde una fuente, (ii) interacción de esta energía con la superficie de la tierra, formada por diversas masas de vegetación, (iii) sistema sensor, compuesto por sensor y plataformas, y (iv) resultados de los datos generados por el sensor en diferentes formatos.

El proceso de análisis examina los datos usando diferentes métodos de visión e interpretación para analizar los resultados proporcionados en diferentes formatos. En dicho proceso se pueden emplear datos de referencia sobre los recursos que se estudian en el propio análisis. Esta información adicional suele ser

elaborada de tal forma que se pueda unir con otras “capas” de información en un sistema de información geográfica (SIG).

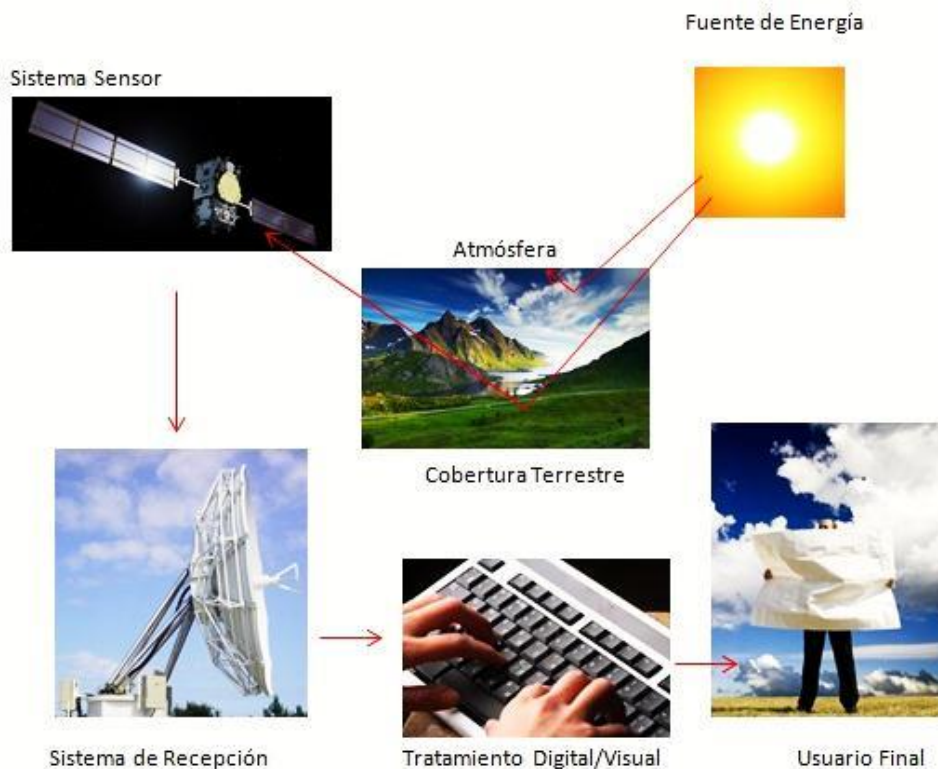


Fig. I.1. Componentes de un sistema de Teledetección.

La teledetección es una técnica dependiente del desarrollo tecnológico existente en cada momento. En las últimas décadas la evolución de esta técnica ha sido asombrosa, ya que la información disponible ha progresado en cantidad, variedad y calidad.

Desde 1859, donde surgieron las primeras experiencias de teledetección a bordo de un globo, la teledetección ha intentado mejorar la calidad de sus productos. Fue en 1909 cuando Wilbur Wright adquirió la primera fotografía aérea, abriendo paso a las observaciones realizadas desde plataformas remotas (Chuvieco, 1990). Las innovaciones realizadas sobre las primeras fotografías aéreas, que en un principio fueron creadas para usos militares, se aplicaron

posteriormente para usos civiles, desarrollándose las primeras aplicaciones de esta exploración aérea para el conocimiento y control de los recursos naturales.

A finales de los años 50 se lanzó el satélite soviético *Sputnik*, al que le siguen una gran serie de misiones civiles y militares. En 1960, la NASA lanzó el primer satélite de la serie TIROS, pionero en observaciones meteorológicas.

Debido a los grandes resultados que proporcionaron las primeras imágenes espaciales, a finales de los años 60 se diseñó el primer proyecto dedicado exclusivamente a la observación de los recursos naturales. Como resultado, en 1972 se puso en órbita el primer satélite de la serie *ERTS (Earth Resource Technology Satellite)*. Este grupo de satélites, denominado *LandSat* a partir del segundo lanzamiento, resultó ser el proyecto de mayor rendimiento hasta el momento, 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.

Unos años más tarde, se ponen en órbita dos satélites de la familia SPOT (*Système Pour l'Observation de la Terre*), uno en 1986 (SPOT 1) y otro en 1990 (SPOT 2), 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, pudiéndose observar 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 capacidad para la 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 *SIG*. Pero hasta entonces, las precisiones que tenían las imágenes de satélite tratadas mediante 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 a partir de satélites, surgen los satélites comerciales de muy alta resolución (*Very High Resolution, VHR*).

1.2. SISTEMAS DE ADQUISICION DE DATOS.

Los sistemas de adquisición de imágenes remotas constan de un sistema sensor y una plataforma que lo sustente. Es importante tener en cuenta que la resolución del sistema sensor, definida como la capacidad que posee dicho sensor para discriminar información de detalle en un objeto detectado (Pinilla, 1995), juega un papel importante en las características que definen dicha imagen.

Cuando se utilizan sensores remotos a bordo de satélites aparecen diferentes conceptos de resolución, que son una extensión del concepto de resolución del sistema sensor, conocidos como resolución espacial o geométrica, resolución radiométrica, resolución espectral y resolución temporal. Las posibles aplicaciones de dichos productos adquiridos de satélites están estrictamente ligadas a los diferentes valores de resoluciones de las imágenes.

1.2.1. Resolución espacial.

La resolución espacial o geométrica es la mínima área de terreno observada por un instrumento, en este caso un satélite, a una determinada altura y en un determinado momento. Esta resolución es medida como el tamaño de un píxel, también conocido como *GSD* (*Ground Sample Distance*) (Fig. I.2). La resolución espacial de las imágenes de satélite puede ser clasificada, según Poli (2005), de acuerdo con la Tabla I.2.



Fig. I.2. Visualización a diferentes escalas de una misma imagen *Pancromática*.

Tabla I.1. Clases de imágenes según la resolución espacial (f. Poli (2005)).

Resolución Espacial (m)	Clases
<1	muy alta
1-5	alta
5-20	media
20-50	baja
>50	muy baja

1.2.2. Resolución radiométrica

La resolución radiométrica se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND). Cuanto mayor sea esta precisión, mejor podrá interpretarse la imagen.

La resolución radiométrica es expresada por el número de bits usados para cuantificar un píxel: para cada bit se registra un exponente en base dos ($1 \text{ bit} = 2^1$). El nivel digital que puede adquirir un píxel en cada imagen dependerá del número de bits usados: para un sensor de 8 bits, los NDs alcanzables serán $2^8=256$, por lo tanto podrán adquirir de 0 a 255 DNs .

1.2.3. Resolución espectral.

La resolución espectral de un sensor viene determinada por el número y anchura de bandas que puede captar dicho sensor (Fig. I.3).

Normalmente los satélites adquieren las imágenes en diferentes modos:

- (i) Pancromático (PAN): el sensor es visible a todas las longitudes de ondas del espectro visible y del infrarrojo cercano, siendo el producto final una imagen en tonos de grises.
- (ii) Multiespectral (MS): el sensor puede distinguir diferentes bandas espectrales en el espectro visible y en el infrarrojo cercano, creándose una imagen individual para cada intervalo de longitudes de onda.

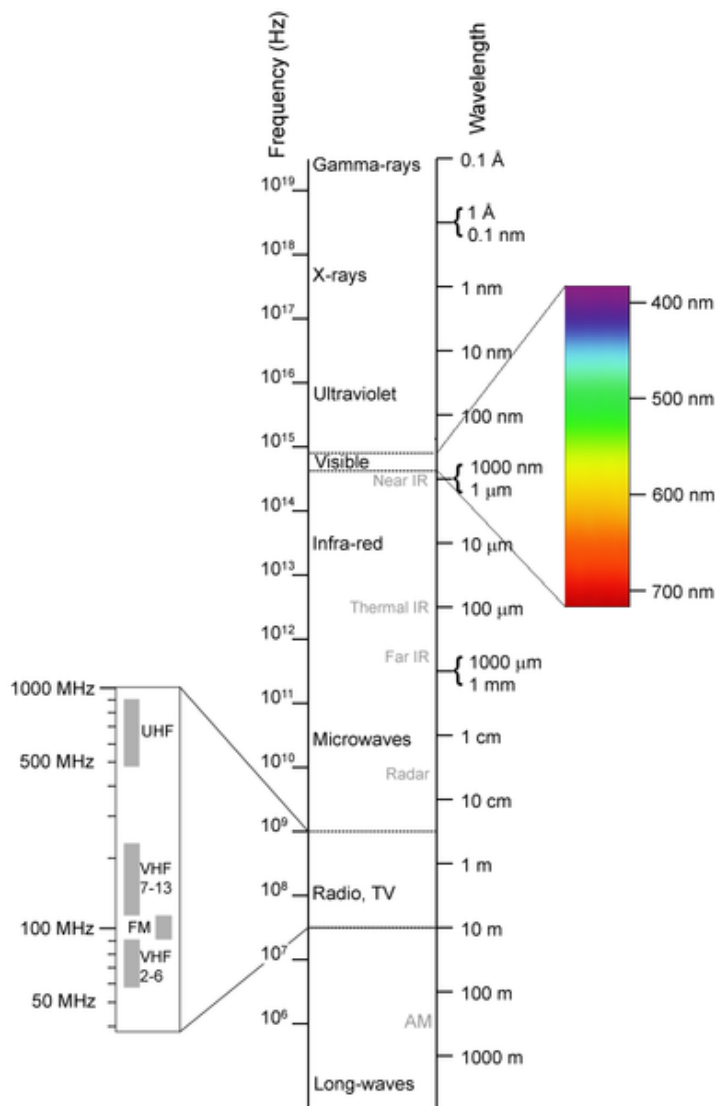


Fig. I.3. Bandas espectrales del espectro electromagnético.

1.2.4. Resolución temporal.

La resolución temporal, también llamada periodo de revisita, hace referencia a la diferencia de tiempo que existe entre las sucesivas adquisiciones de imágenes de una misma área. Para un satélite dependerá de la inclinación de la órbita y de la latitud del área.

De hecho, la cobertura global y periódica de la superficie terrestre que presentan los satélites nos permiten obtener imágenes repetitivas de la mayor

parte de la Tierra, incluso de lugares inaccesibles por otras técnicas de observación. La posibilidad de captar imágenes de una misma zona de la superficie terrestre en diferentes periodos de tiempo o épocas del año es una de las características más importantes de los satélites de teledetección. Las características espectrales de una superficie terrestre pueden cambiar a lo largo del tiempo. Estos cambios pueden ser detectados con la adquisición y comparación de imágenes multitemporales. Diversos autores han empleado estas imágenes para analizar cambios en zonas concretas con un propósito determinado (Lu *et al.*, 2004; Walter, 2004; Zhou *et al.*, 2008).

Cada sistema de teledetección ofrece unas características particulares en cuanto a resolución temporal que depende de los fines para los que se diseñan. En general, La resolución temporal de un sensor depende principalmente de tres factores: capacidad de reorientación del sensor a ambos lados de la línea de paso del satélite, del ancho de barrido y de la latitud, ya que en el caso de órbitas cuasi polares, a mayor latitud, menor periodo de revisita.

A lo largo de la evolución de la teledetección, estas resoluciones temporales han ido mejorando notablemente, consiguiendo así que los productos obtenidos sean cada vez de mayor calidad y utilidad para trabajos relacionados con el seguimiento o *monitoring* de diversos procesos.

1.2.5. Estéreo adquisición.

La adquisición de imágenes que forman estéreo pares de satélite pueden realizarse mediante dos métodos diferentes: uniendo dos imágenes con solape tomadas en dos órbitas diferentes (*across-track*) o usando dos imágenes adquiridas a lo largo de la misma órbita (*along-track*).

En el modo *across-track* las dos imágenes son adquiridas en dos órbitas diferentes (Fig. 1.4.a). En este modo de adquisición cabe destacar que el intervalo de tiempo entre la adquisición de dos imágenes puede ser de días, por lo que podemos encontrar diferencias en la cobertura terrestre debido a eventos naturales o acciones humanas. Además es común encontrar diferencias radiométricas entre ambas tomas que dificultan la correcta aplicación de algoritmos de extracción automática de *DEMs*.

En el modo *along-track* las dos imágenes son adquiridas en la misma órbita (Fig. I.4.b), con una diferencia de tiempo de apenas unos segundos. Actualmente se ha impuesto la adquisición de estéreo pares en modo *along-track* ya que el corto tiempo entre la adquisición de las imágenes que forman el estéreo par reduce las variaciones radiométricas entre las imágenes. Este hecho puede llegar a tener gran importancia, dependiendo del uso que posteriormente se le dé a estas imágenes.

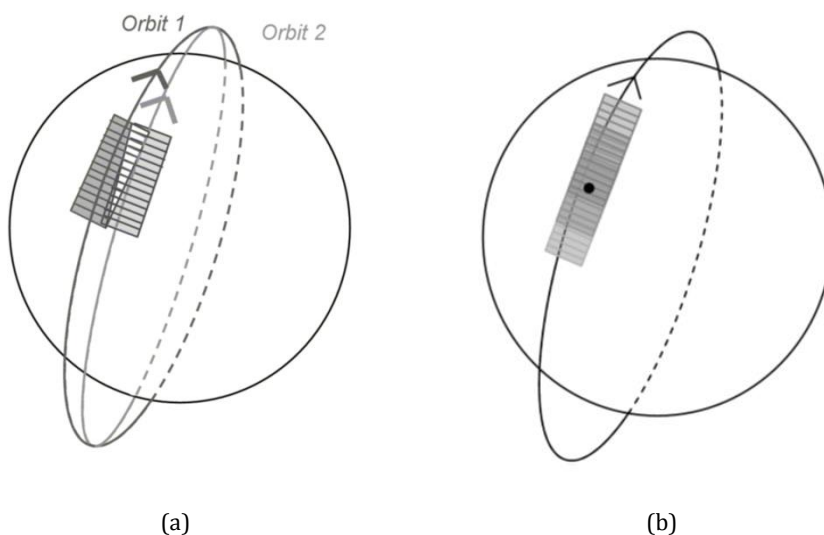


Fig. I.4. Adquisición de estéreo pares en modo *across-track* (a) y *along-track* (b).

1.3. SATÉLITES DE MUY ALTA RESOLUCIÓN.

Actualmente existen orbitando sobre la tierra y recogiendo imágenes de su superficie doce satélites comerciales de muy alta resolución. Los satélites *VHR* se caracterizan por tener una gran resolución, tanto geométrica, con un tamaño de píxel en la banda *PAN* de 1 m e incluso inferior, como radiométrica (Tabla I.2).

IKONOS, perteneciente en un principio a la compañía *SpaceImage* (posteriormente absorbida por *GeoEye*, USA), fue el primero de este nuevo tipo de satélites comerciales *VHR*. Fue lanzado en 1999 y capta imágenes terrestres tanto en modo *PAN*, con 0.82 m *GSD* (remuestreadas a 1 m) de tamaño de píxel, como *MS*, con un tamaño de píxel de 3.28 m *GSD* (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 en el nadir de 0.61 m y 2.44 m *GSD* en *PAN* y *MS* (R, G, B e NIR) respectivamente, lo que le ha otorgado, hasta hace poco tiempo, el honor de ser el satélite comercial con la mayor resolución espacial.

Tabla I.2. Satélites de muy alta resolución existentes en la actualidad y lanzamientos previstos en los próximos años.

Satélite	País	Lanzamiento	Resolución <i>PAN</i> (m)	Resolución <i>MS</i> (m)	Tamaño Escena (km)
IKONOS	US	09/24/99	1.0	4	11
QuickBird	US	10/18/01	0.61	2.44	16
EROS B1	Israel	04/25/06	0.7		7
Resurs DK-1	Rusia	06/15/06	1.0	3	28
KOMPSAT-2	Korea	07/28/06	1.0	4	15
IRS Cartosat 2	India	01/10/07	0.8		10
WorldView-1	US	09/18/07	0.5		16
GeoEye-1	US	06/09/08	0.41*	1.65*	15
WorldView-2	US	08/10/09	0.46*	1.84*	16
Pleiades-1	Francia	16/12/11	0.7	2.8	20
Pleiades-2	Francia	02/12/12	0.7	2.8	20
KOMSAT-3	Korea	17/05/12	0.7	3.2	20
GeoEye-2	US	Previsto 2013	0.34*	1.36*	14.5
WorldView-3	US	Previsto 2014	0.31*	1.24*	16

**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.*

Desde el lanzamiento de los dos primeros satélites *VHR*, 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, 2002a; Kay *et al.*, 2003; Chmiel *et al.*, 2004; Pecci *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2006; Aguilar *et al.*, 2007a). De hecho, IKONOS y QuickBird ofrecen la posibilidad de generar, de forma rápida y precisa, ortoimágenes capaces de competir en resolución y calidad con las obtenidas 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.*, 2008). 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 resolución espacial de alrededor de 0.50 m GSD.

Además, las imágenes de satélites VHR han sido utilizadas para numerosas aplicaciones como son: (i) la detección de edificios (Fraser *et al.*, 2002b; Weber y Ranchin, 2003; Lee *et al.*, 2003; Kim *et al.*, 2006; Mayunga *et al.*, 2007; Gamba *et al.*, 2007), (ii) mapeado automático de carreteras (Yan y Zhao, 2003; Jin y Davis, 2005), (iii) clasificación de 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).

Las dos compañías punteras en la comercialización de imágenes de satélite VHR, *DigitalGlobe* y *GeoEye*, llegaron a un acuerdo de fusión el pasado verano. Actualmente operan bajo el nombre de *DigitalGlobe* y tienen previsto para los años 2013 y 2014 el lanzamiento de dos nuevos satélites que se denominarán *GeoEye-2* y *WorldView-3*. Ambos tendrán una resolución geométrica en PAN y MS impensable hace tan sólo una década. Además *WorldView-3* será el primer satélite VHR “super-espectral”, ya que contará con 8 bandas espectrales (coincidentes con las que ya implementa *WorldView-2* que comentaremos a continuación) con 1.24 m de GSD en el nadir, y otras 8 nuevas bandas en el rango de longitudes de onda que va desde los 1400 nm a los 3000 nm. Estas nuevas bandas en el Infrarrojo de onda corta (*Short Wave Infrared, SWIR*) tendrán una resolución de 3.7 m GSD y permitirán operar en condiciones atmosféricas adversas (niebla, humos, polvo en suspensión,...). Como podemos observar, aunque los satélites VHR llevan con nosotros sólo algo más de una década, los progresos técnicos que han sufrido durante este corto período de tiempo han sido de tal magnitud que están abriendo

un amplio e interesante campo de investigación. A continuación vamos a incidir en las características de los dos satélites *VHR* que hemos testado en esta Tesis.

1.3.1. GeoEye-1.

Lanzado el 6 de septiembre de 2008, GeoEye-1 (en adelante, GE-1) es un satélite comercial estadounidense *VHR* (GeoEye Inc., 2009). Es actualmente el satélite comercial que ofrece una mayor resolución espacial. El principal inversor y cliente del satélite es *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)*, mientras que el segundo inversor y más conocido cliente es *Google*, que tiene acceso directo a las imágenes con las que actualiza su visor cartográfico *Google-Earth*. El satélite orbita a 681 km de altura. Las limitaciones actuales que pone el gobierno de Estados Unidos no permiten la comercialización de imágenes de satélite con resolución superior a 0.50 m/píxel en *PAN* y 2 m *GSD* en *MS*.

El sensor de GE-1 es capaz de adquirir 350,000 km² de imágenes *MS* diarias. La agilidad de captura le permite además registrar, en una sola pasada, hasta una superficie contigua de 300 km por 50 km, a pesar de que el ancho de barrido es de tan solo 15,2 km en la vertical. El ángulo de visión lateral del sensor puede alcanzar hasta 30 grados.

GE-1 ofrece la posibilidad de tomar imágenes con un rango dinámico de 11 bits y con un tamaño de píxel, como máximo, de 0.41 m en *PAN* (con un rango espectral desde 450 hasta 800 nm) y 1.65 m en *MS*, estando compuesta esta última imagen por las clásicas cuatro bandas, *i.e.*, Blue (450 hasta 510 nm), Green (510-580 nm), Red (655-690 nm) y NIR (780-920 nm), que suelen acompañar a la mayoría de los satélites *VHR*. Además, dicha toma de imágenes puede realizarse en sentido de escaneo directo e inverso (Fig. 1.5). Cuando las imágenes se adquieren en sentido directo, el satélite escanea la superficie terrestre en la misma dirección de la órbita seguida por el satélite. Sin embargo, cuando se capturan imágenes en sentido inverso, el satélite captura la superficie que ya ha sobrevolado.

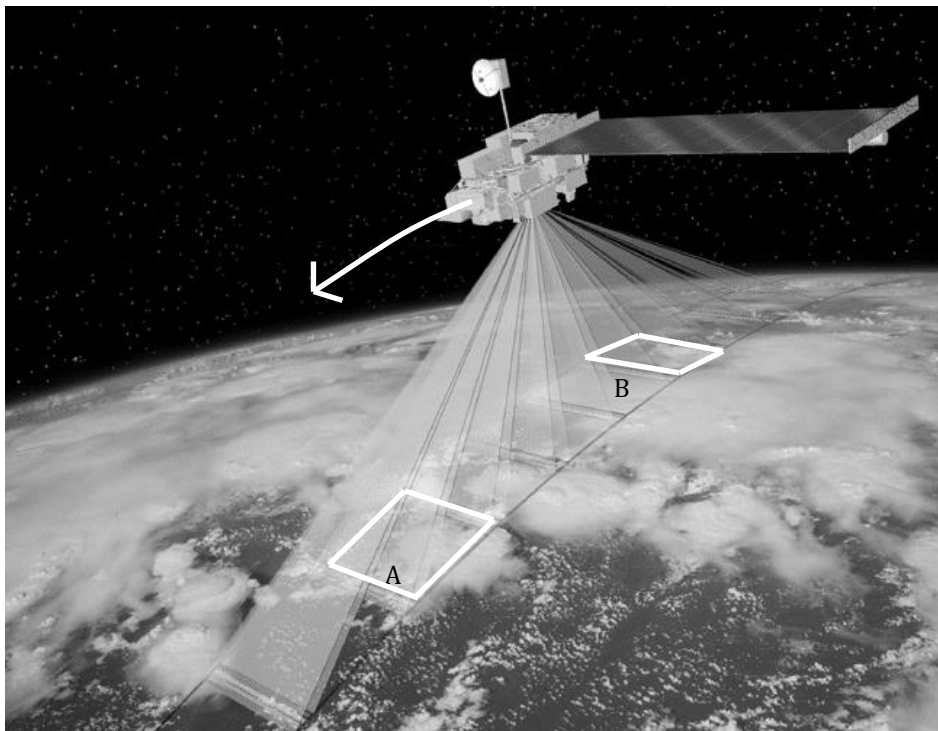


Fig. I 5. Adquisición de imágenes de satélite en sentido directo (A) e inverso (B).

Las imágenes del satélite GE-1 se ofrecen en diferentes formatos:

(i) Geo: Son el formato de imagen de GE-1 con el menor nivel de procesamiento, tanto radiométrico como geométrico. Están proyectadas sobre un sistema cartográfico mediante el uso de un *DEM* de altura constante. Son las imágenes que un operador con capacidades fotogramétricas debería usar para generar productos georreferenciados de la máxima calidad. El precio de una imagen PAN+MS de este producto es de 25 dólares por km².

(ii) GeoProfessional y GeoProfessional Precision: Son productos ortorrectificados con dos niveles diferentes de precisión. Los precios de mercado están en torno a los 35 y los 40 dólares por km².

(iii) GeoStereo: Producto que se compone de dos imágenes con estéreo geometría, indicado para la obtención de modelos digitales de superficies (*Digital Surface Models, DSMs*) y *DEMs*. Su precio ronda los 40 dólares por km².

Una posibilidad interesante de las imágenes de satélite *VHR* es la posibilidad de fusionar la gran resolución geométrica de la banda *PAN* (0.5 m *GSD*) con la riqueza espectral de las bandas *MS* (2 m *GSD*), para conseguir un producto denominado pan-sharpened con 0.5 m *GSD* y que contiene la información espectral de las bandas *MS*.

Los primeros resultados relativos a productos georreferenciados generados a partir de escenas de GE-1 están siendo superiores a los que se habían obtenido hasta ahora usando escenas de otros satélites comerciales de muy alta resolución, como por ejemplo IKONOS o QuickBird.

Croft (2008) comenzó su reportaje dedicado precisamente a GE-1 recordando como un artículo publicado en el magazine estadounidense *Ladies Home Journal* en el año 1900, que hacía predicciones para el próximo siglo, decía: “Habrá máquinas voladoras equipadas con potentes telescopios que tomarán fotografías de la Tierra tan nítidas y grandes como si hubiesen sido tomadas desde el otro lado de la calle”. Esa predicción de hace más de un siglo se cumplió con el lanzamiento de IKONOS en 1999, y casi en el tiempo pronosticado.

1.3.2. WorldView-2.

WorldView-2 (en adelante WV-2) es un satélite comercial norteamericano de muy alta resolución operado por la compañía *DigitalGlobe* (DigitalGlobe, 2010). Su lanzamiento, el 8 de octubre de 2009, marca un hito al ser el primer satélite comercial capaz de captar 8 bandas espectrales con una resolución finalmente remuestreada de 2 m/píxel. El satélite se encuentra a 770 km de altura, una órbita un poco más elevada que la de otros satélites de características similares.

La posibilidad de tomar imágenes con un ángulo de visión de hasta 45° con respecto a la vertical le permite cubrir cualquier punto en una franja de 1,355 km bajo la línea de paso del satélite. Además, durante una sola pasada es capaz de cubrir una superficie contigua de 96 km por 110 km, a pesar de que su ancho de barrido es de solamente 16.4 km.

A través de las imágenes del satélite WV-2, los usuarios pueden crear productos ortorrectificados de gran precisión mediante el uso de datos auxiliares

como *DEMs* o puntos de control (*Ground Control Points, GCPs*) y un software adecuado.

Las imágenes del satélite WV-2 se ofrecen en diferentes formatos:

(i) Basic imagery o imagen básica: Son productos prácticamente sin tratar. Solo cuentan con correcciones radiométricas y no tienen proyección cartográfica. Se comercializan por escenas de 16 km por 16 km en modo PAN y MS (no se ofrecen en modo pan-sharpened). El precio de mercado de una escena básica PAN + MS es de 10,336 dólares.

(ii) Ortho Ready Standard Level-2A (ORS2A): Es el formato equivalente a las imágenes Geo de GE-1. El precio de una imagen PAN+MS de este producto es de 38 dólares por km².

(iv) Stereo Imagery: Producto similar al GeoStereo de GE-1 que se compone de dos imágenes con estéreo geometría, indicado para la obtención de *DSMs* y *DEMs*. Su precio ronda los 47 dólares por km².

Este nuevo satélite, que es capaz de capturar imágenes con un rango dinámico de 11 bits, presenta una gran resolución geométrica en imágenes *PAN* (0.46 m *GSD* en el nadir) y *MS* (1.84 m *GSD* en el nadir), aunque ligeramente inferior a la obtenida por GE-1. La banda *PAN* tiene un rango espectral desde 450 hasta 800 nm. Sin embargo, su principal novedad es que tiene la capacidad de almacenar 8 bandas en la imagen *MS* (Fig. 1.6): *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, mientras que su alta resolución espectral lo capacita para obtener información detallada sobre superficies asfaltadas, profundidad del mar, o incluso sobre el estado de salud de un cultivo. De hecho, la incorporación de estas nuevas cuatro bandas habilita diferentes aplicaciones como: (i) el uso de la banda *Coastal Blue*, gracias a su mayor penetración en el agua, podría estar indicada en estudios batimétricos; (ii) el uso de la banda *Red-Edge* tendría importancia especialmente en medidas de salud de plantas y clasificación de vegetación; (iii) la banda *Yellow* en estudios de clasificación, que además, junto con la tradicional banda *Green*, es muy útil para

poder discriminar entre diferentes tipos de cubiertas vegetales; (iv) el nuevo *NIR-2*, que presenta las mismas características que el *NIR* tradicional pero, en este caso, se ve menos afectado por la influencia atmosférica y se puede usar en estudios de la biomasa.

Las imágenes de este nuevo satélite *VHR* se empezaron a comercializar a partir del 4 de enero de 2010. Según un estudio piloto realizado por DigitalGlobe (2010) se pueden obtener mejoras sustanciales en la precisión de la clasificación usando las 8 bandas de WV-2 frente a las imágenes *MS* tradicionales *RGB-NIR* de QuickBird, IKONOS o GE-1. Estas mejoras se cuantifican en una mejora global de entre un 10 y un 30% en la precisión de clasificación de carreteras, vegetación o elementos acuáticos (arrecifes y barreras de arena). Al igual que las imágenes adquiridas por GE-1, este satélite presenta la posibilidad de capturar imágenes en modo directo e inverso, tal y como se muestra en la figura I.5.

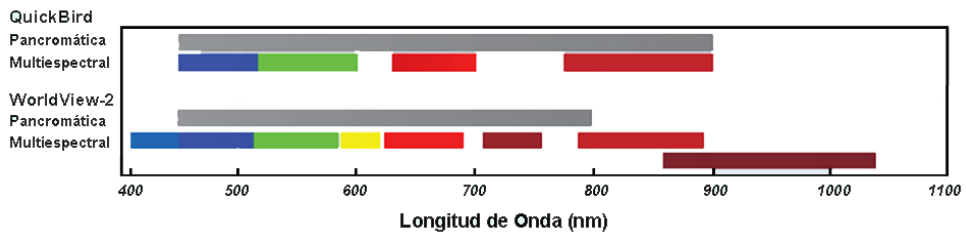


Fig. I.6. Comparación entre las longitudes de onda de las bandas almacenadas por los satélites QuickBird (similares a las captadas por IKONOS o GE-1) y WV-2, tanto en *PAN* como en *MS*.

1.4. OBTENCIÓN DE DATOS A PARTIR DE IMÁGENES *VHR*.

Los satélites *VHR* ofrecen la posibilidad de generación de *DEMs* a partir de estéreo pares de imágenes, pudiéndose obtener errores medios cuadráticos (*root mean squared error, RMSE*) de entre 1 a 2 veces el tamaño de píxel, dependiendo, entre otros factores, de lo accidentado de la orografía, del sensor usado, del modelo de sensor utilizado en la triangulación y de la calidad de los *GCPs* empleados (Ridley *et al.*, 1997; Toutin 2004; Toutin 2006; Aguilar *et al.*, 2007b).

Estos errores han sido mucho menores, en torno a 0.5 veces el tamaño de píxel terreno (*GSD*), cuando el *DEM* fue generado a partir de un estéreo par de GE-1 (Fraser y Ravanbakhsh, 2009).

Una de las aplicaciones más comunes de imágenes procedentes de sensores remotos es la extracción de información de la superficie-uso del suelo. Esta información será útil para que los gobiernos municipales puedan optimizar la planificación y gestión del territorio, tanto en ambientes urbanos como rurales y/o agrícolas. Durante la última década la teledetección por satélite ha avanzado a pasos agigantados, aumentando la resolución espacial de sus productos de manera muy importante hasta llegar a 0.5 m de resolución en imágenes de GE-1 o WV-2.

La tradicional clasificación basada en píxeles (*per-pixel classification*) ha quedado muy limitada a la clasificación de las imágenes obtenidas con satélites de baja-media resolución espacial como *LandSat* (*GSD* = 15-30 m). La información superficie-uso del suelo extraída mediante la clasificación *MS* basada en píxeles muestra tener más complejidad, debido al aumento de la variación interna en la unidad de la cubierta vegetal (Carleer y Wolff, 2006; Kux y Pinho, 2006). Con el aumento de resolución espacial de los nuevos satélites, las clases de superficie-uso del suelo tienden a ser representadas por unidades espaciales de características heterogéneas de espectro reflectante, y su separabilidad estadística se reduce cuando se utilizan criterios tradicionales de clasificación basados en píxeles. En consecuencia, la precisión de la clasificación se reduce y, por lo general, los resultados muestran un efecto de sal y pimienta debido a la existencia de píxeles individuales clasificados de forma diferente a sus vecinos. Estudios previos han demostrado que la precisión de la clasificación superficie-uso del suelo puede disminuir cuando aumenta la resolución espacial de la imagen (Townshend y Justicia, 1981; Latty *et al.*, 1985; Martin *et al.*, 1988; Gong y Howarth, 1990; Treitz y Howarth, 2000). Esto ha motivado que las técnicas de clasificación basada en objetos (*object based image analysis, OBIA*) se estén imponiendo a la clasificación basada en píxeles, especialmente cuando se trabaja con imágenes de satélites *VHR*. Diversos trabajos han usado imágenes de satélite *VHR* para la extracción de datos georreferenciados en ambientes urbanos empleando técnicas *OBIA* (*e.g.*, Turker y San, 2010; Pu *et al.*, 2011). Algunos de estos estudios dirigidos a la extracción de

edificios usan los más modernos satélites comerciales como son GE-1 (*e.g.*, Hussain *et al.*, 2011; Grigillo y Kosmatin Fras, 2011) o WV-2 (*e.g.*, Longbotham *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012). Debido a su extrema heterogeneidad, la extracción de edificios a partir de imágenes *VHR* está siendo foco de atención y estudio en la última década.

Los cambios de cobertura y uso del suelo afectan sobremanera a zonas dinámicas como suelen ser las áreas litorales. Concretamente, el litoral andaluz ha experimentado un espectacular y explosivo proceso de transformación en las últimas décadas (Requejo, 2001), donde los procesos de urbanización tienen una alta cuota de responsabilidad (Ojeda y Villar, 2006). Los conceptos de crecimiento e intensificación aluden al proceso de urbanización, es decir, a la evolución que registra el suelo rústico al transformarse en suelo urbano (Zoido *et al.*, 2000). En este sentido, el Informe anual de 2004 de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía (Consejería de Medio Ambiente, 2005) ya recoge, en el capítulo sobre el litoral, algunos indicadores sobre el crecimiento urbano total de 2002 respecto a 1998. En la actualidad, la longitud de costa urbanizada en Almería es de 75 km, cuando en 1957 apenas superaba los 11 km, es decir un 33% de su longitud total y un 52% de la ocupada por playas (Viciano, 2007). Como resultado de ello se ha consolidado un continuo urbano congestionado y de alta densificación, como son los casos de Roquetas de Mar, con un 71% de su costa construida, Vera, con un 100% y Mojácar, con un 56%.

La preocupación de la Comunidad Autónoma Andaluza por el problema del futuro de nuestras costas queda recogida en el Plan Andaluz de Medio Ambiente 2004-2010, donde se dedica un área estratégica de actuación (Área 6 concretamente) a la Gestión Ambiental Integrada del Litoral. Por otra parte, el Plan Cartográfico de Andalucía 2008- 2011 establece unas líneas prioritarias en el ámbito de la captura y compilación de datos georreferenciados, entre las que se encuentra la expansión de la Altimetría Láser Aerotransportada, la mejora de las técnicas de análisis y extracción automatizadas a partir de imágenes digitales, la integración de datos multi-fuente, mejora de las capacidades de la fotogrametría digital, etc. Precisamente sería dentro de estas nuevas políticas regionales donde se encajaría el estudio de productos georreferenciados generados a partir de imágenes de satélites *VHR*.

1.5. 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, M.A., Aguilar, F.J., Carvajal, F., Agüera, F., Estrada, L., 2006. Geometric accuracy of Ikonos Geo Panchromatic Orthoimage Products. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, 184: 5-10.

Aguilar, F.J., Carvajal, F., Aguilar, M.A., Agüera, F., 2007a. Developing digital cartography in rural planning applications. *Computers and Electronics in Agriculture*, 55(2): 89-106.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Carvajal, F., Agüera, F., 2007b. Comparison of two commercial solutions for generating DSMs from QuickBird stereo imagery. *Annual Conference of the Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc2007)*. September, NewCastle, U.K., unpaginated CD ROM.

Aguilar, M.A., Agüera, F., Aguilar, F.J., Carvajal, F., 2008. 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.

Al-Khudhair, 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.

Carleer, A.P. y Wolff, E., 2006. Region-based classification potential for land-cover classification with very high spatial resolution satellite data, In *Proceedings of 1st International Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006)*, Salzburg University, Austria, July 4-5. Vol. XXXVI, ISSN 1682 1777.

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.

Chmiel, J., Kay, S., Spruyt, P., 2004. Orthorectification and geometric quality assessment of very high spatial resolution satellite imagery for Common Agricultural Policy purposes. Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry.

Chuvieco, E., 1990. Fundamentos de teledetección espacial. Rialp, Madrid, 453 páginas.

Consejería De Medio Ambiente, 2005. El Informe de Medio Ambiente en Andalucía 2004 de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía y realizado desde la Dirección General de Participación e Información Ambiental. URL: <http://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/> (último acceso 4 de Noviembre de 2012).

Croft, J., 2008. Prodigious Mapping Capabilities, Spatial resolution and Geo-location ability, GeoEye's next-generation Imaging Satellite. GeoInformatics, 4: 18-23.

DigitalGlobe, Inc., 2010. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide. URL: http://www.digitalglobe.com/downloads/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf (último acceso: 25 Enero 2013).

Fraser, C.S., 2002a. Prospect for mapping from high-resolution satellite imagery. The 23rd Asian Conference on Remote Sensing (ACRS 2002), 25-29 November 2002, Kathmandu, Nepal, unpaginated CD ROM.

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

Fraser, C.S. y 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.genesiis.com/pdf/2009_geoeye_product_guide.pdf (último acceso: 7 Febrero 2013).

Gong, P. y Howarth, P.J., 1990. The use of structural information for improving spatial resolution and classification accuracy land-cover classification accuracies at the rural-urban fringe. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 56: 67-73.

Grigillo, D. y Kosmatin Fras, M., 2011. Classification Based Building Detection From GeoEye-1 Images. In: Stilla U, Gamba P, Juergens C, Maktav D (Eds) JURSE - Joint Urban Remote Sensing Event - Munich, Germany, April 11-13, 2011.

Hussain, E., Ural, S., Kim, K., Fu, C., Shan, J., 2011. Building Extraction and Rubble Mapping for City Port-au-Prince Post-2010 Earthquake with GeoEye-1 Imagery and Lidar Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(10): 1011-1023.

Jin, X. y 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.

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

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

Kux, H.J.H. y Pinho, C.M.D., 2006. Object-oriented analysis of high-resolution satellite images for intra-urban land cover classification: Case study in São José Dos Campos, São Paulo State, Brazil. In *Proceedings of 1st International*

Conference on Object-based Image Analysis (OBIA 2006), Salzburg University, Austria, July, 4-5. Vol. XXXVI, ISSN 1682-1777.

Latty, R.S., Nelson, R., Markham, B., Williams, D., Toll, D., Irons, J., 1985. Performance comparison between information extraction techniques using variable spatial resolution data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 51: 1159-1170.

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

Lillesand, T. M., Kiefer, R.W., Chipman, J. W., 2008. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Sixth edition. John Wiley & Sons, INC.

Longbotham, N., Chaapel, C., Bleiler, L., Padwick, C., Emery, W.J., Pacifici, F., 2012. Very High Resolution Multiangle Urban Classification Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(4): 1155-1170.

Lu, D., Mausel, P., Brondízio, E., Moran, E., 2004. Change detection techniques. *International Journal of Remote Sensing*, 25(12): 2365-2407.

Martin, L.R.G., Howarth, P.J., Holder, G., 1988. Multispectral classification of land use at the rural-urban fringe using SPOT data. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 14: 72-79.

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.

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

Ojeda, J. y Villar, A., 2006. Evolución del suelo urbano/alterado en el litoral de Andalucía. *GeoFocus*, 7: 73-99.

Pecci, J., Cano, F., Maza, G., 2004. Generación de una ortoimagen QuickBird del año 2003 de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia: metodología y resultados. XI Congreso Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección, 20-23 Septiembre, Murcia, España, pp. 301-312.

Pinilla, C., 1995. Elementos de Teledetección. Ra-ma, Madrid, 344 páginas.

Poli, D., 2005. Modelling of Spaceborne Linar Array Sensors. Thesis Zurich University.

Pu, R., Landry, S., Yu, Q., 2011. Object-based urban detailed land cover classification with high spatial resolution IKONOS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 32(12): 3285-3308.

Requejo, J., 2001. La segunda residencia lanza una OPA sobre el litoral andaluz. Una grave amenaza sobre el modelo de ordenación territorial para el litoral. In III Congreso Internacional de Ordenación del Territorio. Asociación Fundicot, Madrid, España, 2001.

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.

Toutin, T., 2004. DSM generation and evaluation from QuickBird stereo imagery with 3D physical modelling. *International Journal of Remote Sensing*, 25(22): 5181-5193.

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.

Townshend, J. y Justice, J., 1981. Information extraction from remotely sensed data, a user view. *International Journal of Remote Sensing*, 2: 313-329.

Treitz, P. y P.J. Howarth, 2000. High spatial resolution remote sensing data for forest ecosystem classification: An examination of spatial scale. *Remote Sensing of Environment*, 72: 268-289.

Turker, M. y San, K., 2010. Building detection from pansharpened Ikonos imagery through support vector machines classification. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Vol. XXXVIII, Part 8, Kyoto Japan.

Viciana, A., 2007. La costa de Almería: Desarrollo socioeconómico y degradación físico-ambiental (1957-2007). *Paralelo 37*, 19: 149-183.

Walter, W., 2004. Object-based classification of remote sensing data for change detection. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 225-238.

Weber, C. y 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".

Yan, D. y 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".

Zhou, W., Troy, A., Grove, M., 2008. Object-based Land Cover Classification and Change Analysis in the Baltimore Metropolitan Area Using Multitemporal High Resolution Remote Sensing Data. *Sensors*, 8: 1613-1636.

Zhou, X., Jancsó, T., Chen, C., Malgorzata Veróné, W., 2012. Urban Land Cover Mapping Based on Object Oriented Classification Using WorldView 2 Satellite Remote Sensing Images. *International Scientific Conference on Sustainable Development & Ecological Footprint*, March 26-27, Sopron, Hungary.

Zoido, F., Morales, G., Mas, R., De La Vega, S., Lois, R., 2000. *Diccionario de Geografía Urbana, Urbanismo y Ordenación del Territorio*. Barcelona, Editorial Ariel. 407 páginas.

CAPÍTULO 2.

OBJETIVOS.

2.1. HIPÓTESIS DE PARTIDA.

La aparición una nueva generación de satélites de muy alta resolución (*Very High Resolution, VHR*) ofrece mejoras importantes, tanto en resolución espacial (banda pancromática, *PAN*) como espectral (bandas multispectrales, *MS*), respecto a sus predecesores IKONOS y QuickBird. Los productos georreferenciados generados a partir de imágenes de satélites *VHR* como GeoEye-1 (GE-1) y WorldView-2 (WV-2) son también competidores directos, en calidad y precio, de los obtenidos a partir de vuelos fotogramétricos a grandes y medias escalas.

Las mejoras tecnológicas de los nuevos satélites *VHR* apuntan a la posible obtención de ortoimágenes y modelos digitales de superficies (*Digital Surface Models, DSMs*) o de elevaciones (*Digital Elevation Models, DEMs*) generados a partir de escenas de GE-1 y WV-2 con mejores precisiones geométricas. Además, debida a la mayor riqueza multispectral y precisión radiométrica de estos nuevos satélites (*e.g.* el número de bandas que componen la imagen *MS* de WV-2 se eleva hasta 8), se podría esperar una mejora en la clasificación supervisada de usos y coberturas del suelo para la obtención de mapas temáticos (urbanizaciones, edificios, carreteras, zonas impermeables, cultivos, *etc.*). Estas potenciales mejoras deben ser contrastadas con ensayos reales en condiciones de campo, estudiando los procedimientos óptimos de actuación para la generación de los datos georreferenciados más precisos y de calidad posibles.

En este sentido, las hipótesis sobre las que se sustenta esta Tesis Doctoral serían las siguientes:

(i) Es posible mejorar las precisiones geométricas obtenidas en ortoimágenes y *DSMs* generados a partir de imágenes de GE-1 y WV-2, debido a la mejora de los sensores ópticos con los que están equipados (fundamentalmente en

lo relativo a la resolución alcanzable y sistemas de geo-localización que llevan incorporados).

(ii) Del mismo modo, se puede esperar una mejora de la precisión en la clasificación supervisada de clases o usos del suelo para la producción semiautomática de mapas temáticos a gran escala (urbanizaciones, edificios, carreteras, zonas impermeables, cultivos, invernaderos), debida en parte a la mayor resolución geométrica, y, sobre todo, al mayor número de bandas que componen la imagen *MS* de WV-2.

2.2. OBJETIVOS.

El objetivo general del proyecto es estudiar el nivel de precisión y calidad alcanzables, en condiciones operacionales, en los productos georreferenciados derivados de imágenes de los dos satélites comerciales *VHR* que actualmente ofrecen la mayor resolución espacial, GE-1, y radiométrica, WV-2. Estos productos son básicamente, ortoimágenes, *DEMs*, *DSMs* y productos resultantes de la clasificación automática de usos y coberturas del suelo.

Este objetivo general puede desglosarse en los siguientes objetivos específicos:

1. Estudiar la precisión geométrica alcanzable, en condiciones operacionales, en los procesos de triangulación u orientación del sensor con imágenes Geo del satélite GE-1, y con imágenes en formatos Básico y OrthoReady Standard de WV-2. Se estudiarán distintos factores que influyen en la precisión geométrica de la triangulación: (i) características del sensor y formato de imagen, (ii) modelos matemáticos de sensor empleados, (iii) número de puntos de control (*Ground Control Points*, *GCPs*) usados para ajustar el modelo de sensor y, finalmente, (iv) ángulo de inclinación del sensor en el momento de la toma de la escena (off nadir).

2. Tras conocer la forma óptima de operar en la triangulación de las escenas de los nuevos satélites *VHR* (objetivo 1), se estudiarán las posibilidades que aportan los estéreo pares de GE-1 y WV-2 para la obtención de *DSMs*, así como la precisión de los mismos. En este sentido se analizarán también estéreo pares

mixtos conformados por imágenes de GE-1 y WV-2, sobre los que se pretenden evaluar distintos factores que influyen en la precisión geométrica de los *DSMs* generados: (i) modelos matemáticos de sensor empleados, (ii) número *GCPs* usados para ajustar el modelo de sensor, (iii) características radiométricas de cada imagen de satélite *VHR*, (iv) tiempo transcurrido entre la fecha de adquisición de cada una de las imágenes empleadas para la generación de cada *DSM*, (v) tipos de cobertura del suelo, y (vi) calidad geométrica del estéreo par medida como el ángulo de convergencia entre tomas.

3. Estudio de la influencia de factores como la calidad del *DEM* empleado en el proceso final de ortorrectificación y el ángulo off nadir de la imagen en la precisión final de las ortoimágenes generadas. Se estudiarán los casos de ortoimágenes *PAN*, *MS* y fusionadas o pan-sharpened.

4. Análisis de la precisión y calidad alcanzables, en condiciones operacionales, en la clasificación supervisada de zonas urbanas de elevado dinamismo como las situadas en el área del levante almeriense (zona litoral). Para ello se propone la aplicación de las recientemente introducidas técnicas *OBIA* (*Object Based Image Analysis*) sobre imágenes pan-sharpened (0.5 m *GSD*) procedentes de los dos nuevos satélites comerciales explorados en esta Tesis Doctoral, *i.e.* GE-1 y WV-2.

CAPÍTULO 3.

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS Y RADIOMÉTRICAS DE LAS IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN EMPLEADAS.

3.1. INTRODUCCIÓN.

Los satélite comerciales de muy alta resolución (*VHR*), son capaces de capturar imágenes de la superficie terrestre con una gran precisión geométrica y radiométrica. En la cadena de evaluación de las imágenes procedentes de satélites *VHR*, la calidad de la imagen obviamente juega un papel importante. Dicha calidad está definida por diferentes parámetros, como la calidad radiométrica y su precisión, el nivel de ruido de la imagen, la resolución geométrica y su nitidez (Crespi *et al.*, 2008). Por ello es importante tener en cuenta todas las características de las imágenes para poder realizar un análisis más preciso de los resultados obtenidos.

La resolución radiométrica de los datos de teledetección, tal y como hemos visto en el Capítulo 1 de esta Tesis, se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (*ND*). Asimismo, se define la amplitud o extensión radiométrica como el intervalo dinámico, o máximo número de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular. En los sensores más recientes lo habitual suele ser que los niveles vayan de 0 a 2047. En este caso hablaríamos de 11 bits de resolución radiométrica (2^{11}), ya que todos los valores de ese intervalo se pueden representar mediante 11 bits (dígitos binarios) en un sistema digital.

Sin embargo, estos valores no siempre son totalmente cubiertos en el histograma de valores digitales. De hecho, en un estudio realizado por Crespi *et al.* (2008) en el que usaban dos imágenes de CARTOSAT-1 adquiridas con un rango dinámico de 10 bits por píxel, el 99% de los valores digitales tomaron valores entre 0 y 255, lejos del límite máximo que podrían haber alcanzado (*i.e.* $2^{10} = 1024$). Poli *et al.* (2010), trabajando con estéreo pares pancromáticos (*PAN*) de

WorldView-2, encontraron que, aunque las imágenes que adquirieron habían sido capturadas con un rango dinámico de 11 bits, la información principal de los histogramas sólo estaba distribuida entre 0 y 10 bits. De hecho, esta distribución podría causar problemas cuando la imagen se representase en 8 bits, dando lugar a efectos de saturación que podrían falsear el análisis y complicar la extracción de modelos digitales de superficies (*DSMs*).

Por otra parte, la resolución radiométrica en imágenes digitales es comparable al número de tonos de gris en una fotografía en blanco y negro, ya que ambos se relacionan con el contraste. El ojo humano solo es capaz de percibir aproximadamente 30 tonos de gris diferentes, lo que implica que normalmente la información visual en las imágenes digitales es aparentemente menor a la que realmente contienen. Conviene indicar que aunque la resolución radiométrica define el máximo número de niveles digitales detectables por un sensor, normalmente una imagen real no los contiene todos y además, no suele haber máximos y mínimos simultáneamente. En estos casos se pueden aplicar técnicas de tratamiento de imágenes para mejorar su apariencia visual, pero nunca la resolución radiométrica propia del sensor.

Los dos satélites *VHR* empleados en esta Tesis, GeoEye-1 (GE-1) y WorldView-2 (WV-2) emplean la tecnología *TDI* (*Time Delay and Integration*) para la captura de imágenes. Esta técnica de captura de imágenes en movimiento básicamente detecta patrones de carga y los desplaza a través del dispositivo de acoplamiento de carga (*charge-coupled device, CCD*) para alcanzar la línea final (*i.e.* la línea se compone de varias líneas o etapas que acumulan la señal recibida). Sin embargo, la acumulación de señal con la tecnología *TDI* conduce a un suavizado de la señal, especialmente en la dirección del vuelo, ya que las líneas *TDI* no pueden representar exactamente la superficie de la escena y por lo tanto se produce una mezcla de señal (Baltsavias *et al.*, 2001). Aunque ambos satélites emplean esta tecnología para la captura de sus imágenes, las imágenes *PAN* de GE-1 que hemos usado en esta Tesis usaron un *TDI* con 16 etapas, mientras que las imágenes *PAN* de WV-2 emplearon 32 etapas, por lo que se sugiere que esta diferencia podría influir en la calidad final de la imagen. Las imágenes multiespectrales (*MS*) de satélites *VHR* normalmente se usan para estudios de clasificación de usos del suelo.

En este sentido resulta conveniente el realizar un análisis de la información radiométrica de ambos sensores, aproximadamente en las mismas condiciones y sobre la misma zona de estudio. Por otra parte, los cambios en la calidad de las imágenes y la idoneidad de estas para extraer clases de forma automática están asociados con las variaciones del ángulo de inclinación de la escena (off-nadir), la elevación solar y las sombras, las condiciones atmosféricas y con el modo de la toma de la escena (Baltsavias *et al.*, 2001; Poli *et al.*, 2010). Por ejemplo, la dispersión y absorción que provoca la atmósfera en la radiación que alcanza al sensor (radiancia) reducen el número de *NDs* en las imágenes, especialmente en las longitudes de onda más cortas. En términos visuales esto se traduciría en una pérdida de contraste. Igualmente, el brillo que puede alcanzar cada píxel varía sustancialmente dependiendo de donde se encuentre (*e.g.* a plena luz del sol, en zona de sombra, *etc.*) y estos efectos son claramente evidentes en imágenes donde se representan zonas con un alto relieve, lo que podrían afectar directamente a los resultados de la clasificación de imágenes *MS* (Merchant y Narumalani, 2009). El uso de la tecnología *TDI* podría afectar también a estudios de clasificación automática, ya que dicha técnica provoca un efecto de *blurring* (imagen borrosa), especialmente en el sentido de la toma de las imágenes, que puede degradar detalles como, por ejemplo, los bordes de un edificio, lo que dificultaría la clasificación (Fraser *et al.*, 2002).

En este capítulo se realiza una descripción del material de partida que se ha usado en esta Tesis para la comparación de la capacidad de los sensores *VHR* testados para la generación de datos georreferenciados, incluyendo: (i) zona de estudio, (ii) características geométricas de las imágenes de satélite GE-1 y WV-2 en modo *PAN* y *MS*, (iii) descripción de las características radiométricas de las imágenes *PAN* y *MS* de ambos satélites en toda el área de trabajo y iv) análisis visual de las mismas.

3.2. ZONA DE ESTUDIO.

La zona de estudio se sitúa en la costa de Almería, España, en una franja de aproximadamente 11 km de largo por 775 m de ancho (Fig. III.1). Concretamente se localiza entre los puertos de Garrucha y Villaricos. Está centrada en las

coordenadas UTM 650,870 m este y 4,119,869 m norte, expresadas en el sistema de referencia 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 y la actuación antrópica llevada a cabo durante los últimos 50 años han provocado cambios significativos en su paisaje y ha producido catástrofes naturales como inundaciones y regresión de la línea de costa (hasta unos 200 m en la playa de Quitapellejos, situada en Palomares (Almería)).

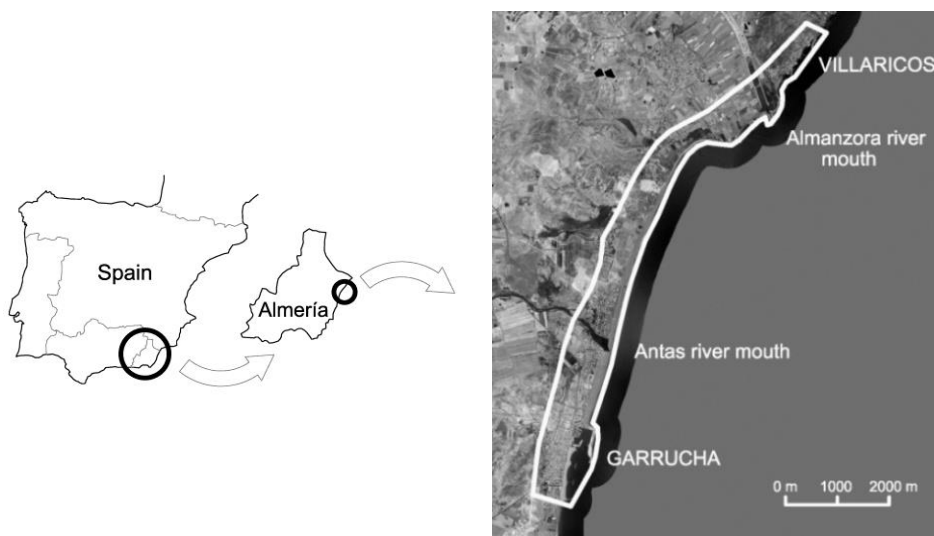


Fig. III.1. Localización de la zona de estudio.

3.3. IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN.

Las imágenes de satélite empleadas para este trabajo provienen de los satélites *VHR* GE-1 y WV-2. Ambos satélites proporcionan diferentes productos con distintos niveles de procesamiento. A continuación se definen los diferentes tipos de imágenes que han sido adquiridas para este estudio.

3.3.1. GE-1.

Los productos del satélite GE-1 empleados en esta Tesis, distribuidos en su momento por la empresa *GeoEye*, han sido los siguientes:

- i) Imágenes Geo. Estas imágenes están proyectadas sobre una superficie de altura constante. Las imágenes Geo de GE-1 contienen el menor nivel de procesamiento, tanto radiométrico como geométrico. Son las imágenes que un operador con capacidades fotogramétricas podría usar para generar productos georreferenciados de la máxima calidad. Para ello, *GeoEye* proporciona los datos correspondientes al modelo de sensor en forma de coeficientes de polinomios racionales (*Rational Polynomial Coefficient, RPCs*) y un archivo de metadatos, que junto con la participación de puntos de control (*GCPs*), un modelo digital de elevaciones (*DEM*) y software comercial, permiten la obtención de productos ortorrectificados muy precisos. Cabe destacar que la capacidad de geoposicionamiento (fase de orientación del sensor) de las imágenes Geo utilizando solamente los *RPCs* suministrados en la propia imagen ha mejorado mucho respecto a satélites anteriores como IKONOS o QuickBird, situándose en valores de unos 3 m de precisión planimétrica (GeoEye, Inc., 2009) medida como error medio cuadrático (*RMSE*).
- ii) Imágenes Geo Stereo. Este producto ofrece dos imágenes que forman un estéreo par con capacidad para generar productos como, por ejemplo, *DEMs* o *DSMs*. Las imágenes que forman el estéreo par, individualmente, tienen exactamente las mismas características que una imagen Geo (GeoEye, Inc., 2009).

Durante 2010 y 2011 se adquirieron tres imágenes de GE-1 (Tabla III.1). La primera es una imagen Geo tomada el 29 de septiembre de 2010 con un ángulo off-nadir de 20.6° (imagen GE11 en la Tabla III.1). Las dos imágenes restantes conforman un estéreo par, por lo que son imágenes Geo Stereo y se caracterizan por tener ángulos off-nadir de 8.5° y 23.1° respectivamente (imágenes GE12 y GE13 en la Tabla III.1). Las tres imágenes de GE-1 fueron adquiridas en modo *PAN* y *MS* en sentido de escaneo inverso. Este satélite captura simultáneamente la banda *PAN*, con un rango espectral desde 450 hasta 800 nm, y las cuatro bandas *MS*: Blue (450 hasta 510 nm), Green (510-580 nm), Red (655-690 nm) y NIR (780-920 nm). Todas estas imágenes fueron adquiridas con un rango dinámico de 11-bits por píxel sin ningún ajuste, manteniendo la precisión radiométrica absoluta y el rango dinámico completo para aplicaciones científicas. Además, en el proceso de

adquisición de estas imágenes se empleó la tecnología *TDI* con 16 etapas en las imágenes *PAN*.

Tabla III.1. Características de las imágenes *PAN* y *MS* de GE-1 adquiridas.

Imagen (ID)	GE11	GE12	GE13
Fecha Adquisición	29/9/2010	27/8/2011	27/8/2011
Satélite	GeoEye-1	GeoEye-1	GeoEye-1
Tipo de imagen	Geo	GeoStereo	GeoStereo
Hora de Adquisición	11:01	10:55	10:56
Cobertura de nubes	0%	0%	0%
Sentido de la toma	Inverso	Inverso	Inverso
Azimut del Sol	159.3°	144.1°	144.4°
Elevación del Sol	48.4°	58.3°	58.4°
Elevación del Sensor	69.4°	81.5 °	66.9°
Azimut del Sensor	221.9°	40.4 °	183.6°
Tamaño Real píxel Col. (<i>PAN</i>)	0.460 m	0.416 m	0.480 m
Tamaño Real píxel Fila (<i>PAN</i>)	0.449 m	0.417m	0.440 m
Tamaño de Píxel <i>PAN</i>	0.5 m	0.5 m	0.5 m
Tamaño Real píxel Col. (<i>MS</i>)	1.84 m	1.66 m	1.92 m
Tamaño Real píxel Fila (<i>MS</i>)	1.80 m	1.65 m	1.76 m
Tamaño de Píxel <i>MS</i>	2 m	2 m	2 m
Bits por píxel	11	11	11

3.3.2. WV-2.

Los productos WV-2 empleados en esta tesis han sido los siguientes:

- i) Imágenes Básicas. Este producto sólo está corregido radiométricamente. Las imágenes básicas presentan el menor nivel de procesamiento de los productos que nos ofrece la empresa suministradora *DigitalGlobe*. Además, las imágenes vienen acompañadas por datos de soporte de la imagen (*Image Support Data, ISD*) que incluyen información sobre posición, efemérides e información de la calibración geométrica, modelo de la cámara empleada y *RPCs*, los cuales son adecuados para diferentes procesos fotogramétricos (*DigitalGlobe, Inc., 2010*).

- ii) Imágenes Ortho Ready Standard Level-2A (ORS2A). Este producto presenta correcciones geométricas y radiométricas en un nivel similar al que tienen las imágenes Geo de GE-1. Las imágenes ORS2A están georreferenciadas en relación a una proyección cartográfica utilizando una superficie de altura constante. Al igual que las imágenes GE-1 Geo de la casa *GeoEye*, estas imágenes incluyen los coeficientes de las funciones racionales (*RPCs*) y archivos de metadatos (DigitalGlobe, Inc., 2010).

Cinco imágenes de WV-2 han sido empleadas en esta Tesis. Todas fueron adquiridas en 2011. Dos de ellas forman un estéreo par, y se adquirieron tanto en formato de imagen Básica (imágenes WV24 y WV25 en Tabla III.2) como en ORS2A (imágenes WV22 y WV23 en Tabla III.2), presentando ángulos off-nadir de 22.4° y 10° respectivamente. En este caso, las dos imágenes de menor ángulo off-nadir, tanto en modo Básica como en ORS2A, fueron tomadas en sentido inverso (*i.e.* WV23 y WV25 en Tabla III.2) y las de mayor off-nadir en sentido directo (*i.e.* WV22 y WV24 en Tabla III.2). Estas cuatro imágenes de WV-2 fueron adquiridas en modo *PAN* y *MS*, excepto la imagen ORS2A de mayor off-nadir (*i.e.* WV22 en Tabla III.2), que sólo fue adquirida en modo *PAN*. En las imágenes de WV-2, la banda *PAN* tiene un rango espectral desde 450 hasta 800 nm, mientras que la imagen *MS* incluye dos conjuntos de bandas *MS* (*MS1* y *MS2*). El grupo *MS1* contiene las bandas convencionales, *i.e.*, Blue (450-510 nm), Green (510-580 nm), Red (630-690 nm) y primer infrarrojo cercano (NIR1, 760-895 nm), mientras que el conjunto de bandas *MS2* está compuesto por cuatro nuevas bandas conocidas como Coastal Blue (400-450 nm), Yellow (585-625 nm), Red Edge (705-745 nm) y segundo infrarrojo cercano (NIR2, 860-1040 nm). Otra imagen ORS2A, tomada en julio de 2011 con un off-nadir de 5°, fue adquirida en modo *PAN* y *MS*. El sentido de la captura de esta imagen fue directo. Las cinco imágenes de WV-2 fueron adquiridas con un rango dinámico de 11-bits por píxel y sin corrección de color o aumento de contraste tanto en *PAN* como en *MS*. Al igual que en el caso de las imágenes de GE-1, también se empleó la tecnología *TDI* en la adquisición de las imágenes, pero en este caso con 32 etapas.

Todas estas imágenes de satélite, cuyas características se muestran en las Tablas III.1 y III.2, incluyen las 850 ha de la zona de estudio expuesta en el

apartado anterior. Todas ellas presentan un tamaño de píxel (*GSD*) finalmente remuestreado a 0.5 m para las imágenes *PAN* y 2 m para las *MS*.

Tabla III.2. Características de las imágenes *PAN* y *MS* de WV-2 adquiridas.

Imagen	WV21	WV22	WV23	WV24	WV25
Fecha Adquisición	19/7/2011	18/8/2011	18/8/2011	18/8/2011	18/8/2011
Satélite	WV-2	WV-2	WV-2	WV-2	WV-2
Tipo de imagen	ORS2A	ORS2A	ORS2A	Básica	Básica
Hora de Adquisición	11:23	11:22	11:23	11:22	11:23
Cobertura de nubes	0%	0%	0%	0%	0%
Sentido de la toma	Directo	Directo	Inverso	Directo	Inverso
Azimut del Sol	142.5°	152.3°	152.8°	152.3°	152.8°
Elevación del Sol	70.5°	63.7°	63.8°	63.7°	63.8°
Elevación del Sensor	85.0°	67.6°	80.0°	67.6°	80.0°
Azimut del Sensor	279.9°	4.7°	216.1°	4.7°	216.1°
Tamaño Real píxel Col. (<i>PAN</i>)	0.467 m	0.499 m	0.473 m	0.499 m	0.473 m
Tamaño Real píxel Fila (<i>PAN</i>)	0.465 m	0.538 m	0.480 m	0.538 m	0.480 m
Tamaño de Píxel <i>PAN</i>	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m	0.5 m
Tamaño Real píxel Col. (<i>MS</i>)	1.87 m	-	1.89 m	2.00 m	1.89 m
Tamaño Real píxel Fila (<i>MS</i>)	1.86 m	-	1.90 m	2.16 m	1.90 m
Tamaño de Píxel <i>MS</i>	2 m	-	2 m	2 m	2 m
Bits por píxel	11	11	11	11	11

3.4. CALIDAD RADIOMÉTRICA *PAN* Y *MS*. METODOLOGÍA.

Los satélites GE-1 y WV-2 capturan imágenes con un rango dinámico de 11 bits por píxel, por lo que el número digital (*Digital Number, DN*) de cada píxel puede alcanzar un valor de 2048 (*i.e.* 2^{11}). Sin embargo, las propias empresas suministradoras realizan una compresión de los rangos de los *DNs* para evitar que superficies muy reflectantes produzcan destellos o zonas quemadas (McCarty, 2010). A causa de esto, los valores de los *DNs* de las imágenes de satélite *VHR* de 11 bits, sin corrección en el color o mejora del contraste, no suelen exceder valores

de *DNs* superiores a 1500, dejando prácticamente vacía la última parte del histograma. En el caso de las imágenes de GE-1, el 99% de los *DNs* varían entre 110 y 780 (Crespi *et al.*, 2010), mientras que para las imágenes de WV-2 la información se distribuye principalmente entre 0 y 10 bits (Poli *et al.*, 2010).

El análisis de las características radiométricas de las imágenes de satélite ensayadas en este trabajo se va a realizar de tres formas diferentes: (i) estudiando los histogramas de *DNs* de las imágenes originales, (ii) haciendo una evaluación visual de las mismas y, por último, (iii) empleando una evaluación de la calidad de la imagen basada en índices relacionados con los niveles de borrosidad (*blur*) y ruido (*noise*).

3.4.1. Histogramas de *DNs*.

Los histogramas de los *DNs* correspondientes a la totalidad de la zona de estudio fueron extraídos para cada una de las bandas de las imágenes *PAN* y *MS* originales con 16 bits. En el caso de las imágenes *MS* de GE-1, se analizan los histogramas de las cuatro bandas convencionales (*i.e.* R, G, B y NIR), mientras que para las imágenes *MS* de WV-2 se estudian las 8 bandas correspondientes a *MS1* y *MS2*.

3.4.2. Inspección visual.

Después de realizar el análisis de la distribución de los *DNs* según los histogramas de las imágenes *VHR*, se realizó una inspección visual para comparar de nuevo, y de una manera subjetiva, las posibles diferencias encontradas en el apartado anterior. Este análisis visual será realizado sobre imágenes *PAN* y *MS* considerando una pequeña parcela piloto de forma cuadra y 140 m de lado (*i.e.* 19,600 m²).

3.4.3. Evaluación de la calidad de la imagen.

La evaluación tradicional de imágenes digitales necesita de la participación de una imagen de referencia. Este es el caso de métodos convencionales y bien conocidos para la evaluación de calidad de imágenes digitales como *Mean Squared Error (MSE)* o *Peak Signal to Noise Ratio (PSNR)*. Recientemente, Choi *et al.* (2009) han propuesto un nuevo método de evaluación de la calidad de imágenes digitales

sin necesidad de imágenes de referencia (*No-Reference*) basado en el cómputo del ratio de borrosidad (*Blur ratio, Br*) y el ratio de ruido (*Noise ratio, Nr*) de la imagen. Este método ofreció una correlación muy alta con las evaluaciones visuales realizadas por humanos (*Difference Mean Opinion Score, DMOS*). Aunque la calidad de la imagen está afectada por diferentes aspectos, tales como la cantidad de ejes, el ruido o el contraste, Choi *et al.* (2009) asumieron que el ruido y la borrosidad eran los que más influían en la degradación de la calidad. En este apartado tratamos de aplicar estos nuevos índices para describir, cuantitativamente, la calidad radiométrica de las imágenes *PAN* y *MS* de satélites *VHR*, calidad que hasta ahora se había estimado mediante la Función de Transferencia de Modulación (*Modulation Transfer Function, MTF*) (Choi, 2002; Crespi y Vendictis, 2009).

Ambos ratios (*Br* y *Nr*) se calculan mediante simples operaciones sobre los *DNs* contenidos en los píxeles de la imagen. A partir de aquí vamos a describir la metodología para su cómputo, siguiendo las recomendaciones de Choi *et al.* (2009).

En primer lugar, y para el cálculo del índice *Br*, necesitamos llevar a cabo los siguientes procedimientos: (i) detección de bordes y (ii) toma de decisión sobre la borrosidad. Consideremos que la imagen a evaluar está definida por *M* filas y *N* columnas (*i.e.* $f(x, y)$, para $x \in [1, M]$ e $y \in [1, N]$). Para determinar el ratio de borrosidad horizontal se calcula la diferencia absoluta de *DNs* en un píxel concreto (D_h):

$$D_h(x, y) = |f(x, y + 1) - f(x, y - 1)| \quad (1)$$

El valor medio de D_h para todos los píxeles de la imagen es calculado mediante la expresión:

$$D_{h-mean} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N D_h(x, y) \quad (2)$$

En el caso de que la diferencia absoluta en un píxel (*i.e.* ecuación 1) sea mayor que el valor medio (*i.e.* ecuación 2), el píxel en cuestión pasará a ser candidato a pertenencia a un borde ($C_h(x, y)$). Si el valor digital de $C_h(x, y)$ es mayor que el de los píxeles horizontales adyacentes $\{C_h(x, y-1), C_h(x, y+1)\}$, el píxel pasa a ser

considerado parte de un borde. Esta regla de decisión queda resumida mediante las siguientes expresiones, donde $E_h(x,y)$ indicaría la pertenencia o no a un borde:

$$C_h(x,y) = \begin{cases} D_h(x,y) & \text{if } D_h(x,y) > D_{h-mean} \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (3)$$

$$E_h(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } D_h(x,y-1) < C_h(x,y) > D_h(x,y+1) \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (4)$$

Ahora hay que decidir si un píxel determinado de la imagen es borroso o no. Para ello se calcula el ratio de borrosidad horizontal (BR_h) mediante las ecuaciones (5) y (6):

$$A_{h(x,y)} = \frac{1}{2} D_h(x,y) \quad (5)$$

$$BR_h(x,y) = \frac{|f(x,y) - A_{h(x,y)}|}{A_{h(x,y)}} \quad (6)$$

De la misma manera se obtiene el ratio de borrosidad vertical (BR_v). El mayor valor de borrosidad horizontal y vertical ($maxBR$) es seleccionado para realizar la toma de la decisión final. Este proceso es denominado borrosidad inversa por Choi *et al.* (2009).

$$B(x,y) = \begin{cases} 1 & \text{if } maxBR < Th \\ 0 & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

La ecuación (7) indica que si el píxel central tiene un valor de borrosidad inversa (o $maxBR$) inferior a un umbral (Th) es considerado como borroso. Este umbral fue fijado en 0.1 en nuestro caso, tal y como propusieron Choi *et al.* (2009). Finalmente, el ratio de borrosidad (Br) es calculado según la expresión:

$$Br = \frac{Blur_{cnt}}{Edge_{cnt}} \quad (8)$$

Donde $Blur_{cnt}$ es el número de píxeles clasificados como borrosos y $Edge_{cnt}$ es el número total de píxeles pertenecientes a bordes.

Respecto al ruido, Choi *et al.* (2009) proponen su medida fuera de las regiones catalogadas como bordes. Ya que la detección de bordes se ve afectada por el

ruido, es necesario un pre-procesamiento de la imagen para filtrarlo antes de proceder a la extracción de dichos bordes. Choi *et al.* (2009) aplican un filtro de medias (ecuación 9) a la imagen original para eliminar el ruido.

$$g(x, y) = \frac{1}{3 \times 3} \left[\sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x+i, y+j) \right] \quad (9)$$

La detección de bordes en $f(x, y)$ es similar a lo visto para la medida de la borrosidad. D_h y D_{h-mean} son calculadas según las ecuaciones (1) y (2), tanto en dirección horizontal como vertical. En este sentido, el candidato para el ruido, que será 0 en las regiones clasificadas como bordes, tomará el valor máximo de $(D_h(x, y), D_v(x, y))$ siempre que $D_h(x, y) \leq D_{h-mean}$ y $D_v(x, y) \leq D_{v-mean}$. En cualquier otro caso, N_{cand} resulta igual a 0.

Finalmente, la decisión sobre el ruido es la siguiente: $N(x, y)$ es igual a $N_{cand}(x, y)$ si $N_{cand}(x, y) > N_{cand-mean}$. En cualquier otro caso, $N(x, y)$ sería igual a 0, estando definiendo $N_{cand-mean}$ como:

$$N_{cand-mean} = \frac{1}{M \times N} \sum_{x=1}^M \sum_{y=1}^N N_{cand}(x, y) \quad (10)$$

Nr queda así definido como el ratio entre el número total de píxeles con ruido de la imagen ($Noise_{cnt}$) y los píxeles totales.

$$Nr = \frac{Noise_{cnt}}{M \times N} \quad (11)$$

En este trabajo, los índices Br y Nr fueron calculados mediante un código implementado en MATLAB® para cada una de las bandas y cada una de las imágenes *PAN* y *MS*. Ambos ratios se calcularon en cinco áreas cuadradas diferentes pertenecientes a nuestra zona de estudio. Cada una de ellas representaba un tipo de uso de suelo y comprendía una superficie aproximada de unos 360,000 m². Así, dos de ellas, denominadas *U1* y *U2*, fueron escogidas sobre terrenos urbanos. Otras dos (*M1* y *M2*) comprendían áreas mixtas (zonas urbanas y suelos desnudos o agrícolas). La última área seleccionada (*B*) representaba exclusivamente suelo desnudo y/o agrícola.

3.5. RESULTADOS DE CALIDAD RADIOMÉTRICA PARA IMÁGENES PAN.

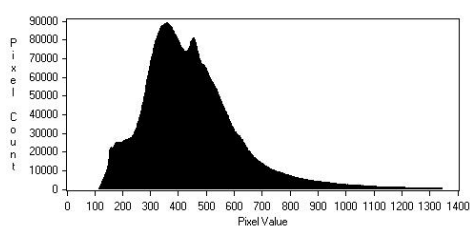
3.5.1. Histogramas de *DNs* sobre imágenes PAN.

La Tabla III.3 muestra los valores estadísticos obtenidos en los histogramas de las imágenes PAN GE-1 Geo y WV-2 ORS2A, cuyas características se han descrito en las Tablas III.1 y III.2. El estudio radiométrico se realizó sobre estas imágenes, ya que están proyectadas sobre un plano de referencia y ambos formatos han sufrido un tratamiento radiométrico y geométrico parecido tras ser adquiridas. Teniendo en cuenta aproximadamente el mismo número de píxeles que representan la zona de trabajo (Fig. III.1) en las seis imágenes PAN GE-1 Geo (GE11, GE12 y GE13) y WV-2 ORS2A (WV21, WV22 y WV23), podemos observar que la media de los *DNs* es generalmente menor para las imágenes PAN WV-2 ORS2A que la obtenida para las imágenes GE-1 Geo. En dicha tabla también se observa que las imágenes PAN de WV-2 presentan una gran compresión de los *DNs* (los valores de las desviaciones estándar son menores) si los comparamos con los obtenidos a partir de los histogramas de las imágenes PAN de GE-1. Además, los *DNs* de las imágenes de GE-1 Geo varían en un rango mayor que las imágenes WV-2 ORS2A, ya que todas las imágenes GE-1 Geo tiene un rango de 1 a 2047 *DNs*, mientras que la imagen WV-2 ORS2A presenta valores de 43 a 2047 *DNs*.

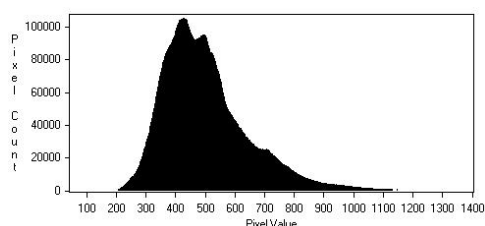
En general, para imágenes de satélites VHR, el pico de los histogramas del nivel de gris suele estar desplazado hacia los valores más oscuros situados en la parte derecha de los histogramas, disminuyendo de forma suave y lenta hacia el mayor de los valores de los *DNs* (Baltsavias *et al.*, 2001, Poli *et al.*, 2010). Los seis histogramas de los *DNs* correspondientes a las seis imágenes PAN estudiadas en esta Tesis (Fig. III.2) encajan bastante bien en este patrón. En la Fig. III.2 podemos observar una mayor compresión de los *DNs* que hemos comentado anteriormente para las imágenes PAN de WV-2 ORS2A.

Tabla III.3. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes PAN originales de GE-1 y WV-2.

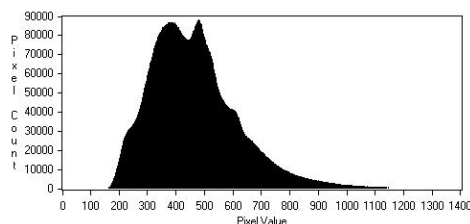
Imagen	No. Píxeles	Media	Moda	Mediana	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
WV21	30849816	503.632	429	476	153.319	43	2047
WV22	30846197	419.258	411	401	123.923	146	2047
WV23	30849816	469.845	393	452	129.966	186	2047
GE11	30849761	452.059	359	421	191.894	1	2047
GE12	30849613	565.759	478	445	161.309	1	2047
GE13	30849613	542.68	419	519	171.525	1	2047



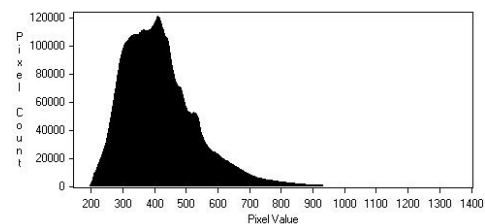
a)



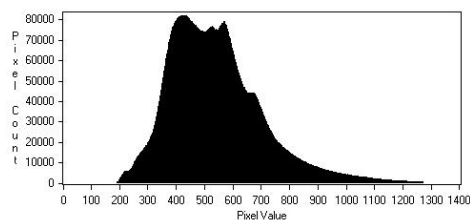
b)



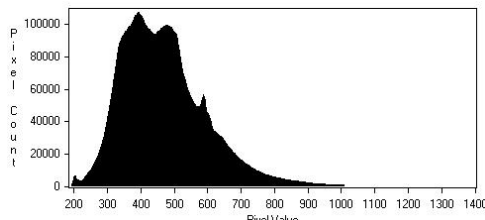
c)



d)



e)



f)

Figura. III. 2. Histogramas de los DN's de las seis imágenes PAN de satélites VHR para toda el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV22, (e) GE13 y (f) WV23.

3.5.2. Inspección visual de imágenes PAN.

La mayor compresión del histograma de valores de grises, en el caso de imágenes de WV-2, parece provocar un efecto borroso o de falta de nitidez en la visualización de las imágenes. Para ilustrar este efecto, la Fig. III.3 representa claramente las diferencias visuales entre las imágenes originales PAN GE-1 Geo y WV-2 ORS2A. En esta figura podemos observar que las imágenes correspondientes a WV-2 aparecen con un efecto borroso y también muestran menos contraste. Este efecto visual puede apreciarse también en la segunda de las figuras del reciente trabajo publicado por Aguiaro *et al.* (2012) en un estudio realizado sobre Trento (Italia). En la Fig. III.4, tomada de Aguiaro *et al.* (2012), se muestran las diferencias radiométricas encontradas entre las imágenes que formaron cada estéreo par de WV-2 (Fig. III. 4a y b) y GE-1 (Fig. III. 4c y d) adquiridas para dicho trabajo, donde se puede observar que las imágenes capturadas con WV-2 tienen una mayor borrosidad y un menor contraste al ser comparadas con las de GE-1.

Hay que tener en cuenta que cuando un proceso de correlación automática basado en áreas (*area based matching*) es llevado a cabo sobre un estéreo par para la obtención de un *DSM*, el efecto borroso de las imágenes podría producir un incremento del porcentaje de éxito en la búsqueda de puntos comunes en el estéreo par. Sin embargo, la precisión alcanzada en los puntos encontrados sería peor. De hecho, esto es lo que se describió en los trabajos de Liu *et al.* (2005) y Shih y Liu (2005), donde se compararon estéreo pares de imágenes aéreas sin comprimir (formato TIF) con las mismas imágenes sometidas a distintos grados de compresión (formato JPGE2000). La compresión de las imágenes usadas en estos últimos trabajos produjo la presencia de un efecto borroso en las imágenes.



a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fig. III.3. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m): (a) Imagen PAN GE11, (b) Imagen PAN WV21, (c) Imagen PAN GE12, (d) Imagen PAN WV22, (e) Imagen PAN GE13 y (f) Imagen PAN WV23.

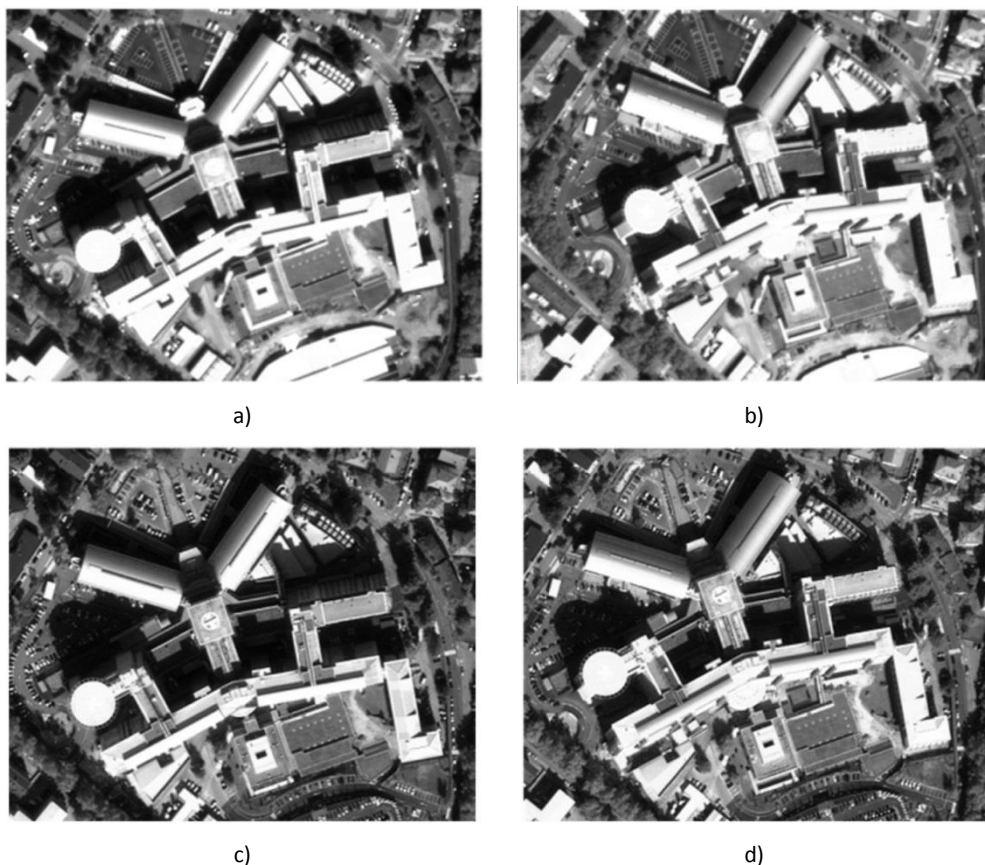


Figura III. 4. Imagen tomada de Aguiaro *et al.* (2012), donde se representan las imágenes de una misma zona de edificios de los satélites WV-2 (a y b) y GE-1 (c y d).

3.5.3. Evaluación de la calidad de imágenes *PAN* mediante ratios.

La Tabla III.4 muestra los valores de los índices *Br* y *Nr* obtenidos en las imágenes *PAN* sobre las cinco áreas estudiadas. Respecto a *Br*, las imágenes GE-1 Geo *PAN* presentaron valores medios para las cinco áreas consideradas de 0.392, 0.389 y 0.496 para GE11, GE12 y GE13 respectivamente. Estos valores globales fueron mucho menores que los generados a partir de las imágenes de WV-2 ORS2A (0.787, 0.919 y 0.902 para WV21, WV22 y WV23). Esas diferencias confirman, de forma cuantitativa, lo que habíamos apreciado en los histogramas y mediante la inspección visual.

Tabla III.4. Ratios de borrosidad (*Br*) y ruido (*Nr*) para cada una de las imágenes PAN de GE-1 y WV-2.

Imagen ID	Ratio	Áreas					Media
		U1	U2	M1	M2	B	
GE11	<i>Br</i>	0.285	0.322	0.326	0.356	0.670	0.392
	<i>Nr</i>	0.377	0.352	0.379	0.360	0.410	0.376
GE12	<i>Br</i>	0.292	0.265	0.354	0.344	0.690	0.389
	<i>Nr</i>	0.375	0.358	0.383	0.365	0.420	0.380
GE13	<i>Br</i>	0.377	0.391	0.456	0.439	0.816	0.496
	<i>Nr</i>	0.371	0.368	0.384	0.363	0.417	0.381
WV21	<i>Br</i>	0.701	0.777	0.733	0.749	0.976	0.787
	<i>Nr</i>	0.381	0.382	0.386	0.390	0.429	0.394
WV22	<i>Br</i>	0.879	0.922	0.895	0.904	0.996	0.919
	<i>Nr</i>	0.384	0.378	0.394	0.384	0.426	0.393
WV23	<i>Br</i>	0.850	0.909	0.865	0.893	0.995	0.902
	<i>Nr</i>	0.379	0.378	0.387	0.364	0.423	0.386

Además, y para cada sensor, los valores de *Br* fueron más altos a medida que aumentaba el ángulo off-nadir (ángulo complementario al ángulo de elevación en el momento de obtener la imagen). En este mismo sentido, problemas de imágenes borrosas causados por la inestabilidad del sensor fueron reportados por Zhang (2005) trabajando sobre imágenes tomadas desde un vehículo no tripulado (*UAV*). El comportamiento de *Br* con respecto al ángulo off-nadir y al tipo de uso de suelo estudiado es mostrado en la Fig. III.5 (para GE-1) y en la Fig. III.6 (para WV-2). Hay que subrayar que las diferencias en los valores de *Br* para GE-1 y WV-2 fueron mucho menores sobre la zona de suelo desnudo (*B*). En este sentido, las zonas urbanas y mixtas (*U1*, *U2*, *M1* y *M2*) presentaron valores de *Br* más bajos en el caso de GE-1, debido, sobre todo, al mayor contenido de bordes presentes en este tipo de coberturas. Por otro lado, y en lo referente a *Nr*, valores muy similares fueron calculados para ambos tipos de sensores.

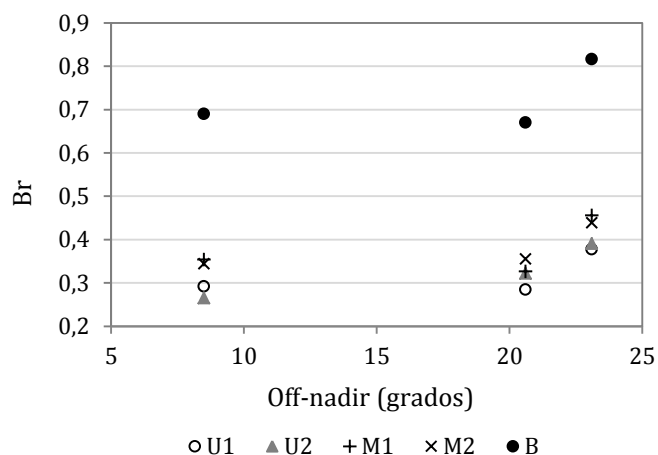


Figura III.5. Comportamiento del ratio Br con el ángulo off-nadir y el tipo de suelo para las imágenes PAN de GE-1.

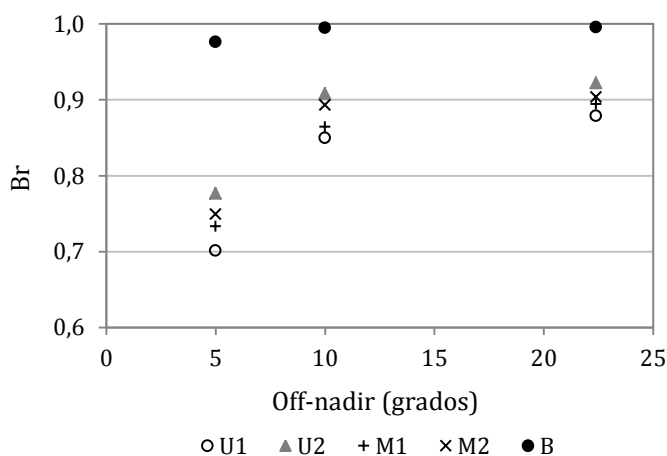


Figura III.6. Comportamiento del ratio Br con el ángulo off-nadir y el tipo de suelo para las imágenes PAN de WV-2.

3.6. RESULTADOS DE CALIDAD RADIOMÉTRICA PARA IMÁGENES *MS*.

Con respecto a las imágenes *MS*, los resultados van a ser analizados del mismo modo que los procedentes de las imágenes *PAN*, *i.e.* histogramas de *DN*s, inspección visual y cálculo de índices Nr y Br .

3.6.1. Histogramas de *DN*s sobre imágenes *MS* (bandas *R*, *G*, *B* y *Nir*).

Un estudio similar al realizado para las imágenes *PAN* fue llevado a cabo para las cinco imágenes *MS* GE-1 Geo y WV-2 ORS2A.

Tabla III.5. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes *MS* de GE-1 y WV-2 en el conjunto de bandas *MS1*.

Imagen	Bandas	No. Píxeles	Media	Moda	Mediana	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo
WV21	Red	1928126	307.702	308	295	114.552	52	1941
	Green	1928126	494.479	423	476	139.945	144	2047
	Blue	1928126	341.871	346	333	78.9838	152	1981
	NIR1	1928126	424.449	371	407	122.184	21	2047
WV23	Red	1928126	489.613	535	477	161.196	129	1635
	Green	1928126	472.49	403	461	115.975	194	1478
	Blue	1928126	331.305	307	325	63.6308	187	1020
	NIR1	1928126	635.687	597	619	173.311	80	1799
GE11	Red	1928150	464.268	488	444	206.79	70	2047
	Green	1928150	480.665	437	459	161.672	166	2047
	Blue	1928150	595.079	553	576	157.784	308	2047
	NIR	1928150	694.747	621	675	236.959	25	2047
GE12	Red	1928103	492.646	529	482	180.724	126	2047
	Green	1928103	502.968	545	490	138.506	210	2047
	Blue	1928103	612.093	636	600	133.832	357	2047
	NIR	1928103	671.321	614	652	197.898	113	2047
GE13	Red	1928103	573.476	628	561	195.7	149	1777
	Green	1928103	587.476	486	573	149.749	259	1833
	Blue	1928103	716.466	658	702	146.052	423	2047
	NIR	1928103	775.52	739	759	211.021	130	2047

En la Tabla III.5 se muestra la comparación entre los valores estadísticos obtenidos a partir de los histogramas de las imágenes en relación al conjunto de bandas clásicas *MS* comunes a los dos satélites (*i.e.*, las cuatro bandas *MS* para GE-1, *R*, *G*, *B* y *NIR*, y las bandas *MS1* para WV-2, *R*, *G*, *B* y *NIR1*). La media de los *DN*s obtenidos a partir de los histogramas de las imágenes *MS* WV-2 ORS2A (300-650 *DN*s) son menores que los valores obtenidos por las imágenes GE-1 Geo (400-800

DNs). Además, también observamos que las imágenes WV-2 ORS2A muestran una mayor compresión de los histogramas (los valores de las desviaciones estándar son menores), especialmente para la banda *Blue*.

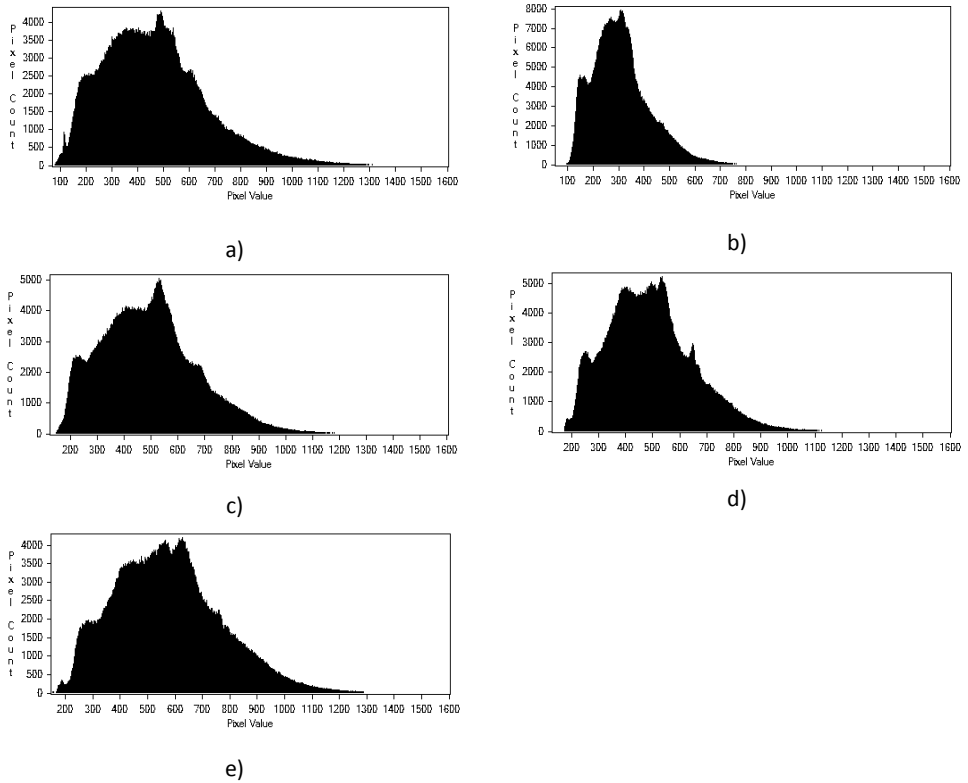


Fig. III.7. Histogramas de los DNs de la banda *Red* de las cinco imágenes *MS* de satélites *VHR* sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

Las Figuras III.7, III.8, III.9 y III.10 muestran los histogramas obtenidos para cada una de las bandas clásicas *MS* cuyas estadísticas se mostraron en la Tabla III.5. Podemos observar que las cuatro bandas que conforman *MS1* en las imágenes WV-2 ORS2A están comprimidas respecto a los histogramas presentados por las imágenes *MS* GE-1 Geo, aunque es la banda *Blue* la que presenta un mayor grado de compresión en las dos imágenes WV-2 ORS2A. Gini (2010) realizó un estudio radiométrico previo al desarrollo de su trabajo sobre obtención de *DSMs* a partir de imágenes aéreas tomadas con vehículos no tripulados con la finalidad de seleccionar el mejor canal para optimizar el proceso de correlación automática

(*matching*). Fue precisamente el canal azul el que presentó peores resultados de *matching* debido a su mayor borrosidad.

Es importante tener en cuenta esta comprensión de los histogramas al realizar trabajos de clasificación, donde las diferencias radiométricas entre ambos sensores pueden afectar los resultados de precisión de la clasificación.

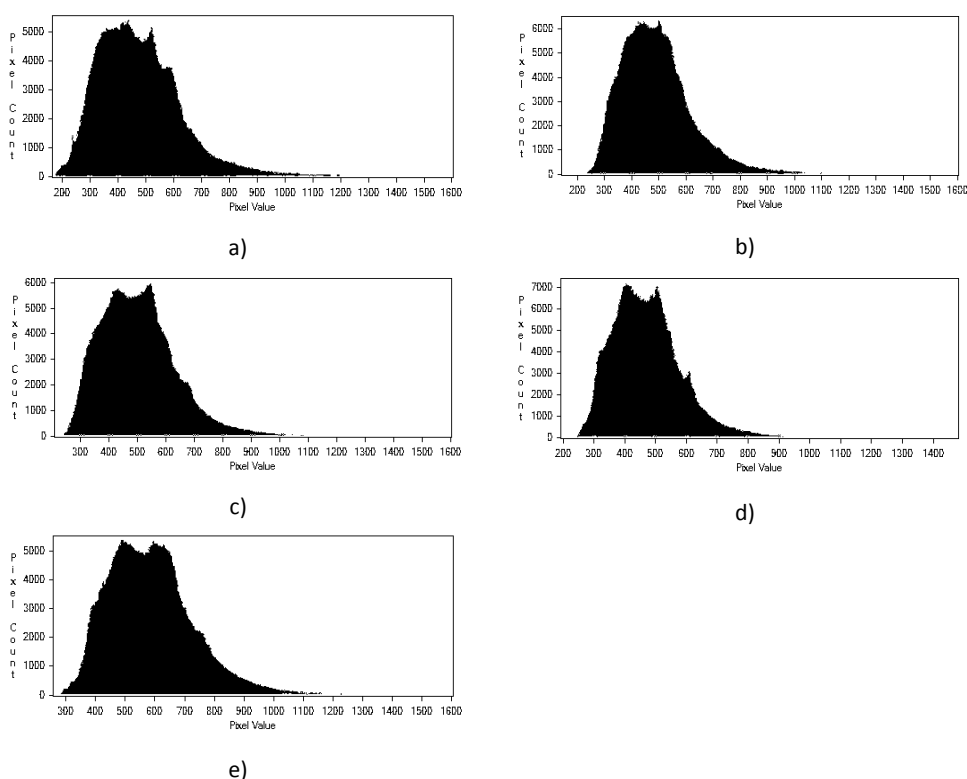


Fig. III.8. Histogramas de los DN's de la banda *Green* de las cinco imágenes *MS* de satélites *VHR* sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

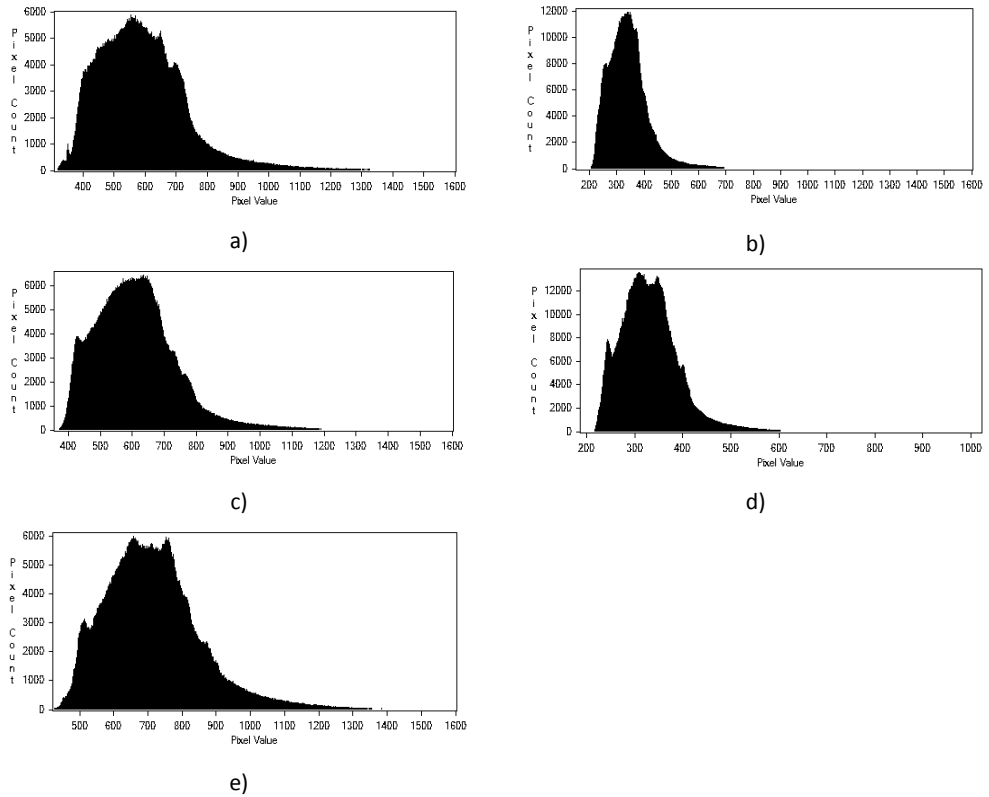


Fig. III.9. Histogramas de los *DNs* de la banda *Blue* de las cinco imágenes *MS* de satélites *VHR* sobre todo el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

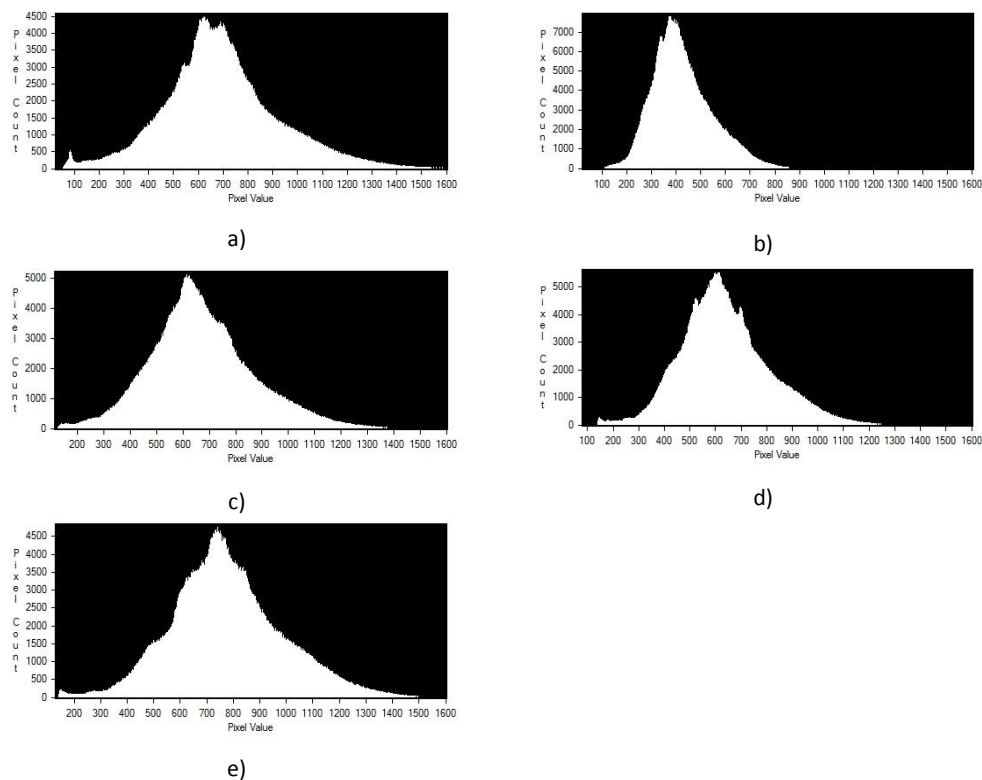


Fig. III.10. Histogramas de los DNs de la banda NIR (GE-1) y NIR1 (WV-2) de las cinco imágenes MS sobre el área de trabajo: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

3.6.2. Inspección visual de imágenes MS (bandas R, G, B y Nir).

En un primer análisis visual de las imágenes MS WV-2 ORS2A compuestas por las bandas RGB (Fig. III.11) no podemos apreciar el efecto borroso que anteriormente veíamos en las imágenes PAN, posiblemente debido al aumento del tamaño de píxel de 0.5 m a 2 m.

Realizando un análisis visual directo de cada banda que conforma el conjunto MS1 sobre una zona concreta de la imagen (140 m x 140 m) y para cada imagen MS estudiada de GE-1 y WV-2, podemos observar que en ninguna de las bandas que conforman el grupo MS1 se muestran diferencias visuales importantes entre las imágenes MS GE-1 Geo y WV-2 ORS2A (*i.e.*, Fig. III.12, Fig. III.13, Fig. III.14 y Fig. III.15). Incluso en la Figura III. 12, que representa la banda Blue, y que según se muestra en la Tabla III. 3 presenta una compresión notable en los DNs respecto a las demás imágenes y bandas, no se aprecian diferencias importantes.

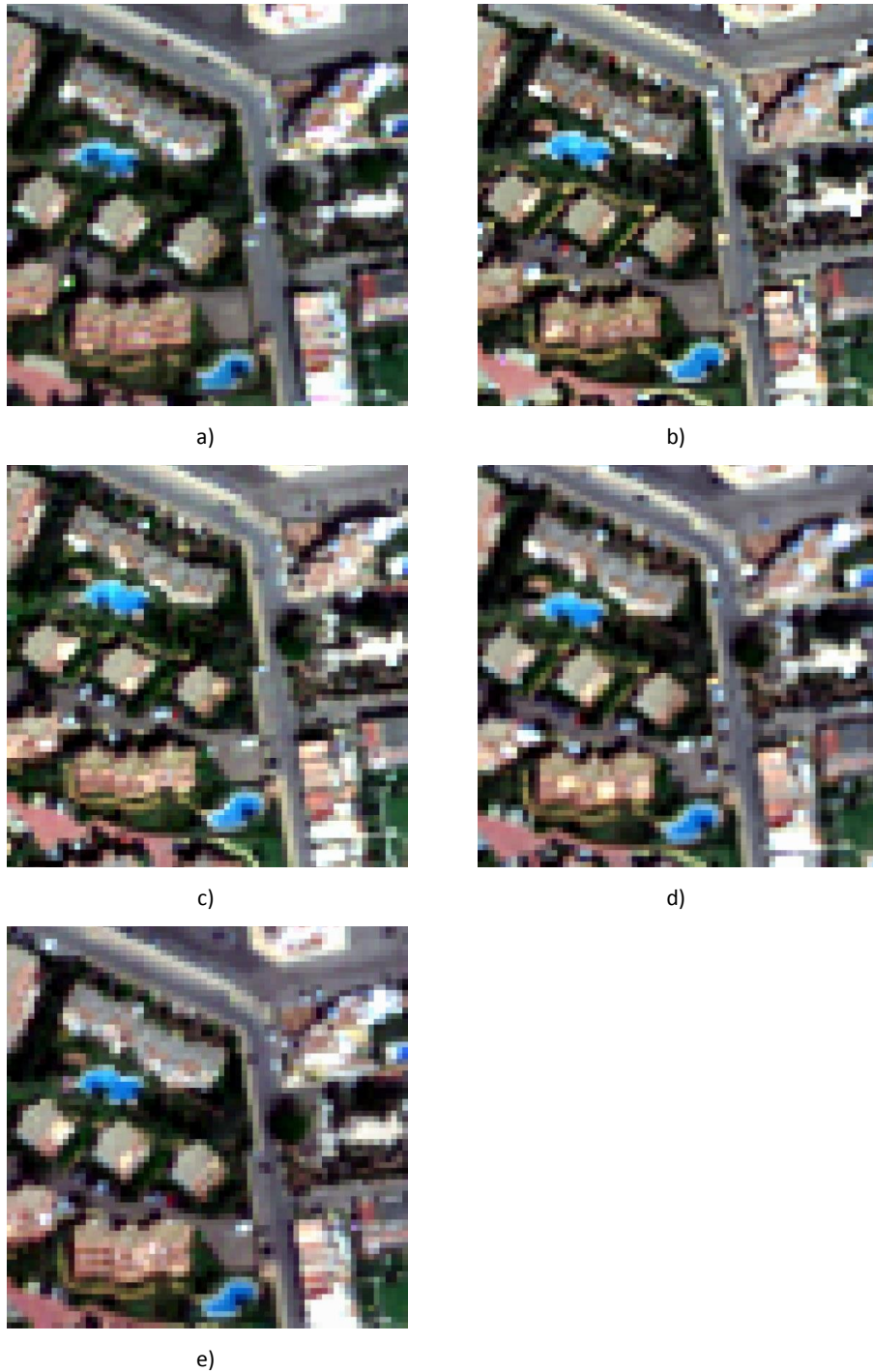


Fig. III.11. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) en las bandas RGB: (a) Imagen MS GE11, (b) Imagen MS WV21, (c) Imagen MS GE12, (d) Imagen MS WV23, (e) Imagen MS GE13.



a)



b)



c)



d)



e)

Fig. III.12. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda *Red* de las imágenes *MS*: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

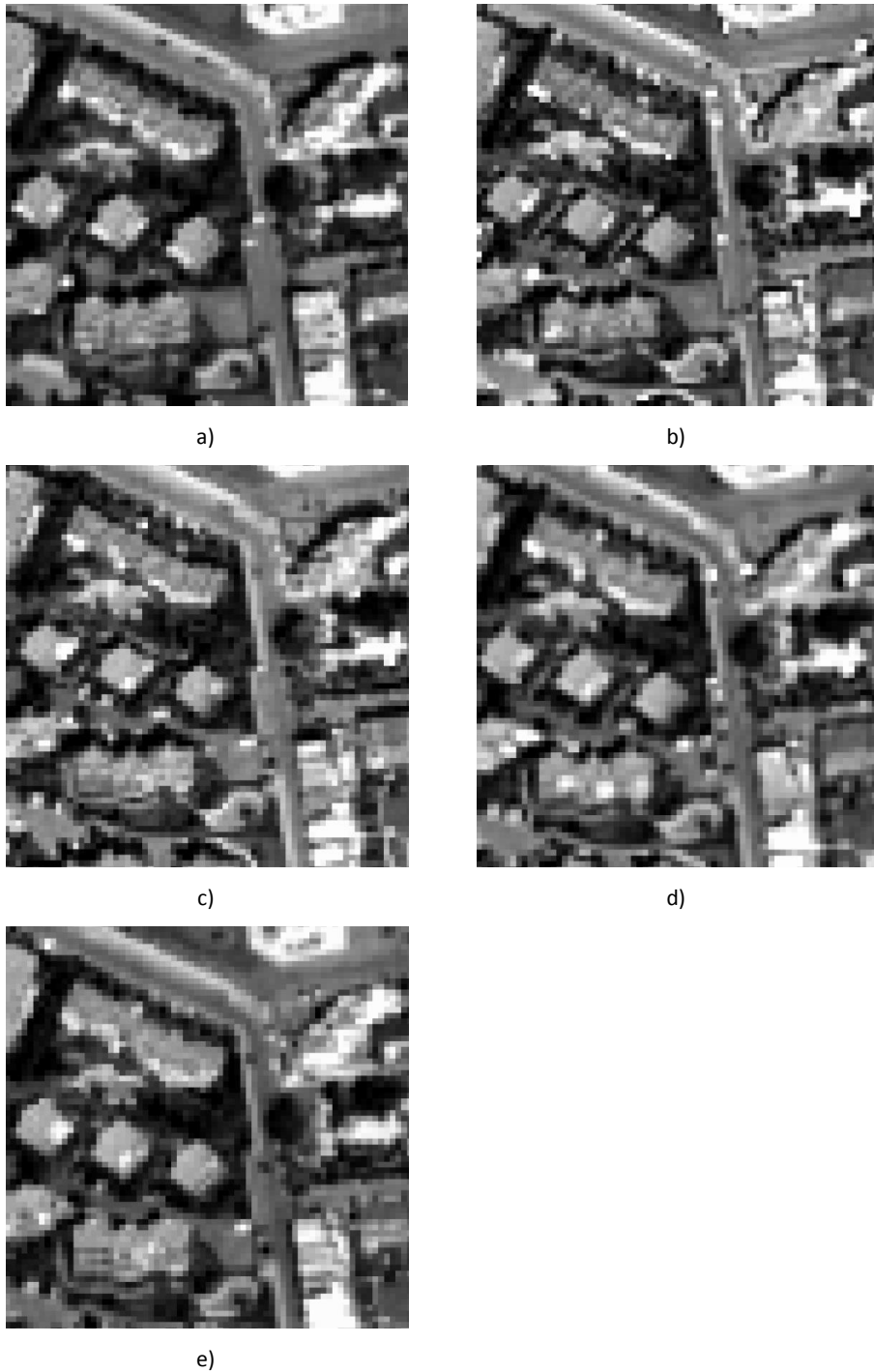


Fig. III.13. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda *Green* de las imágenes *MS*: (a) GE11, (b) *MS* WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.



a)



b)



c)



d)



e)

Fig. III.14. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda *Blue* de las imágenes *MS*: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

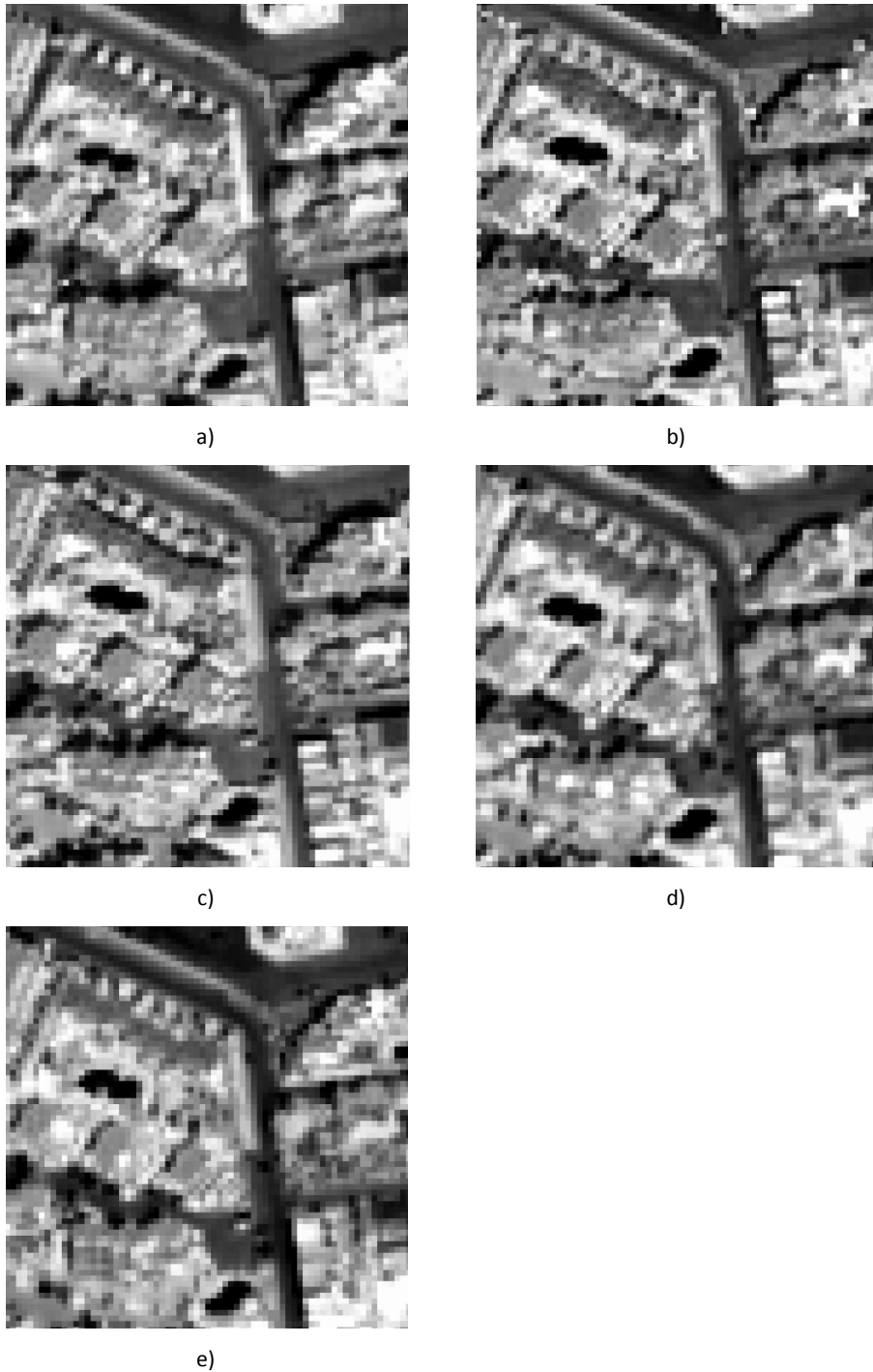


Fig. III.15. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para la banda *NIR* (GE-1) y *NIR1* (WV-2) de imágenes *MS*: (a) GE11, (b) WV21, (c) GE12, (d) WV23, (e) GE13.

3.6.3. Histogramas de *DN*s e inspección visual sobre el conjunto de bandas *MS2* de *WV-2*.

Un análisis similar al descrito en los apartados anteriores fue llevado a cabo para el grupo de bandas *MS2* de las dos imágenes *MS* de *WV-2*. Tal y como se muestra en la Tabla III.6, los valores obtenidos de los histogramas para la imagen *WV23* parecen estar más comprimidos, ya que las desviaciones estándar de dicha imagen son menores si las comparamos con los valores obtenidos para la imagen *WV21*.

Tabla III.6. Estadísticas del Histograma para toda el área de trabajo correspondiente a las imágenes *MS* originales de *WV-2* correspondientes al conjunto de bandas *MS2*.

Imagen ID	Bandas	No. Píxeles	Media	Moda	Mediana	Desv. Estándar	Mínimo	Máximo
WV21	Coastal	1928126	496.904	493	489	78.137	279	2017
	Yellow	1928126	579.068	604	555	194.633	132	2047
	Red-edge	1928126	597.251	536	566	173.024	82	2047
	NIR2	1928126	625.365	564	604	175.511	61	2047
WV23	Coastal	1928126	487.821	472	482	60.705	355	1186
	Yellow	1928126	548.444	454	534	163.232	155	1719
	Red-edge	1928126	534.674	533	517	144.639	95	1582
	NIR2	1928126	535.522	509	525	145.745	44	1609

Al igual que en el caso de las imágenes *PAN* y las imágenes *MS* correspondientes al grupo de bandas *MS1*, se realizó un análisis visual directo de cada banda incluida en el conjunto denominado *MS2* sobre una zona concreta de la imagen (140 m x 140 m) para las imágenes *WV21* y *WV23* (Fig. III.16 y Fig. III.17). Podemos apreciar que la compresión apreciada en la Tabla III.6 a partir de los valores de desviaciones estándar parece trasladarse a las imágenes a través de la observación de un efecto borroso en las bandas *MS2* correspondientes a la imagen *WV23*. Este efecto podría ser causado por el ángulo off-nadir, tal y como comentamos anteriormente para las imágenes *PAN*, o debido a otros factores que influyen en la calidad de las imágenes proporcionadas por los satélites *VHR* (Poli *et al.*, 2010) como podría ser el ángulo solar o las condiciones atmosféricas en el momento de la toma.

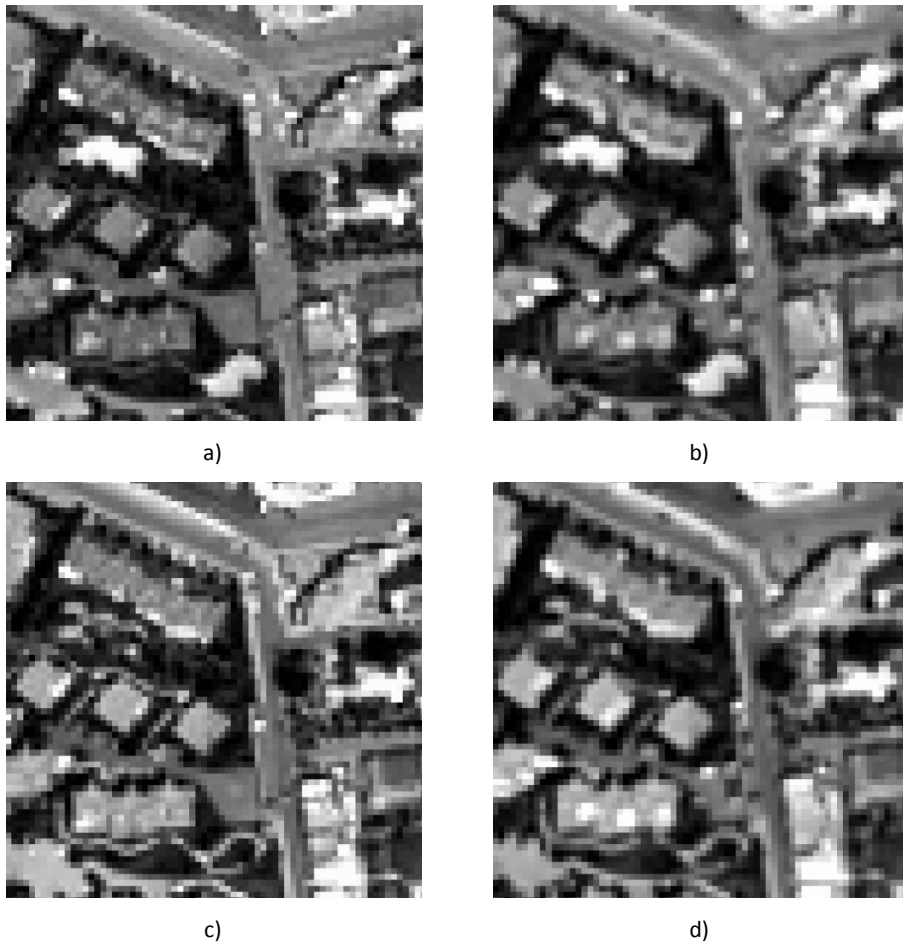


Fig. III.16. Análisis de la calidad visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para las bandas *Coastal* y *Yellow* de las imágenes *MS*: (a) *Coastal* Imagen *MS* WV21, (b) *Coastal* Imagen *MS* WV23, (c) *Yellow* Imagen *MS* WV21, (d) *Yellow* Imagen *MS* WV23.

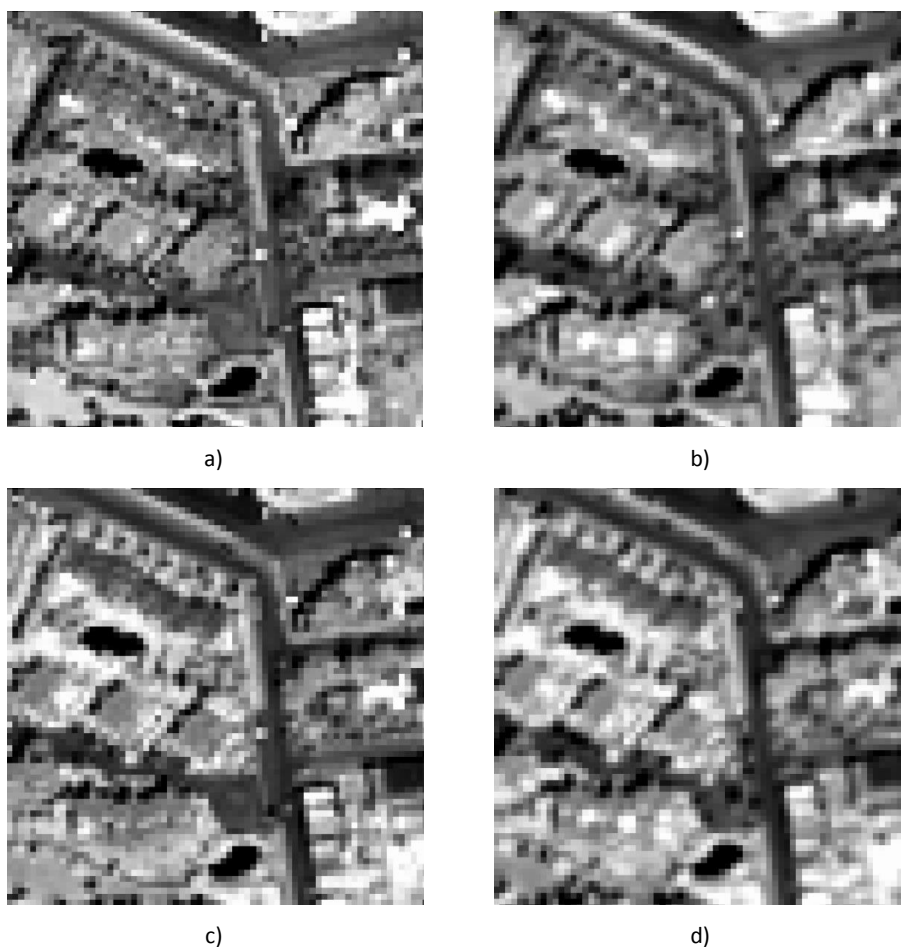


Fig. III.17. Inspección visual sobre una zona limitada (140 m x 140 m) para las bandas *Red Edge* y *NIR2* de las imágenes *MS*: (a) *Red Edge* Imagen *MS* WV21, (b) *Red Edge* Imagen *MS* WV23, (c) *NIR2* Imagen *MS* WV21, (d) *NIR2* Imagen *MS* WV23.

3.6.4. Evaluación de la calidad de las imágenes MS.

En esta sección nos vamos a centrar en los valores del índice Br , ya que ninguna diferencia importante fue detectada entre las imágenes MS de los sensores GE-1 y WV-2 en cuanto al ratio Nr . Así, la Fig. III.18 muestra la comparación entre los valores de Br obtenidos en las cuatro bandas clásicas (R, G, B, Nir) incluidas en ambos sensores, así como su relación con el ángulo off-nadir. Los valores de Br para cada banda en función del ángulo off-nadir muestran un patrón muy similar cuando hay zonas urbanas o mixtas ($U1$, $U2$, $M1$ y $M2$) que se diferencia bastante del obtenido para el uso de suelo agrícola o suelo desnudo (B). Seguramente la existencia de un número muy distinto de píxeles de bordes para ambos tipos de coberturas del suelo podría ser la razón que explicara este comportamiento desigual.

Los valores más altos de Br estuvieron asociados a ángulos off-nadir elevados, pudiendo establecerse una clara relación. Además, las bandas MS de GE-1 presentaron valores algo inferiores de Br (i.e. menor borrosidad) que las cuatro bandas clásicas de WV-2 ($MS1$), aunque las diferencias no fueron tan grandes como en el caso de las imágenes PAN . De igual forma que con las imágenes PAN , las mayores diferencias de borrosidad fueron observadas sobre las zonas urbanas, no existiendo apenas diferencias en la zona de suelo desnudo y/o agrícola catalogada como B .

Con respecto a las nuevas bandas $M2$ de WV-2, la Fig. III.19 muestra los ratios Br calculados en las cinco áreas estudiadas ($U1$, $U2$, $M1$, $M2$ y B). La banda *Coastal* fue la que mostró los mayores niveles de borrosidad, incluso mayores que la banda *Blue* estudiada anteriormente y mostrada en la Fig. III.18. Todas y cada una de las nuevas bandas del satélite WV-2 mostraron estar claramente influenciadas por el ángulo off-nadir con el que fue capturada la imagen, y en todos los tipos de terrenos estudiados. Las distintas bandas recogidas en la Fig. III.19 mostraron distinta borrosidad dependiendo del tipo de cobertura estudiada. En general, se observó una menor borrosidad en áreas con mayor presencia de edificios y, por tanto, con mayor número de píxeles clasificados como bordes.

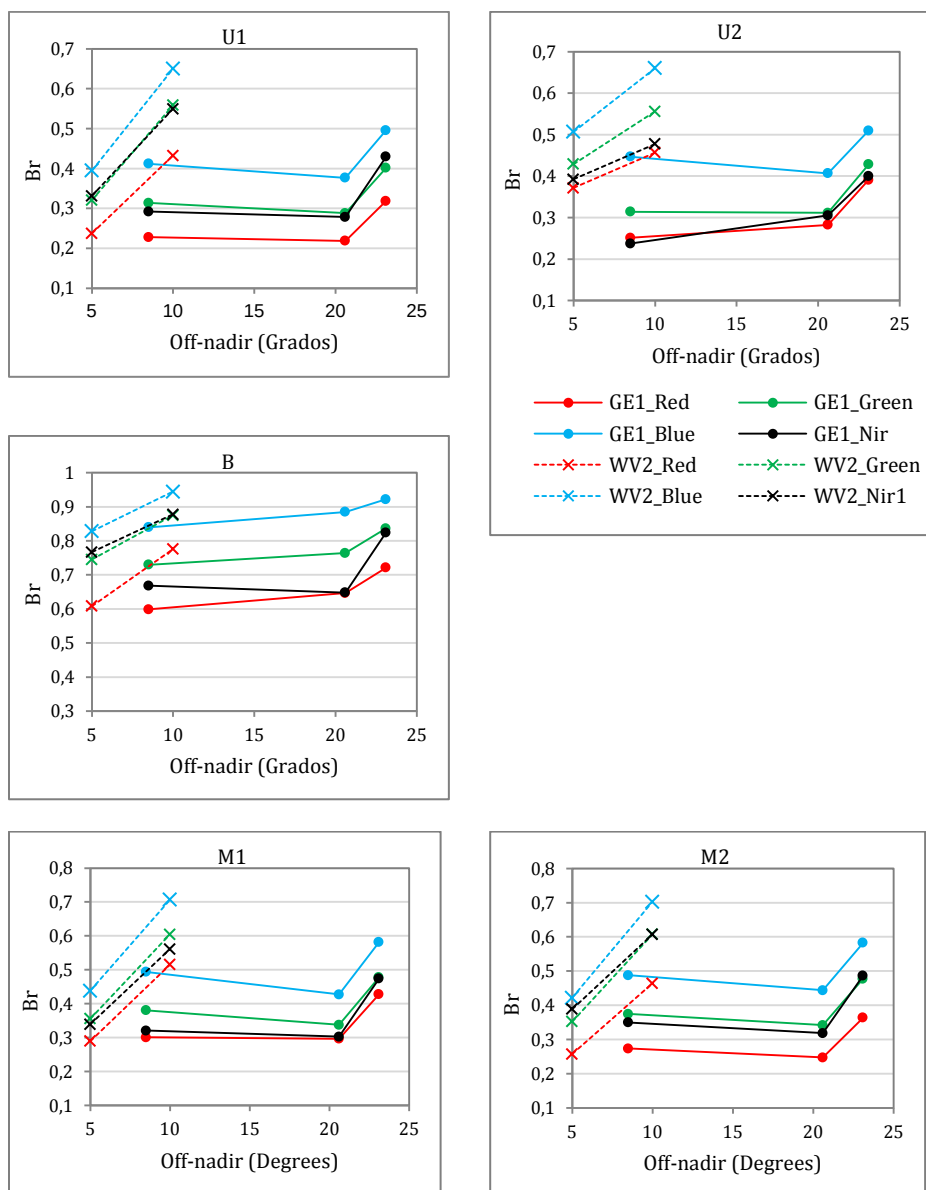


Fig. III.18. Comportamiento del ratio de borrosidad (Br) en función del ángulo off-nadir y el tipo de uso del suelo para las bandas MS de GE-1 y $MS1$ de WV-2.

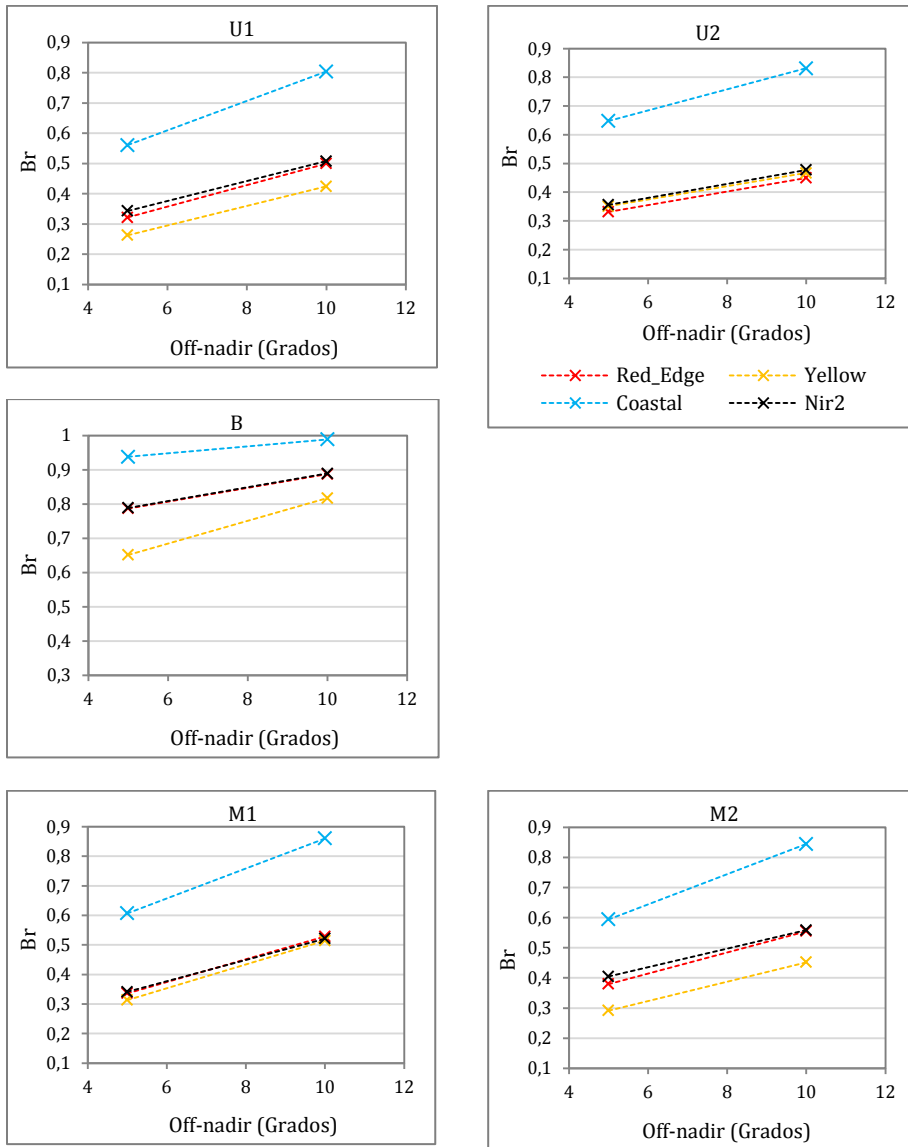


Fig. III.19. Comportamiento del ratio de borrosidad (Br) en función del ángulo off-nadir y el tipo de uso del suelo para las bandas $MS2$ de WV-2.

3.7. CONCLUSIONES

Importantes diferencias radiométricas fueron encontradas entre las bandas comunes de las imágenes WV-2 y GE-1 empleadas en esta Tesis Doctoral. Estas diferencias consistieron principalmente en: (i) una mayor compresión en el histograma de los *DN*s para las imágenes WV-2 ORS2A respecto a las imágenes GE-1 Geo, (ii) unos valores de borrosidad (*Br*) mayores para WV-2 y, (iii) sensibles diferencias visuales que ponen de manifiesto una mayor nitidez de las imágenes GE-1 en comparación con las imágenes WV-2, especialmente en caso de las imágenes *PAN*. Estos hallazgos podrían tener implicaciones importantes en los resultados obtenidos a partir de los procesos de clasificación automática de imágenes *MS* e incluso en la extracción de *DSMs* a partir de estéreo pares de imágenes *PAN*. Estos aspectos serán estudiados con detalle en sucesivos capítulos de esta Tesis.

Aunque la compresión de los histogramas de los *DN*s encontrada tanto en las imágenes *PAN* como *MS* de WV-2 ORS2A podría estar relacionada con aspectos operacionales de la toma de las imágenes, como el ángulo de visión del sensor (off-nadir), ángulo solar ó condiciones atmosféricas, nuestra hipótesis es que dicha compresión podría ser debida a las características propias de ambos sensores, o a los diferentes post-procesos realizados por las empresas suministradoras de dichas imágenes. De todos modos los resultados obtenidos deberían ser contrastados con otros estudios realizados sobre un mayor número de imágenes.

Para cada sensor, los valores de *Br* fueron mayores al aumentar el ángulo off-nadir. Este efecto borroso fue asociado a la inestabilidad del sensor en ángulos muy inclinados, trabajando con imágenes digitales de matriz lineal provenientes de *UAV*. Respecto al índice *Nr*, no se encontraron diferencias significativas entre las imágenes GE-1 Geo y las tomadas por WV-2 (ORS2A).

Otra hipótesis explicativa de las diferencias observadas podría ser que la tecnología *TDI* empleada por ambos sensores para la captura de las imágenes podría influir directamente en su calidad radiométrica, ya que la acumulación de señal con esta tecnología provoca un efecto de suavizado digital y pérdida de contraste. El hecho de que las imágenes de satélite *PAN VHR* de GE-1 utilicen 16

fases *TDI*, mientras que las imágenes de WV-2 emplean 32 fases *TDI*, podría contribuir al efecto borroso observado en las imágenes de WV-2.

También, el hecho de que WV-2 está sensiblemente más alejado de la superficie terrestre que GE-1 podría ser relevante. Por otra parte, la dispersión y absorción que provoca la atmósfera en la radiación que alcanza al sensor (radiancia) reducen el número de *NDs* en las imágenes, especialmente en las longitudes de onda más cortas.

3.8. BIBLIOGRAFÍA

Agugiario, G., Poli, D., Remondino, F., 2012. Testfield Trento: Geometric evaluation of very high resolution satellite imagery. Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, (Vol. XXXIX-B8), XXII ISPRS Congress, 25 August - 1 September, Melbourne, Australia.

Baltsavias, E., Pateraki, M., Zhang, L., 2001. Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo images and their use for 3D building modelling. Joint ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space 2001, Hannover, Germany, 19-21 September.

Choi, T., 2002. IKONOS Satellite on Orbit Modulation Transfer Function (MTF) Measurement using Edge and Pulse Method. Master Thesis, South Dakota State University.

Choi, M.G., Jung, J.H., Jeon, J.W., 2009. No-Reference Image Quality Assessment using Blur and Noise. World Academy of Science, Engineering and Technology, 50: 163-167.

Crespi, M., De Vendictis, L., Poli, D., Wolff, K., Colosimo, G., Gruen, A., Volpe, F., 2008. Radiometric quality and DSM generation analysis of CARTOSAT-1 stereo imagery. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol XXXVII. Part B1. Beijing.

Crespi M. y De Vendictis, L., 2009. A Procedure for High Resolution Satellite Imagery Quality Assessment. Sensors, 9: 3289-3313.

Crespi, M., Colosimo, G., De Vendictis, L., Fratarcangeli, F., Perialice, F., 2010. GeoEye-1: Analysis of Radiometric and Geometric Capability. Personal Satellite Services, Second International ICST Conference, PSATS, Rome, Italy, Feb. Revised Selected Papers, 43(7): 354-369.

DigitalGlobe, Inc., 2010. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide. URL: http://www.digitalglobe.com/downloads/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf (último acceso: 25 Enero 2013).

Fraser, C.S., Baltsavias, E., Gruen, A., 2002. Processing of *Ikonos* imagery for submetre 3D positioning and building extraction. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 56: 177-194.

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. URL: http://www.genesiis.com/pdf/2009_geoeye_product_guide.pdf (último acceso: 7 Febrero 2013).

Gini, R., 2010. Processing of high resolution and multispectral aerial images for forest DSM production and tree classification. Master graduation Thesis. Politecnico di Milano. Master of Science in Environmental and Land Planning Engineering.

Liu, J.K., Wu, H.C., Shih, T.Y., 2005. Effects of JPEG2000 on the Information and Geometry Content of Aerial Photo Compression. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 71(2): 157-167.

McCarty, B.A., 2010. Word of the Month - Bit Depth. eMap International's GeoViews. URL: <http://www.emap-int.com/2010/June/article8.html> (last date accessed: 1 Febrero 2013).

Merchant, J.W. y Narumalani, S., 2009. Integrating Remote Sensing and Geographic Information Systems. *The SAGE Handbook of Remote Sensing*; Warner, T.A., Nellis, M.D., Foody, G.M., Eds.; SAGE Publications Ltd: London, UK; pp. 257-268.

Poli, D., Angiuli, E., Remondino, F., 2010. Radiometric and geometric analysis of WorldView-2 stereo scenes. Proceedings of the International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, (Vol. XXXVIII-Part 1), 15-18 June, Calgary, AB, Canada.

Shih, T.Y. y Liu, J.K., 2005. Effects of JPEG 2000 compression on automated DSM extraction: evidence from aerial photographs. *Photogrammetric Record*, 20(112): 351-365.

Zhang, L., 2005. Automatic Digital Surface Model (DSM) Generation from Linear Array Images. Ph.D. Dissertation, no. 88, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland.

CAPÍTULO 4.

ESTUDIO DE LA PRECISIÓN GEOMÉTRICA ALCANZABLE EN LA FASE DE ORIENTACIÓN DEL SENSOR A PARTIR DE IMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2.

4.1. INTRODUCCIÓN.

Los satélites capaces de captar imágenes de la superficie terrestre han evolucionado muy rápidamente desde el año 1972, cuando se pusieron en órbita los primeros satélites destinados a la evaluación de recursos naturales. Fue aquí donde comenzó la explotación de la superficie terrestre mediante las imágenes de satélite, que posteriormente, junto con la fotogrametría digital, se convertiría en una fuente de generación de información espacial que se integraría en los sistemas de información geográfica (*SIG*). Los satélites de muy alta resolución (*VHR*) surgieron junto con la necesidad de alcanzar una mayor precisión en las imágenes, tal y como señalamos en el Capítulo 1 de esta Tesis.

El nivel de procesamiento de las imágenes de satélite hace referencia a las correcciones de tipo radiométrico, geométrico y de georreferenciación que pueden aplicarse a la imagen por parte de la empresa distribuidora. Cada distribuidor tiene sus niveles específicos de procesado, no siendo coincidentes para todas las plataformas satelitales. Se puede adquirir desde una imagen de nivel 0, donde no se incluye corrección alguna, hasta una imagen corregida radiométrica y geométricamente y ortorrectificada. Entre ambas opciones pueden existir varios niveles, aunque siempre se suministra la información y archivos necesarios para que los usuarios puedan procesar la imagen a un nivel superior. Generalmente un mayor nivel de procesado redonda en un mayor precio de la imagen.

La adquisición de imágenes crudas normalmente conlleva la presencia de distorsiones geométricas que hacen que sea imposible su uso directo como productos en *SIG* (Toutin, 2004a). Debido al alto coste de los productos “elaborados” que suministran las casas de satélites *VHR*, resulta muy atractivo el

hecho de generar productos de muy alta resolución a partir de imágenes con un bajo nivel de procesamientos y, por lo tanto, de menor coste (Li *et al.*, 2007).

La extracción de datos, tanto planimétricos como altimétricos, de alta precisión a partir de imágenes de satélite *VHR* es uno de los temas que suscitan mayor interés en la comunidad científica debido a su potencial aplicación en diversos ámbitos. El primer paso para obtener productos precisos como ortoimágenes o modelos digitales de superficies (*DSMs*) sería realizar la orientación del sensor. Para llevar a cabo esta tarea es necesario usar modelos de sensores o modelos de corrección geométrica que relacionan las coordenadas en el espacio objeto (X, Y, Z) con su correspondiente posición bidimensional en el espacio imagen (x, y).

Estos modelos se pueden dividir en tres grupos: (i) modelos matemáticos no rigurosos o empíricos, (ii) modelos matemáticos rigurosos o físicos y (iii) modelos híbridos.

(i) Los modelos matemáticos no rigurosos o empíricos pueden relacionar las coordenadas imagen (x, y) con las coordenadas objeto (X, Y, Z) sin ninguna información física sobre el sensor o efemérides del satélite. En ausencia de dicha información, las funciones racionales se introducen por muchos investigadores como modelos matemáticos que establecen la relación entre ambos sistemas de coordenadas (imagen y objeto) de una forma convencional (*e.g.* Tao y Hu, 2001; Grodecki y Dial, 2003; Fraser y Hanley, 2005) o de una manera más innovadora (*e.g.* Valadan Zoej *et al.*, 2007). Actualmente, los modelos de funciones racionales en forma de coeficientes de polinomios racionales (*Rational Polynomial Coefficient, RPCs*) son suministrados junto con las imágenes de satélite *VHR* para describir la información de la orientación en estas imágenes de alta resolución (Li *et al.*, 2007). Estos *RPCs*, suministrados por el proveedor y compensados en el espacio imagen mediante un número de puntos de control (*GCPs*) 3D de alta precisión, son el modelo de sensor más usado para llevar a cabo la orientación del sensor en el caso de imágenes de satélite *VHR*. Por ejemplo, Fraser y Ravanbakhsh (2009) consiguen elevadas precisiones de georreferenciación trabajando con un estéreo par de GE-1

y usando los *RPCs* suministrados por la propia empresa *GeoEye* con el soporte de un solo *GCP*, mejorando los resultados alcanzados con satélites anteriores como *IKONOS* o *QuickBird*.

(ii) Los modelos físicos matemáticos o modelos rigurosos 3D describen con precisión las relaciones entre el espacio imagen y el espacio objeto. El uso de este grupo de modelos depende de la disponibilidad y calidad de la información del sensor y los datos de las efemérides que nos proporcionen. Además, la formulación del modelo matemático riguroso puede cambiar de un sensor a otro (Shaker, 2008). Sin embargo, algunos modelos rigurosos son más generales y pueden ser usados para diferentes sensores. Las imágenes básicas proporcionadas por *DigitalGlobe*, se entregan con un conjunto de archivos de metadatos que incluyen toda la información sobre las efemérides, calibración geométrica y modelo de la cámara. Debido a esto, muchos modelos físicos de sensor sólo trabajan con este tipo de imágenes (*e.g.* Dolloff y Settergren, 2010; Deltsidis y Ioannidis, 2011). En estudio previos, realizados sobre imágenes básicas de *Quickbird*, se ha demostrado que los modelos rigurosos han sido la mejor opción (*e.g.* Wolniewicz, 2004; Aguilar *et al.*, 2007). Sin embargo, los resultados obtenidos con imágenes de *IKONOS* o *GE-1* no suelen ser tan buenos (Wolniewicz, 2004; Aguilar *et al.*, 2008a; Crespi *et al.*, 2010). Recientemente, Capaldo *et al.* (2012) compararon dos modelos rigurosos de sensor diferentes con estéreo pares de *WV-2* y *GE-1*. En ambos casos, y tras la orientación del sensor mediante el software *SISAR*, desarrollado en el *Area di Geodesia e Geomatica (Università di Roma, La Sapienza)*, alcanzó mejores resultados que el modelo físico 3D incluido en *PCI Geomática OrthoEngine (PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canadá)*. Cabe destacar que estos resultados se estimaron a partir de un número de puntos independientes de control (*Independent Check Points, ICPs*) extremadamente pequeño. Generalmente los modelos matemáticos rigurosos son más precisos que los modelos empíricos ya que consideran la información específica de cada sensor, aunque es importante el desarrollo de modelos alternativos que sean independientes de dicha información para permitir, en la medida de lo posible, su empleo sobre imágenes procedentes de cualquier satélite *VHR*.

(iii) Por último, el modelo híbrido se basa en el modelo determinista de Toutin y utiliza las mismas ecuaciones matemáticas basadas en la condición de colinealidad y coplanariedad que los modelos rigurosos. Sin embargo, en vez de usar los tradicionales *GCPs* tomados por el usuario para resolver las ecuaciones, utiliza *GCPs* virtuales calculados con modelos de funciones racionales (Toutin *et al.*, 2012).

En este capítulo se realiza un estudio exhaustivo de la precisión alcanzada en la fase de orientación del sensor de ocho imágenes *PAN* y siete *MS* pertenecientes a los satélites *VHR* GE-1 y WV-2. El objetivo sería el análisis de la influencia de distintos factores en el proceso de orientación: (i) características del sensor y formato de imagen, (ii) modelos matemáticos de sensor empleados, (iii) número de *GCPs* usados para ajustar el modelo de sensor y (iv) ángulo de inclinación de la escena (off nadir).

Es importante reseñar que la mayoría de los resultados que se van a exponer en este Capítulo de Tesis han sido recientemente publicados en dos prestigiosas revistas incluidas en el *Journal Citation Reports (JCR)* en el campo de *Remote Sensing*, como son *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (Aguilar *et al.*, 2012) y *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Aguilar *et al.*, 2013).

4.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA.

4.2.1. Zona de estudio.

La zona de estudio se encuentra situada en la provincia de Almería, al sur de España. Sus principales características pueden encontrarse en el Capítulo 3 de esta Tesis.

4.2.2. Imágenes de satélite de alta resolución.

Para llevar a cabo el estudio de la precisión geométrica alcanzable en la fase de orientación del sensor se han utilizado las imágenes de los satélites GE-1 y WV-

2 descritas en el Capítulo 3 de esta Tesis. Todas las imágenes de satélite *VHR* empleadas fueron adquiridas durante los años 2010 y 2011.

4.2.3. Puntos de control y de comprobación.

Para poder llevar a cabo la orientación del sensor son necesarios puntos de coordenadas conocidas que sean totalmente identificables en las imágenes empleadas para este estudio.

La obtención de coordenadas de los puntos elegidos, que posteriormente serán identificados en la imagen, se realizó con un GPS Topcon Hiper PRO en modo cinemático en tiempo real (*Real Time Kinematic, RTK*), estacionando la base en los vértices geodésicos “Juan Jordana” (Nº 101500, hoja MTN 1015, compensación 1 de noviembre de 2009, IGN) y “Los Pelados” (Nº 101504, hoja MTN 1015, compensación 1 de noviembre de 2009, IGN) para cubrir toda la zona de trabajo. Todos los puntos medidos se encuentran distribuidos de forma homogénea por toda la zona de estudio mencionada anteriormente (Fig. IV.1) y las coordenadas de dichos puntos se refieren al sistema de referencia *European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)*, proyección *Universal Transversal Mercator (UTM)* y huso 30 Norte. El datum vertical está referido al nivel medio del mar en Alicante (cotas ortométricas). Es importante señalar que los puntos medidos debían ser totalmente identificables en las imágenes a tratar. Además, los puntos elegidos como *GCPs* e *ICPs* no deberían presentar cambios con el paso del tiempo (entre la adquisición de la primera y la última imagen empleadas en este trabajo pasaron 11 meses). También conviene indicar que la orientación del sensor llevada a cabo para cada una de las imágenes, tanto en modo *PAN* como en *MS*, se realizó exactamente con los mismos *GCPs* e *ICPs*.

Los trabajos realizados mediante sistemas de posicionamiento global diferencial (*Differential Global Positioning System, DGPS*) se apoyaron en once puntos de campo conocidos, de los cuales cuatro pertenecen a la red geodésica nacional, uno a la red REGENTE (obtenido con técnicas de alta precisión espacial), y seis puntos fueron facilitados por la Red de Información Ambiental de Andalucía (REDIAM). Los valores de *RMSE* obtenidos en los puntos de coordenadas conocidas

tras los ajustes correspondientes fueron de 5.6 cm, 3.3 cm y 7.6 cm en *X*, *Y*, *Z* respectivamente. Para el estudio relativo a la orientación del sensor se seleccionaron y midieron 119 puntos para las imágenes *PAN* y 92 puntos para las imágenes *MS*. Todos estos puntos fueron necesarios para realizar la fase de orientación con los diferentes modelos de sensor ensayados en este capítulo y para las diferentes combinaciones de puntos elegidas. Para ambos tipos de imágenes, *PAN* y *MS*, los puntos medidos se dividieron en *GCPs* e *ICPs*. Los *GCPs* se utilizaron para calcular los diferentes modelos de sensor empleados en la fase de orientación, mientras que los *ICPs* se emplearon exclusivamente para evaluar, de forma independiente (validación verdadera), la precisión de la orientación realizada en dicha fase. En el caso de las imágenes *PAN*, 44 puntos fueron usados como *GCPs* y los restantes 75 puntos fueron empleados como *ICPs*. Para las imágenes *MS*, 42 puntos fueron usados como *GCPs* y 50 puntos como *ICPs* (Fig. IV.1).

Nótese que el número de puntos disminuye en las imágenes *MS* respecto de los disponibles en las imágenes *PAN*. Conviene recordar que en el caso de las imágenes *PAN* la resolución es de 0.5 m, frente a los 2 m que tienen las imágenes *MS*. Esta diferencia de resolución dificultó la localización precisa de algunos de los puntos que, siendo claramente identificables en la imagen *PAN*, no se pudieron marcar sobre las imágenes *MS* (Fig. IV.2). Los puntos de control y comprobación empleados en las imágenes *MS* pueden observarse en la Fig. IV.1.

El error que podemos cometer en la identificación y marcado de un punto determinado en la imagen es conocido como error de punteamiento (*pointing error*). Con el fin de que este error sea mínimo, e influya del mismo modo en todos los procesos realizados para la fase de orientación de sensor de cada imagen de satélite *VHR*, todos los puntos se marcaron una sola vez en cada una de las imágenes *PAN* y *MS* empleadas. En el caso de las imágenes *MS*, la identificación de dichos puntos se realizó sobre las imágenes con visualización *RGB*, tanto para GE-1 como para WV-2.

Se usó un gran número de *ICPs* en ambos tipos de imágenes, ya que la fiabilidad (*reliability*) de la estimación del valor de *RMSE* dependerá, entre otras

variables, del número de *ICPs* que se utilicen para su cálculo. 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* que deben ser, al menos, tres veces más precisos que el producto final que se desea evaluar. Sin embargo, algunos autores sugieren que el número de puntos debería ser sensiblemente mayor para obtener incertidumbres aceptables en el cálculo de las cifras finales de precisión (Li, 1991; Ariza y Atkinson, 2005; Aguilar *et al.*, 2008b).

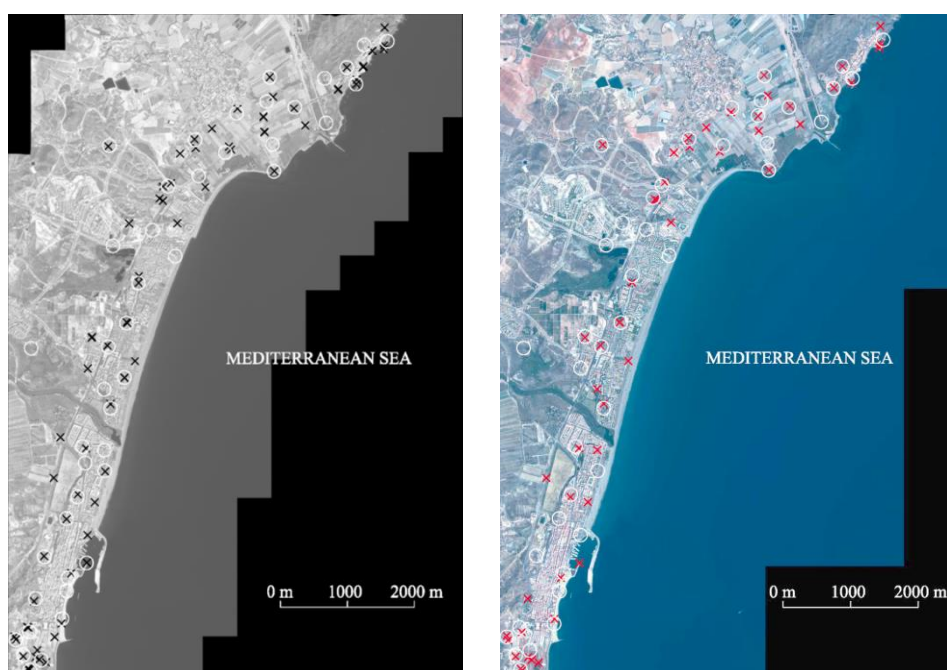


Fig. IV.1. GCPs (cruces) e ICPs (círculos) sobre la zona de trabajo. Izquierda: imagen PAN con 75 ICPs y 44 GCPs. Derecha: imagen MS con 50 ICPs y 42 GCPs.

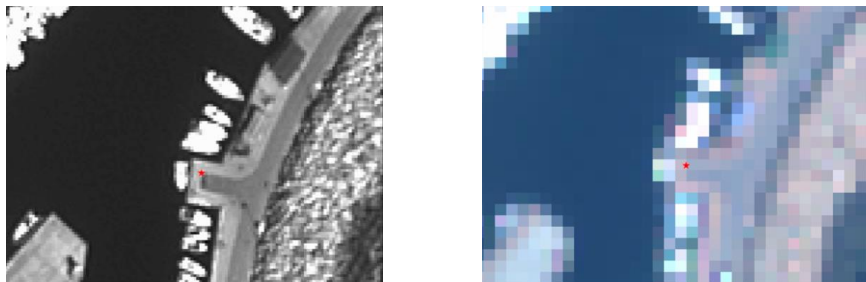


Fig. IV.2. Visualización de un mismo punto identificado en una imagen de GE-1 PAN 0.5 m GSD, a la izquierda, y sobre la imagen MS 2 m GSD a la derecha.

4.3. METODOLOGÍA.

4.3.1. Modelos de sensor.

Un modelo de sensor o modelo de corrección geométrica aplicado en fotogrametría es aquel que permite relacionar la posición de puntos en el espacio objeto con su correspondiente posición bidimensional (2D) en la imagen. En fotogrametría aérea convencional esta relación se resuelve mediante las conocidas ecuaciones de colinealidad (*e.g.* Wong, 1980). Para la corrección de imágenes de satélite se pueden usar diferentes modelos de sensor como: funciones polinómicas 2D, funciones polinómicas 3D, modelos de transformación afín, funciones racionales 3D y modelos físicos 3D (Tao y Hu, 2001; Jacobsen, 2002; Fraser *et al.*, 2002; Fraser y Yamakawa, 2004; Toutin, 2004a).

Cuando se realiza la corrección geométrica de imágenes de satélite VHR, muchos investigadores recomiendan el uso de (i) funciones racionales 3D independientes del terreno que usan los conocidos *RPCs*, y (ii) modelos físicos 3D o modelos rigurosos (Toutin, 2004a; Wolniewicz *et al.*, 2004; Aguilar *et al.*, 2007; Dolloff y Settergren, 2010).

4.3.1.1. Funciones Racionales 3D.

Los modelos matemáticos de funciones racionales 3D (*RFM*) describen la relación entre las coordenadas imagen normalizadas (x, y) y su localización en el

terreno (X, Y, Z) a través de cocientes de funciones polinómicas, normalmente de tercer orden. Los correspondientes coeficientes, junto con los parámetros de escala y offset usados para la normalización de las coordenadas, son conocidos como *RPCs* (Poli y Toutin, 2012).

A partir del modelo físico del sensor, disponible para las empresas suministradoras de imágenes de satélite, los *RPCs* pueden ser resueltos mediante una malla ubicada sobre el espacio terreno cuyos nodos son obtenidos a través del modelo físico (Tao y Hu, 2001). Estos 78 coeficientes, correspondientes a funciones racionales de tercer grado, son suministrados por la empresa proveedora junto con las propias imágenes de satélite *VHR*.

El modelo de Funciones Racionales puede ser aplicado sin el concurso de *GCPs*, lo que se conoce como modelo independiente del terreno. Sin embargo, las precisiones geométricas en la fase de orientación del sensor así obtenidas no son muy buenas. En este sentido es posible alcanzar un valor de *RMSE* cercano a 3 m en el caso de imágenes de GE-1 sin *GCPs*, y de hasta 15 m en el caso de imágenes de satélite QuickBird.

Una posibilidad muy interesante de este método es que el usuario puede mejorar esa precisión inicial mediante el refinado de los coeficientes racionales a partir de la introducción en el modelo de unos pocos *GCPs*.

Los valores iniciales de los *RPCs* pueden ser refinados directa o indirectamente (Hu *et al.*, 2004). Los métodos directos actualizan realmente el conjunto de *RPCs* 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 alterando el valor de los *RPCs* originales. Existen en la literatura especializada 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).

Como hemos dicho anteriormente, el modelo *RFM* está basado en fracciones de polinomios de tercer grado. Para una transformación del espacio terreno al espacio imagen, el modelo matemático se expresaría según la ecuación 1, dónde (*l*, *s*) representan las coordenadas normalizadas de un determinado píxel en el espacio imagen, es decir, la fila y columna que ocupa. Por otro lado (*B*, *L*, *H*) son las coordenadas geodésicas latitud, longitud y altitud normalizadas en el espacio objeto (OGC, 1999; Tao y Hu, 2001; Di *et al.*, 2003; Fraser y Handley, 2005; Habib *et al.*, 2007; Tong *et al.*, 2010).

$$\begin{aligned} l &= \frac{P_1(B, L, H)}{P_2(B, L, H)} \\ s &= \frac{P_3(B, L, H)}{P_4(B, L, H)} \end{aligned} \quad (1)$$

Siendo P_i la función polinómica de tercer orden ($i= 1, 2, 3$ y 4):

$$\begin{aligned} P_i = & c_1 + c_2B + c_3 + c_4H + c_5BL + c_6BH + c_7LH + c_8B^2 + c_9L^2 + \\ & c_{10}H^2 + c_{11}BLH + c_{12}B^3 + c_{13}BL^2 + c_{14}BH^2 + c_{15}B^2L + c_{16}L^3 + \\ & c_{17}LH^2 + c_{18}B^2H + c_{19}L^2H + c_{20}H^3 \end{aligned} \quad (2)$$

Donde c_i son los coeficientes racionales ($i= 1, 2, \dots, 20$). Teniendo en cuenta que el primer coeficiente de cada denominador es igual a la unidad, tenemos 39 coeficientes para cada coordenada, lo que equivale a un total de 78 coeficientes.

La normalización de las coordenadas en la ecuación 1 se calcula mediante (OGC, 1999; Tong *et al.*, 2010):

$$l = \frac{Line - LINE_OFF}{LINE_SCALE} \quad s = \frac{Sample - SAMPLE_OFF}{SAMPLE_SCALE} \quad (3)$$

$$B = \frac{\varphi - LAT_OFF}{LAT_SCALE} \quad L = \frac{\lambda - LONG_OFF}{LONG_SCALE} \quad H = \frac{h - HEIGHT_OFF}{HEIGHT_SCALE} \quad (4)$$

Donde *Line* y *Sample* son las coordenadas imagen, *LINE_OFF* y *SAMPLE_OFF* son los valores del offset en las coordenadas imagen y *LINE_SCALE* y *SAMPLE_SCALE* son los parámetros de escala de las coordenadas imagen. Del mismo modo, φ , λ y h son la latitud, longitud y altitud geodésica en el espacio imagen, *LAT_OFF*, *LONG_OFF* y *HEIGHT_OFF* son los valores del offset para las coordenadas terreno, y *LAT_SCALE*, *LONG_SCALE* y *HEIGHT_SCALE* son los correspondientes factores de escala. Todas las coordenadas son normalizadas de esta forma para un rango (-1, 1).

El modelo *RPC* proporciona una correspondencia matemática entre las coordenadas imagen 2D y las coordenadas terreno 3D. Los 78 *RCPs* proporcionados por el proveedor se calculan a partir del modelo físico de la imagen utilizando *GCPs* virtuales. Debido a los errores producidos en las medidas directas de la fase de orientación del sensor, siempre persisten errores sistemáticos en los *RPCs* proporcionados.

Para corregir los errores sistemáticos se suele realizar una transformación en el espacio imagen cuya forma general puede ser expresada, siguiendo las recomendaciones de (Grodecki y Dial, 2003), como:

$$\begin{aligned} l' &= a_0 + a_1 \cdot l + a_2 \cdot s + a_3 \cdot l \cdot s + a_4 \cdot l^2 + a_5 \cdot s^2 \\ s' &= b_0 + b_1 \cdot s + b_2 \cdot l + b_3 \cdot l \cdot s + b_4 \cdot l^2 + b_5 \cdot s^2 \end{aligned} \quad (5)$$

Donde l' , s' son las coordenadas imagen calculadas a partir de la ecuación (1) y s y l son las coordenadas imagen manualmente medidas en cada *GCP* sobre la imagen de satélite. Los coeficientes a_i y b_i ($i = 0, 1, 2, \dots, 5$) se calcularon usando (l, s) y (l', s') a través de un ajuste de mínimos cuadrados. En el caso de una transformación de orden cero (*RPC0*) en la que solo interviene un *GCP*, se realiza una transformación simple o traslación 2D (a_0 y b_0). Para una transformación afín (*RPC1*) en la que intervienen seis coeficientes (a_0, a_1, a_2, b_0, b_1 y b_2) sólo necesitaríamos dos *GCPs*. Por último, y para una transformación de segundo orden (*RPC2*), se necesitan un mínimo de seis *GCPs*, ya que deben estimarse doce coeficientes ($a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, b_0, b_1, b_2, b_3, b_4, b_5$).

4.3.1.2. Modelos Físicos.

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 *GCPs* (Cheng *et al.*, 2003).

En este trabajo se ha testado un modelo físico 3D desarrollado por el Dr. Toutin en el *Centre for Remote Sensing* de Canada (*CCRS*) (Toutin y Cheng, 2002; Toutin, 2003). Este modelo físico, basado en la ecuación de colinealidad, fue inicialmente desarrollado para sensores de media resolución en la banda visible e infrarroja, así como para imágenes radar (Toutin, 1995). Más tarde fue adaptado para datos de satélite *VHR* (Toutin, 2004b). El modelo *CCRS* requiere un mínimo de 6 *GCPs*.

4.3.2. Precisión geométrica en la orientación de imágenes *PAN*.

4.3.2.1. Precisiones alcanzadas sin el soporte de *GCPs*.

En primer lugar se realizó un estudio de la precisión obtenida mediante la georeferenciación directa obtenida en OrthoEngine® mediante exclusivamente los *RPCs* suministrados por el proveedor. Este estudio se realizó siempre en los mismos 75 *ICPs* y sin usar ningún *GCPs* para cada una de las imágenes *PAN* ensayadas. Las precisiones geométricas se calcularon a partir de los residuos calculados en los 75 *ICPs* y se presentaron como errores medios y desviaciones estándar.

4.3.2.2. Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes *PAN* incluyendo el soporte de *GCPs*.

Para llevar a cabo la evaluación de la precisión en la fase de orientación del sensor de las ocho imágenes *PAN* (ver características en Tabla III.1 y III.2 del

Capítulo 3), se realizó un estudio en el que se analizó la influencia de cuatro variables: (i) tipo de imagen de satélite *VHR*, (ii) modelo de sensor empleado (*RPC0*, *RPC1*, *RPC2* o *CCRS*), (iii) número de *GCPs* bien distribuidos usados en el proceso de triangulación, con un mínimo de 2 y un máximo de 12 *GCPs*, y (iv) ángulo de inclinación de la escena (off-nadir), variable desde 5° hasta 23.1°.

El software empleado para la evaluación de la precisión fue PCI Geomática OrthoEngine v.10.3.2. Una vez localizados y marcados los *GCPs* e *ICPs* de cada imagen a estudiar, se hicieron combinaciones de 2, 3, 4, 7, 10 y 12 puntos con los 44 *GCPs* que elegimos para las imágenes *PAN* (Fig. IV.1). Se realizaron cinco repeticiones para cada combinación de *GCPs*, intentando asegurar una buena distribución, tanto planimétrica como altimétrica.

Como se ha indicado anteriormente, cada modelo de sensor necesita un número mínimo de *GCPs* para poder ser calculado. En este sentido se crearon 75 proyectos de orientación para cada imagen de satélite *VHR PAN*, de los cuales 25 proyectos fueron para *RPC0*, 20 para *RPC1*, 15 para *RPC2* y 15 proyectos para *CCRS*.

Para verificar la distribución normal de los residuos obtenidos en las coordenadas *X* e *Y* se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov. Además, la aplicación de la conocida regla 3-sigma permitió descartar la presencia de errores groseros o *outliers* (Daniel y Tennant, 2001).

Con la finalidad de estudiar la influencia de los cuatro factores estudiados en las precisiones obtenidas para la fase de orientación del sensor, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA). La variable observada para el modelo factorial diseñado con cinco repeticiones (Snedecor y Cochran, 1980) fue el $RMSE_{2D}$ ($RMSE$ planimétrico) obtenido siempre en los mismos 75 *ICPs* (Fig. IV.1). En este punto, vale la pena señalar que el contar con un número elevado de *ICPs* nos permitió estimar el valor de $RMSE_{2D}$ con un error máximo cercano al 10%, lo que indica una alta fiabilidad (*reliability*) en cuanto a la precisión de los resultados obtenidos (Aguilar *et al.*, 2008b). Cuando los resultados del análisis ANOVA presentaron

diferencias significativas a un nivel de confianza del 95%, la separación de medias se llevó a cabo mediante el test de Duncan.

4.3.3. Precisión geométrica en la orientación de imágenes MS.

4.3.3.1. Precisiones alcanzadas sin el soporte de GCPs.

Se realizó un estudio similar al realizado para las imágenes PAN usando los RPCs suministrados por el proveedor para cada imagen de satélite MS. En este caso el estudio se realizó en los mismos 50 ICPs y sin usar ningún GCP para cada una de las imágenes MS ensayadas. Las precisiones geométricas se calcularon a partir de los residuos registrados en los 50 ICPs y se presentaron como errores medios y desviaciones estándar.

4.3.3.2. Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes MS incluyendo el soporte de GCPs.

Para la evaluación de la precisión de las siete imágenes MS (descritas en las tablas III.1 y III.2 del Capítulo 3), se procedió al análisis de cuatro variables: (i) imagen de satélite VHR, (ii) modelo de sensor (RPC0, RPC1 o RPC2), (iii) número de GCPs bien distribuidos usados en el proceso de triangulación, con un mínimo de 2 y un máximo de 10 GCPs, y (iv) ángulo de inclinación de la escena (off-nadir), variable desde 5° hasta 23.1°.

Siguiendo el mismo procedimiento y usando el mismo software que para las imágenes PAN, se realizaron diferentes combinaciones de 2, 3, 4, 7 y 10 puntos extraídos de los 42 GCPs disponibles para las imágenes MS (Fig. IV.1). Al igual que en las imágenes PAN, se realizaron cinco repeticiones para cada combinación de GCPs, intentando asegurar una buena distribución planimétrica y altimétrica.

En este caso se generaron 45 proyectos de orientación para cada imagen MS que fueron distribuidos en 20 proyectos para RPC0, 15 para RPC1 y 10 para RPC2. Es importante subrayar que se aplicó el test de Kolmogorov-Smirnov sobre los residuos obtenidos en la fase de orientación (a lo largo de las direcciones X e Y) para verificar la normalidad de los mismos.

Con la finalidad de estudiar la influencia de los factores mencionados anteriormente, al igual que hemos señalado en el caso de las imágenes *PAN*, se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) para la fase de orientación del sensor de las imágenes *MS*. La variable independiente fue el $RMSE_{2D}$ obtenido siempre sobre los mismos 50 *ICPs*. Cuando los resultados del análisis ANOVA presentaron diferencias significativas a un nivel de confianza del 95% se procedió a la separación de medias mediante el test de Duncan.

4.4. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en la fase de orientación del sensor para imágenes de satélite *VHR* de GE-1 y WV-2 serán analizados a continuación diferenciando el caso de imágenes *PAN*, con 0.5 m *GSD*, y el de imágenes *MS* con 2 m *GSD*.

4.4.1. Precisión geométrica en la orientación de imágenes *PAN*.

4.4.1.1. Precisiones alcanzadas sin soporte de *GCPs*.

Las precisiones obtenidas en el proceso de orientación, sin el empleo de *GCPs*, de las ocho imágenes *PAN* de GE-1 y WV-2 (ver Tabla III.1 y III.2 del Capítulo 3) se muestran en la Tabla IV.1. Los resultados de las precisiones geométricas, medidas como desviaciones estándar de los residuos generados en los 75 *ICPs*, fueron mejores para las tres imágenes GE-1 Geo (GE11, GE12 y GE13), presentando un error sistemático planimétrico o sesgo inferior a 4 m en todas ellas. Por otro lado, en el caso de imágenes WV-2 ORS2A (WV21, WV22 y WV23 de la Tabla III.2 del Capítulo 3) los sesgos obtenidos fueron menores de 2 m, y aun menores en el caso de las imágenes WV-2 Básicas (*i.e.* WV24 y WV25). Estos resultados se sitúan dentro de los límites marcados por *GeoEye* y *DigitalGlobe* (*GeoEye*, Inc., 2009; *DigitalGlobe*, Inc., 2010) para las imágenes GE-1 Geo, WV-2 Básicas y ORS2A (*i.e.* 5 m medidos como Error Circular 90% (CE90) o 3 m medidos como $RMSE_{2D}$).

Se observa que, dependiendo principalmente del ángulo off-nadir, la incertidumbre planimétrica (medida como desviación estándar) varía entre los 0.31 m y los 0.38 m para GE-1 Geo, mientras que para WV-2 ORS2A los valores

varían desde 0.34 m hasta 0.48 m. Las imágenes del tipo WV-2 Básicas alcanzaron las mayores desviaciones estándar en el proceso de orientación sin apoyo de *GCPs*. Estos resultados, entendidos como una estimación del error aleatorio derivado del proceso de orientación (desviación estándar), podrían considerarse como los mejores resultados de precisiones posibles en la fase de orientación del sensor y podrían obtenerse usando solamente unos cuantos *GCPs* para la corrección de los errores sistemáticos.

Tabla IV. 1. Precisiones en 75 *ICPs* presentadas como Error Medio y Desviación Estándar (σ). Imágenes *PAN* individuales de GE-1 y WV-2 sin el soporte de *GCPs*.

Imagen	Error Medio (m)		σ (m)		
	<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>X</i>	<i>Y</i>	2D
GE11	2.65	0.57	0.21	0.26	0.33
GE12	1.87	3.00	0.23	0.21	0.31
GE13	1.80	3.47	0.28	0.25	0.38
WV21	1.85	0.15	0.24	0.24	0.34
WV22	1.19	0.03	0.32	0.36	0.48
WV23	-0.02	1.54	0.29	0.30	0.42
WV24	0.22	0.53	0.33	0.44	0.55
WV25	0.39	1.10	0.33	0.45	0.56

4.4.1.2. Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes *PAN* incluyendo el soporte de *GCPs*.

En primer lugar se realizó un estudio global de los valores obtenidos de 600 proyectos diferentes de orientación de sensor que quedaron distribuidos de la siguiente forma: 160 proyectos de orientación para combinaciones de 7, 10 y 12 *GCPs* usando los cuatro diferentes modelos de sensor, 80 proyectos de orientación con el soporte de 4 *GCPs* para los modelos *RPC0* y *RPC1* y, finalmente, 40 proyectos con el soporte de 2 *GCPs* sólo para *RPC0*. Esta distribución cuenta con las cinco

repeticiones realizadas para cada una de las ocho imágenes *PAN* y sus correspondientes combinaciones.

Los cuatro factores estudiados afectaron significativamente ($p < 0.05$) a la precisión de la orientación obtenida, aunque no todos al mismo nivel. El factor más influyente, y por lo tanto más significativo, fue el modelo de sensor empleado (F-test = 72.1), seguido del tipo de imagen de satélite *VHR* (F-test = 30.9). Los otros dos factores estudiados tuvieron menor repercusión en los resultados del ANOVA, aunque también fueron estadísticamente significativos, con valores de F-test de 13.2 para el número de *GCPs* y 11.4 para el ángulo de off-nadir.

Tabla IV.2. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ calculados en 75 *ICPs* en imágenes *PAN* de GE-1 y WV-2 en función del número de *GCPs* (No. *GCPs*). Para cada modelo de sensor, valores a largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$. Para el modelo de sensor *RPC0*, los valores en negrita muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a su valor medio para *RPC1*, mientras que los valores con la anotación (*) denotan diferencias significativa a un nivel de significación $p < 0.10$.

Modelo de Sensor	No. GCPs	GE-1 Geo $RMSE_{2D}$ (m)	WV-2 ORS2A $RMSE_{2D}$ (m)	WV-2 Básica $RMSE_{2D}$ (m)
RPC0	2	0.382 ^a	0.468 ^a	0.674 ^a
	4	0.374 ^{ab}	0.466(*) ^a	0.659 ^a
	7	0.368(*) ^{ab}	0.443 ^b	0.608 ^b
	10	0.357 ^b	0.428 ^b	0.595 ^b
	12	0.353 ^b	0.430 ^b	0.600 ^b
RPC1	4	0.452 ^a	0.501 ^a	0.675 ^a
	7	0.397 ^b	0.471 ^a	0.605 ^b
	10	0.394 ^b	0.438 ^b	0.592 ^b
	12	0.376 ^b	0.437 ^b	0.572 ^b
RPC2	7	0.554 ^a	0.618 ^a	0.825
	10	0.462 ^{ab}	0.527 ^{ab}	0.718
	12	0.405 ^b	0.479 ^b	0.636
CCRS	7	0.984 ^a	1.005 ^a	1.178
	10	0.545 ^b	0.709 ^b	0.814
	12	0.496 ^b	0.627 ^b	0.915

También fueron objeto de estudio las interacciones entre los principales factores o fuentes de variabilidad ANOVA. En este sentido, la interacción entre el modelo de sensor usado y el número de *GCPs* empleado en la orientación del sensor resultó ser significativa (F-test = 9.1; $p < 0.05$). Esto demuestra que los resultados obtenidos por el modelo de sensor tienen un comportamiento diferente dependiendo del número de *GCPs* empleados para su cálculo, siendo el modelo *RPC0* el más independiente respecto al número de *GCPs* usados. Un resultado similar mostró la interacción entre el tipo de imagen de satélite *VHR* y el ángulo off-nadir (F-test = 5.7; $p < 0.05$).

Los valores de $RMSE_{2D}$ obtenidos en la fase de orientación se muestran en la Tabla IV.2. Cada $RMSE_{2D}$ representa la media de los valores obtenidos en cinco repeticiones. Las mejores precisiones fueron obtenidas para los modelos de sensor *RPC0* y *RPC1*, y fueron significativamente peores ($p < 0.05$) para los modelos de sensor *RPC2* y *CCRS* en todas las imágenes estudiadas. Respecto al tipo de imagen empleada en la orientación del sensor, los mejores resultados fueron obtenidos para las imágenes Geo de GE-1. En este sentido, si comparamos sólo las imágenes ORS2A de WV-2 tomadas el 18 de agosto de 2011 (WV22 y WV23), podemos observar que sus precisiones planimétricas de orientación fueron significativamente mejores que las obtenidas para las imágenes Básicas (WV24 y WV25) (Tabla IV.3). Esto fue así incluso para el modelo riguroso, donde hay que tener presente que el archivo de metadatos de las imágenes ORS2A es muy limitado. Chen y Chaapel (2008a), trabajando con un estéreo par de WV-2 y usando como modelos de sensor *RPC0* y *RPC1*, reseñaron que las imágenes ORS2A muestran resultados de orientación más fiables que las imágenes Básicas. Comparando imágenes de WV-2 ORS2A y Básicas sobre Spokane (Washington), las precisiones planimétricas en la fase de orientación del sensor fueron mejores con imágenes ORS2A ($RMSE_{2D}$ de 0.56 m y 0.64 m usando *RPC0* y *RPC1* respectivamente) que las obtenidas a partir de imágenes Básicas ($RMSE_{2D}$ alrededor de 1.04 m para *RPC0* y *RPC1*) (Chen y Chaapel, 2008b). Debido a que las imágenes proporcionadas por *DigitalGlobe* como WV-2 ORS2A presentan correcciones geométricas, los posibles movimientos de alta frecuencia generados

en el momento de la adquisición de la imagen han podido quedar corregidos, por lo que el ajuste realizado por los modelos de sensor tipo *RPCs* suele ofrecer mejores resultados.

Tabla IV.3. Comparación de los valores medios de $RMSE_{2D}$ calculados en 75 ICPs para las imágenes de WV-2 tomadas el 18 de Agosto de 2011, tanto en formato ORS2A (WV22 y WV23) como en formato Básico (WV24 y WV25). (N.S.S: diferencias no significativas al nivel $p<0.05$).

Modelo de Sensor	Imagen WV-2	$RMSE_{2D}$ (m)	Significación estadística
RPC0	WV23	0.442 ^a	$p<0.05$
	WV25	0.571 ^b	
	WV22	0.534 ^a	$p<0.05$
	WV24	0.600 ^b	
RPC1	WV23	0.446 ^a	$p<0.05$
	WV25	0.654 ^b	
	WV22	0.572 ^a	$p<0.05$
	WV24	0.650 ^b	
RPC2	WV23	0.498 ^a	$p<0.05$
	WV25	0.665 ^b	
	WV22	0.695 ^a	$p<0.05$
	WV24	0.788 ^b	
CCRS	WV23	0.627 ^a	$p<0.10$
	WV25	0.905 ^b	
	WV22	0.951	N.S.S.
	WV24	1.033	

Las imágenes de satélites *VHR* son un valioso instrumento para diferentes aplicaciones *SIG* como son mapas topográficos, actualización de cartografía, generación de ortofotos o detección de cambios. En muchas de estas aplicaciones pueden usarse imágenes *pan-sharpened* (e.g. Dennison *et al.*, 2010) procedentes de la fusión de imágenes *PAN* y *MS*. Ya que los datos de las imágenes *PAN* y *MS*, tanto para GE-1 Geo como WV-2 ORS2A, son remuestreados exactamente para el mismo

ámbito geográfico (escena), es posible crear imágenes *pan-sharpened* antes de la fase de orientación y así obtener los mejores resultados geométricos posibles. Cabe decir que los resultados de orientación alcanzados con las imágenes *PAN* ORS2A y Geo serían totalmente extrapolables al caso de imágenes *pan-sharpened*.

Respecto al número de *GCPs* usado, y volviendo a los resultados mostrados en la Tabla IV.2, conviene destacar los valores de precisión planimétrica obtenidos en el caso de *RPC0* para GE-1 Geo. El valor medio obtenido para dos *GCPs* (0.382 m) resultó ser estadísticamente diferente respecto a los valores medios obtenidos para 10 y 12 *GCPs* (los superíndices para los casos de 10 y 12 *GCPs*, letra “b”, y el caso de dos *GCPs*, letra “a”, son diferentes). La comparación de la media registra para el caso de dos *GCPs* y la correspondiente a 4 y 7 *GCPs* no ofreció diferencias significativas al nivel $p < 0.05$ (superíndices “ab”). De este modo, podemos establecer que el uso de 4 *GCPs* puede ser la mejor elección en el caso del modelo *RPC0* aplicado sobre imágenes GE-1 Geo, ya que este es el menor número de *GCPs* que no muestra diferencias significativas con respecto al valor medio de la mejor precisión. Siguiendo el mismo razonamiento para las imágenes de WV-2, tanto en el caso de ORS2A como Básicas, el empleo de 7 *GCPs* podría ser la opción más recomendable. En cuanto al modelo *RPC1*, se puede recomendar el uso de 7 *GCPs* en el caso de imágenes GE-1 Geo o WV-2 Básicas, y 10 *GCPs* para WV-2 ORS2A.

Las diferencias estadísticas entre los resultados de precisión de la orientación ofrecidos por los modelos *RPC0* y *RPC1* para las imágenes GE-1 Geo y WV-2 ORS2A se muestran también en la Tabla IV.2. Los $RMSE_{2D}$ estimados para las imágenes de GE-1 fueron significativos a un nivel $p < 0.05$ o $p < 0.10$, mostrando las mejores precisiones cuando se empleó el modelo *RPC0*. En el caso de las imágenes WV-2 ORS2A, aunque el modelo *RPC0* alcanza mejores precisiones planimétricas que el modelo *RPC1* para cada combinación de *GCPs* estudiada, sólo se observaron diferencias significativas en el caso de 4 y 7 *GCPs*. Diferentes autores han señalado que la adición de términos a las transformaciones en el espacio imagen (*i.e.* usar los modelos *RPC1* o *RPC2* en lugar de *RPC0*) podría mejorar las precisiones, pero sólo cuando las imágenes presentan grandes distorsiones (*e.g.* Fraser y Hanley, 2005; Shaker, 2008; Tong *et al.*, 2010). En nuestro caso, el modelo *RPC1*

proporcionó ligeramente mejores resultados que el modelo *RPC0* para las imágenes WV-2 Básicas. Hay que señalar que las imágenes WV-2 Básicas no tienen ninguna corrección con respecto a movimientos o temblores que pueda sufrir la plataforma a la hora de tomar la imagen, especialmente en las imágenes tomadas en sentido inverso. Teniendo en cuenta estos resultados, parece razonable recomendar, para la fase de orientación del sensor, el uso del modelo *RPC0* para imágenes de satélite *PAN VHR* GE-1 Geo y WV-2 ORS2A. Además, en el caso de las imágenes de GE-1 los resultados obtenidos para el modelo *RPC0* son prácticamente independientes del número de *GCPs* empleados en el proceso de orientación del sensor. De hecho, otros autores que también han trabajado con ambos productos han llegado a la conclusión de que el modelo de sensor *RPC0* es el más simple y preciso de los modelos de sensor disponibles (Fraser y Ravanbakhsh, 2009; Meguro y Fraser, 2010; Chen y Chaapel, 2010).

Tabla IV.4. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ para imágenes *PAN* de GE-1 Geo y WV-2 ORS2A en función del ángulo off-nadir. Para cada modelo de sensor y tipo de imagen, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$. Los valores del modelo de sensor *RPC0* presentados en negrita muestran diferencias significativas ($p < 0.05$) con respecto a su valor medio para *RPC1*.

Imagen	Off-nadir	$RMSE_{2D}$ (m)			
		RPC0	RPC1	RPC2	CCRS
GE12	8.5°	0.337^a	0.372 ^a	0.419 ^a	0.618 ^a
GE11	20.6°	0.357^b	0.372 ^a	0.439 ^a	0.653 ^a
GE13	23.1°	0.405^c	0.471 ^b	0.562 ^b	0.737 ^a
WV21	5°	0.365 ^a	0.367 ^a	0.431 ^a	0.764 ^{ab}
WV23	10°	0.442 ^b	0.446 ^b	0.498 ^a	0.627 ^a
WV22	22.4°	0.534^c	0.572 ^c	0.695 ^b	0.951 ^b

Las precisiones planimétricas obtenidas en la fase de orientación del sensor para las imágenes *PAN* GE-1 Geo (GE11, GE12 y GE13) y WV-2 ORS2A (WV21, WV22 y WV23) en función del ángulo de off-nadir de la imagen son mostradas en la Tabla IV.4. De nuevo, el modelo de sensor *RPC0* fue el que ofreció los mejores

resultados, especialmente en el caso de las tres imágenes de GE-1, donde se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) respecto a las precisiones obtenidas con el modelo *RPC1*. En general, y para cada modelo de sensor e imagen estudiada, los valores medios de $RMSE_{2D}$ fueron aumentando con el incremento del ángulo off-nadir. Esta relación entre el ángulo off-nadir y la precisión obtenida en la fase de orientación del sensor podría estar relacionada con el consecuente incremento del *GSD* de las imágenes adquiridas. En efecto, el incremento del ángulo off-nadir produce un aumento del tamaño del *GSD*, lo que conllevaría un potencial incremento del error de punteamiento. En la Fig. IV.3 se muestra la relación (polinómica de segundo orden) entre el *GSD* real de cada imagen (media del tamaño de píxel realmente capturado en columnas y filas para las imágenes *PAN*; ver Tablas III.1 y III.2 del Capítulo 3) y las precisiones obtenidas en la fase de orientación mediante el modelo de sensor *RPC0* para las imágenes GE11, GE12, GE13, WV21, WV22 y WV23.

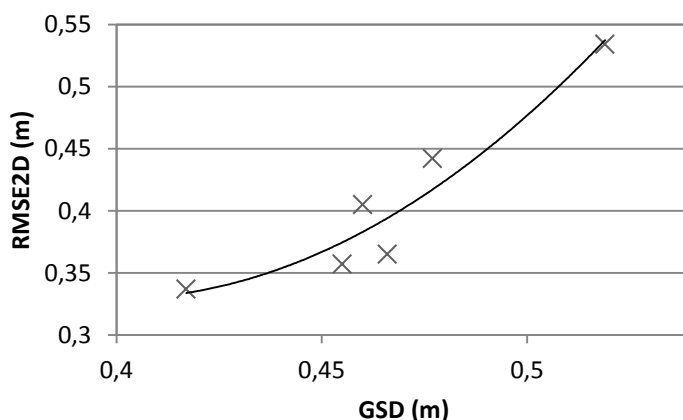


Fig. IV.3. Relación entre el *GSD* (dependiente del ángulo off-nadir) y el $RMSE_{2D}$ obtenido en la fase de orientación del sensor mediante el modelo *RPC0* para las imágenes GE-1 Geo y WV-2 ORS2A.

Cabe destacar que los mejores valores medios de las precisiones planimétricas obtenidas usando *RPC0* para cada imagen estudiada en la Tabla IV.4 resultaron muy cercanos a las mejores precisiones de geoposicionamiento relativo

mostradas como desviaciones estándar planimétricas en la Tabla IV.1. Basándonos en casi una década de estudios realizados con imágenes de satélite *VHR*, parece demostrado su potencial para alcanzar precisiones planimétricas de alrededor de 0.5-0.7 píxeles mediante refinamientos de *RPCs* y empleando el soporte de *GCPs* muy precisos (Fraser y Ravanbakhsh, 2009). En nuestro estudio encontramos que para las imágenes GE-1 Geo, con un tamaño de píxel de 0.5 m, el $RMSE_{2D}$ medio tomó valores de 0.67, 0.72 y 0.81 píxeles cuando se aplicó el modelo *RPC0* sobre imágenes con off-nadir de 8.5°, 20.6° y 23.1° respectivamente. En el caso de las imágenes WV-2 ORS2A, también con un tamaño de píxel de 0.5 m, se obtuvieron valores medios de $RMSE_{2D}$ ligeramente superiores, con valores de 0.73, 0.88 y 1.01 píxeles para ángulos off-nadir de 5°, 10° y 22.4° respectivamente.

En la fase de orientación, Teo (2011) alcanzó precisiones planimétricas de alrededor de 0.84 píxeles para una sola imagen WV-2 Básica, con un off-nadir de 8.6°. Meguro y Fraser (2010) obtuvieron precisiones planimétricas cerca de 0.7 píxeles usando un estéreo par *pan-sharpened* de GE-1 y con el modelo de sensor *RPC0*, mientras que Wang y Zhao (2011) alcanzaron una precisión planimétrica de 0.38 m (0.76 píxeles) usando 5 *GCPs* y *RPC0*. En otro estudio realizado por Fraser y Ravanbakhsh (2009) se llegaron a registrar precisiones horizontales de hasta 0.2 píxeles, aunque en este caso los datos auxiliares que se usaron fueron extremadamente precisos y, además, se aplicó un cuidado exquisito en la selección de la posición de los *GCPs* para permitir su clara identificación en el espacio imagen (disminución del error de punteamiento).

Con respecto al modelo físico o riguroso de sensor, los resultados obtenidos en la orientación fueron peores respecto a los obtenidos a partir de los modelos basados en *RPCs* para ambos satélites GE-1 y WV-2. Esto concuerda con trabajos similares donde se observa como los modelos físicos ofrecieron peores resultados de orientación que los modelos *RPCs*, tanto para las imágenes de satélite de GE-1 (*e.g.* Crespi *et al.*, 2010) como para las de WV-2 (*e.g.* Deltsidis y Ioannidis, 2011; Nowak Da Costa y Walczyńska, 2011). Por otra parte, el modelo riguroso implementado en el programa SISAR, comentado en la sección introductoria de

este capítulo, alcanzó buenas precisiones de orientación trabajando con estéreo pares de GE-1 y WV-2 (Capaldo *et al.*, 2012).

4.4.2. Precisión geométrica en la orientación de imágenes MS.

4.4.2.1. Precisiones alcanzadas sin el soporte de GCPs.

Las precisiones geométricas directas, medidas como desviaciones estándar, obtenidas en las siete imágenes MS empleadas en este estudio (ver Tabla III.1 y III.2 del Capítulo 3) son similares a las obtenidas en el estudio realizado con las imágenes PAN. Sin embargo, en este caso los resultados obtenidos para las imágenes procedentes de WV-2 son ligeramente mejores que los obtenidos a partir de las imágenes de GE-1 (Tabla IV.5).

Tabla IV.5. Precisiones en 50 ICPs presentadas como Error Medio y Desviación Estándar (σ). Imágenes multispectrales simples de GE-1 y WV-2 sin el soporte de GCPs.

Imagen	Error Medio (m)		σ (m)		
	X	Y	X	Y	2D
GE11	1.727	0.779	0.942	0.920	1.317
GE12	1.331	2.704	0.854	0.863	1.214
GE13	1.279	3.063	0.744	0.960	1.215
WV21	0.892	-0.095	0.824	0.836	1.174
WV23	-1.655	1.726	0.726	0.833	1.105
WV24	-1.450	0.182	0.865	0.874	1.229
WV25	-0.951	1.073	0.755	0.776	1.083

Los errores sistemáticos o sesgos (errores medios) registrados en la orientación de las imágenes de GE-1 fueron menores de 3.5 m, mientras que en el caso de las imágenes de WV-2 no superaron valores de 2.5 m. Respecto a las desviaciones estándar obtenidas, los valores alcanzados por las imágenes MS variaron entre 0.55 y 0.65 píxeles (considerando que el tamaño de píxel de las imágenes MS es de 2 m) dependiendo del ángulo off-nadir de la imagen y del

satélite estudiado. Al igual que en el caso de las imágenes *PAN*, estos resultados podrían considerarse como los mejores resultados posibles en la fase de orientación y podrían obtenerse usando sólo unos cuantos *GCPs*. En este caso los resultados obtenidos por las imágenes WV-2 Básicas son muy similares, incluso ligeramente mejores, a los resultados obtenidos por las imágenes WV-2 ORS2A y GE-1 Geo.

4.4.2.2. *Precisiones alcanzadas en la fase de orientación de imágenes MS incluyendo el soporte de GCP.*

Al igual que para las imágenes *PAN*, se realizó un primer análisis global de los valores obtenidos como $RMSE_{2D}$ en 315 proyectos de orientación de sensor creados para las imágenes *MS*. Los factores analizados en la fase de orientación del sensor presentaron un efecto significativo ($p < 0.05$) sobre la precisión de la orientación de las imágenes estudiadas. De hecho, y fijándonos en los resultados obtenidos por el análisis ANOVA, el modelo de sensor empleado en la fase de orientación (*RPC0*, *RPC1* y *RPC2*) fue el factor que más afectó a la precisión de la orientación del sensor (F-test = 64.23). Cabe destacar que este factor fue también el más significativo en el caso de las imágenes *PAN*. El número de *GCPs* empleados para la orientación de las imágenes fue el siguiente factor en importancia en relación a la explicación de la variabilidad observada en los resultados de precisión de la orientación obtenidos (F-test = 15.82). Los resultados ANOVA relativos a los otros dos factores presentaron un menor peso, con valores F-test de 7.30 y 4.85 para el tipo de imagen *MS* empleada y el ángulo off-nadir, respectivamente. Por otra parte, la interacción entre el modelo de sensor empleado en la fase de orientación y el número de *GCPs* resultó estadísticamente significativa (F-test = 2.69) a un nivel $p < 0.05$. Esto demuestra que la precisión de los resultados obtenidos por el modelo de sensor empleado varía en función del número de *GCPs* usados en la orientación de la imagen.

Los valores medios de precisión de la orientación, calculados como $RMSE_{2D}$ sobre los 50 *ICPs* definidos en las imágenes *MS*, son mostrados en la Tabla IV.6. Analizando los valores recogidos en dicha tabla, podemos observar que el modelo

de sensor *RPC2* obtuvo claramente las peores precisiones en todas las imágenes *MS*, tanto para las imágenes de GE-1 como para las de WV-2. Por otra parte, y aunque el modelo *RPC1* consiguió muy buenos resultados con un gran número de *GCPs*, el modelo de sensor recomendado para imágenes *MS* de GE-1 y WV-2 sería el *RPC0*. Las mejores precisiones planimétricas, en términos estadísticos, fueron conseguidas por el modelo *RPC0* con el soporte de siete *GCPs*. En efecto, el modelo de sensor *RPC0*, aplicado sobre imágenes de GE-1, registra un $RMSE_{2D}$ de 1.262 m con el soporte de 7 *GCPs*, no siendo significativamente diferente ($p < 0.05$) de los valores obtenidos para 4 *GCPs* o 10 *GCPs* (nótese que los superíndices presentan alguna letra en común. Del mismo modo, y en el caso de las imágenes de WV-2 ORS2A y Básicas, el soporte de cuatro *GCPs* podría ser suficiente para llevar a cabo la fase de orientación con el modelo de sensor *RPC0*.

Tabla IV 6. Comparación de medias de $RMSE_{2D}$ calculados en 50 *ICPs* sobre imágenes *MS* de GE-1 y WV-2 en función del número de *GCPs* (No. *GCPs*). Para cada modelo de sensor, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas al nivel $p < 0.05$.

Modelo de Sensor	No. <i>GCPs</i>	GE-1 Geo $RMSE_{2D}$ (m)	WV-2 ORS2A $RMSE_{2D}$ (m)	WV-2 Básica $RMSE_{2D}$ (m)
RPC0	2	1.384 ^a	1.434 ^a	1.303 ^a
	4	1.340 ^{ab}	1.288 ^{ab}	1.243 ^{ab}
	7	1.262 ^{bc}	1.234 ^b	1.186 ^{ab}
	10	1.233 ^c	1.195 ^b	1.128 ^b
RPC1	4	1.457 ^a	1.510 ^a	1.452 ^a
	7	1.389 ^a	1.394 ^{ab}	1.322 ^{ab}
	10	1.262 ^b	1.303 ^b	1.203 ^b
RPC2	7	1.631 ^a	1.554 ^a	1.542 ^a
	10	1.379 ^b	1.508 ^a	1.560 ^a

La realización de un análisis ANOVA independiente para cada imagen permitió comprobar la no existencia de diferencias significativas entre los resultados de orientación ofrecidos por el modelo de sensor *RPC0* con el soporte

de 7 *GCPs*. En este caso, la mejor precisión planimétrica para la fase de orientación, con un valor medio de 1.232 m (0.62 píxeles) y una desviación estándar de 0.112 m, fue independiente del tipo de imagen de satélite *VHR* empleada.

La Tabla IV.7 muestra los resultados de precisión de la orientación (expresados como valores medios de $RMSE_{2D}$) en función del ángulo off-nadir para el caso del modelo de sensor *RPC0* con el soporte de 7 *GCPs*. Para las imágenes *MS* GE-1 Geo y WV-2 Básicas, los valores $RMSE_{2D}$ (error planimétrico de la orientación) fueron aumentando a medida que se incrementaba el ángulo off-nadir, encontrándose diferencias significativas entre las tres imágenes de GE-1. Para las imágenes *MS* del tipo WV-2 ORS2A (WV21 y WV23) no se observó esta tendencia, aunque conviene recordar que los ángulos off-nadir eran muy similares. Para estas imágenes *MS*, al igual que para las imágenes *PAN*, la influencia del ángulo off-nadir en la precisión obtenida en la fase de orientación podría estar relacionada con el incremento del *GSD* de las imágenes adquiridas y al consecuente aumento del error de punteamiento.

Tabla IV. 7. Comparación de medias para valores de $RMSE_{2D}$ (*RPC0* y soporte de siete *GCPs*) calculados en 50 *ICPs* para imágenes *MS* GE-1 Geo y WV-2 (ORS2A y Básicas) en función del ángulo off-nadir. Para cada grupo de imágenes, valores seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas al nivel $p < 0.05$.

Imágenes <i>MS</i>	Off-nadir	$RMSE_{2D}$ (m)
GE12	8.5°	1.186 ^a
GE11	20.6°	1.331 ^c
GE13	23.1°	1.270 ^b
WV21	5°	1.294
WV23	10°	1.174
WV25	10°	1.142
WV24	22.4°	1.231

4.5. CONCLUSIONES.

La elevada precisión de geoposicionamiento directa, *i.e.* sin el soporte de *GCPs*, lograda por los nuevos satélites *VHR* testados en este trabajo, tanto en imágenes *PAN* como *MS*, demuestra la notable mejora de los sistemas de geolocalización y generación de *RPCs* respecto a satélites precedentes. Sin embargo, y cuando necesitamos productos finales con una gran precisión absoluta (ortoimágenes o *DSMs*), la orientación directa debería ser refinada mediante el soporte de algunos *GCPs* de elevada precisión.

En este sentido, y trabajando bajo condiciones operacionales con imágenes *PAN*, el modelo de sensor *RPC0* alcanzó las mejores precisiones en la fase de orientación, con un nivel de confianza del 95%, tanto para las imágenes de GE-1 como para las de WV-2. Para obtener los mejores resultados usando este modelo de sensor se recomienda el uso de entre 4 y 7 *GCPs*, con lo que se garantiza la obtención de precisiones sub-píxel para ambos sensores. En cualquier caso, y según los resultados presentados en este capítulo, las imágenes GE-1 Geo pueden alcanzar precisiones planimétricas ligeramente superiores a las de las imágenes WV-2 ORS2A o WV-2 Básicas.

En relación a los productos de WV-2, el formato ORS2A obtuvo precisiones planimétricas significativamente mejores en la fase de orientación que las imágenes Básicas. Estos resultados probablemente podrían mejorarse si se redujese el error de punteamiento de los *GCPs* marcados en las imágenes.

Los resultados obtenidos para las imágenes *PAN*, tanto en el caso de productos WV-2 ORS2A como GE-1 Geo, son directamente extrapolables a las imágenes *pan-sharpened* obtenidas mediante la combinación y fusión de las bandas *PAN* y *MS*, dado que el conjunto de *RPCs* aplicado para la orientación del sensor sería el mismo que acompaña a las imágenes *PAN*.

Del mismo modo, y trabajando también bajo condiciones operacionales con imágenes *MS*, el modelo de sensor *RPC0* ha alcanzado las mejores precisiones en la fase de orientación para los productos GE-1 Geo, WV-2 ORS2A y WV-2 Básica. Aunque sólo un *GCPs* sería necesario para calcular este modelo, y al igual que en el

caso de las imágenes *PAN*, se recomienda el uso de entre 4 y 7 *GCPs*. Las precisiones esperadas en este caso se situarían próximas a 0.6 píxeles con la aplicación del modelo de sensor *RCP0* y soporte de 7*GCPs*.

Tanto para las imágenes *PAN* como las *MS*, se observó una clara relación directa entre el ángulo off-nadir de la escena y la precisión planimétrica obtenida en la fase de orientación del sensor. Esta relación fue mucho más clara y acusada en el caso de las imágenes *PAN*.

4.6. BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Agüera, F., Sánchez, J.A., 2007. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12):1321-1332.

Aguilar, M.A., Agüera, F., Aguilar, F.J., Carvajal, F., 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., Aguilar, F.J., Agüera, F., 2008b. Assessing Geometric Reliability of Corrected Images from Very High Resolution Satellites. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 74(12): 1551-1560.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Saldaña, M.M., Fernández, I., 2012. Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(3): 247-257.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(2013): 427-435.

Ariza, F.J. y Atkinson, A.D.J., 2005. Sample size and confidence when applying the NSSDA. *Proceedings of the 21th International Cartographic Conference*, 9-16

July, A Coruña, Spain (The International Cartographic Association), unpaginated CD-ROM.

Capaldo, P., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F., 2012. DSM generation from high resolution imagery: applications with WorldView-1 and Geoeye-1. *Italian Journal of Remote Sensing*, 44(1): 41-53.

Cheng, P., Toutin, T., Zhang, Y., 2003. 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.

Chen, P. y Chaapel, C., 2008a. Automatic DEM generation using WorldView-1 stereo data with or without ground control. *GeoInformatics*, 7: 34-39.

Chen, P. y Chaapel, C., 2008b. Increased image collection opportunities DigitalGlobe's WorldView-1 satellite. *GeoInformatics*, 3: 16-21.

Chen, P. y Chaapel, C., 2010. Pan-sharpening and geometric correction WorldView-2 satellite. *GeoInformatics*, 4: 30-33.

Crespi, M., Capaldo, P., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F., 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. *30th IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, 25-30 July, Honolulu, U.S.A, pp. 3596-3599.

Daniel, C. y Tennant, K., 2001. DEM quality assessment. Maune, D.F. (Ed.), *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, pp. 395-440.

Deltsidis, P. y Ioannidis, C., 2011. Orthorectification of WorldView-2 stereo pair using a new rigorous orientation model. In: Heipke, C., Jacobsen, K., Rottensteiner, F., Müller, S., Sörgel, U. (Eds.), *ISPRS Hannover Workshop "High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information"*. June 14-17, Hannover, Germany.

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

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

DigitalGlobe, Inc., 2010. DigitalGlobe Core Imagery Products Guide. URL: http://www.digitalglobe.com/downloads/DigitalGlobe_Core_Imagery_Products_Guide.pdf (último acceso: 25 Enero 2013).

Dolloff, J. y Settergren, R., 2010. An assesment of WorldView-1 positional accuracy based on fifty contiguous stereo pairs of imagery. *Photogrammetric Engineering and 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/FGDC-standards-projects/accuracy/part3/chapter3>, U.S. Federal Geographic Data Committee, Reston, Virginia. (último acceso: 1 Febrero 2013).

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

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

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

Fraser, C.S. y Yamakewa, T., 2004. Insights into affine model for high-resolution satellite sensor orientation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 58: 275-288.

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

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. URL: http://www.genesiis.com/pdf/2009_geoeye_product_guide.pdf (último acceso: 7 Febrero 2013).

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

Habib, A., Shin, S.W., Kim, K., Bang, K., Kim, E., Lee, D., 2007. Comprehensive analysis of sensor modeling alternatives for high resolution imaging satellites. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(11): 1241-1251.

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

Hu, Y., Tao, C.V., Croitoru, A., 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.

Jacobsen, K., 2002. Generation of orthophotos with Carterra Geo images without orientation information. *Proceedings of the ACSM-ASPRS Annual Conference/XXII FIG International Congress*, 19-26 April, Washington D.C., unpaginated CD-ROM.

JRC, Joint Research Centre, ISPRA, 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, v 3.0. URL: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications/Guidelines-for-Best-Practice-and-Quality-Checking-of-Ortho-Imagery-v-3.0> (último acceso: 1 Febrero 2013).

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

Li, R., Zhou, F., Niu, X., Di, K., 2007. Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(9): 1067-1074.

Meguro, Y. y Fraser, C.S., 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 Commision VIII, pp. 1069-1072.

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

Nowak Da Costa, J.K. y Walczyńska, A., 2011. Geometric Quality Testing of the WorldView-2 Image Data Acquired over the JRC Maussane Test Site using ERDAS LPS, PCI Geomatics and Keystone Digital Photogrammetry Software Packages – Initial Findings with ANNEX. European Commission, JRC Scientific and Technical Reports EUR 24525 EN.

OGC (OpenGIS Consortium), 1999. The OpenGIS Abstract Specification Topic 7: The Earth Imagery Case. URL:http://portal.opengeospatial.org/files/?artifact_id=892. (último acceso: 6 de Febrero de 2013).

Poli, D. y Toutin, T., 2012. Review of developments in geometric modeling for high resolution satellite pushbroom sensors. *The Photogrammetric Record*, 27(137): 58-73.

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.

Shaker, A., 2008. Satellite sensor modeling and 3D geo-positioning using empirical models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 10: 282-295.

Snedecor, G.W. y Cochran, W.G., 1980. *Statistical Methods*, seventh ed. Iowa State University Press, Ames, IA, 507 pp.

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

Teo, T., 2011. Bias compensation in a rigorous sensor model and rational function model for high-resolution satellite images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77(12): 1211-1220.

Tong, X., Liu, S., Weng, Q., 2010. Bias-corrected rational polynomial coefficients for high accuracy geo-positioning of QuickBird stereo imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65: 218-226.

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. y Cheng, P., 2002. QuickBird- A milestone for high resolution mapping. *Earth Observation Magazine*, 11(4): 14-18.

Toutin, T., 2003. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric model, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 69(1): 43-51.

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., 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., Schmitt, C.V., Wang, H., 2012. Impact of no GCP on elevation extraction from WorldView stereo data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 72(2012): 73-79.

Valadan Zoej, M.J., Mokhtarzade, M., Mansourian, A., Ebadi, H., Sadeghian, S., 2007. Rational function optimization using genetic algorithms. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 9: 403-413.

Wang, W. y Zhao, L., 2011. Geolocation Accuracy Evaluation of GeoEye-1 Stereo Image Pair. *International Symposium on Image and Data Fusion, ISIDF*, Yunnan, China (Conference papers from IEEEExplore).

Wolniewicz, W., 2004. Assessment geometric accuracy of *VHR* satellite images. *Proceeding of the XXth International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 35(Part B1), 12-23 July, Istanbul, Turkey, unpaginated CD ROM.

Wong, K.W., 1980. Basics mathematics of photogrammetry, *Manual of Photogrammetry*, Fourth edition (C.C. Slama, editor), American Society of Photogrammetry, Falls Church, Virginia, pp.

CAPÍTULO 5.

GENERACIÓN Y EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS MODELOS DIGITALES DE SUPERFICIES GENERADOS A PARTIR DE ESTÉREO PARES FORMADOS POR IMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2.

5.1. INTRODUCCIÓN.

Los satélites ópticos *VHR* ya han demostrado su capacidad para proporcionar productos cartográficos precisos como ortoimágenes (Davis *et al.*, 2003; Kay *et al.*, 2003; Aguilar *et al.*, 2007b; Aguilar *et al.*, 2008a) y modelos digitales de superficies (*Digital Surface Models, DSMs*) (Toutin, 2004; Poon *et al.*, 2007; Eckert y Hollands, 2010; Deilami y Hashim, 2011; Capaldo *et al.*, 2012).

La capacidad de formación de imágenes estéreo de los satélites *VHR* más novedosos permiten generar estéreo geometrías robustas con una relación base-altura (B/H) mayor que 0.5. La geometría de imágenes de satélite, en particular la relación B/H o el ángulo de convergencia, juegan un papel importante en la mejora de la precisión vertical de los *DSMs* (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009). Sin embargo, en zonas urbanas es preferible que la relación B/H sea pequeña para aumentar la similitud entre las dos imágenes estéreo y mejorar así el proceso de búsqueda de puntos homólogos entre las mismas (*stereo matching*). Por otra parte, la gran capacidad de maniobra de los nuevos satélites comerciales *VHR*, en lo que a giro del sensor se refiere, les permite la generación de estéreo imágenes en la misma fecha y en la misma órbita, reduciendo las variaciones radiométricas en la imagen y mejorando los resultados del proceso de *stereo matching* (Toutin, 2000; Toutin, 2004). De esta forma, los datos estéreo *VHR* pueden ser rápidamente adquiridos sobre cualquier lugar de la Tierra, con un tiempo pequeño de revisita y a un precio razonable. La extracción de información tridimensional (3D) a partir de imágenes de satélite *VHR* ha sido objeto de una intensa investigación fotogramétrica durante la última década, que principalmente se ha llevado a cabo de tres maneras:

(i) Analizando diferentes modelos de sensor, tanto empíricos como físicos, en la fase de triangulación (Fraser *et al.*, 2002; Toutin, 2003; Poli, 2005; Toutin, 2006;

Jacobsen *et al.*, 2008; Crespi *et al.*, 2009; Fraser y Ravanbakhsh, 2009; Yuan, 2009; Åstrand *et al.*, 2012; Capaldo *et al.*, 2012; Crespi *et al.*, 2012).

(ii) Comparando las precisiones de *DSMs* generados por diferentes estéreo pares puros de satélites *VHR*. Un estéreo par puro está formado por dos imágenes adquiridas por el mismo sensor, en la misma fecha y en la misma órbita (*along-track*), presentando además ángulos óptimos para la visión estéreo (Toutin, 2004; Toutin, 2006; Capaldo *et al.*, 2012). También pueden estar integrados por estéreo pares mixtos, los cuales combinan imágenes tomadas en diferentes órbitas (*across-track*) ya sean del mismo o de diferentes satélites (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009).

(iii) Comparando diferentes módulos de generación automática de *DSMs* (Poli, 2005; Poon *et al.*, 2007; Eckert y Hollands, 2010; Capaldo *et al.*, 2012) o diferentes algoritmos de *matching* para la generación de *DSMs* (Zhang y Gruen, 2006; Alobeid *et al.*, 2010; Åstrand *et al.*, 2012).

Actualmente, GE-1 y WV-2 son los dos satélites comerciales *VHR* más innovadores e inexplorados. Los primeros resultados publicados de precisión vertical obtenidos a partir de estéreo pares de GE-1 y WV-2, aunque bastante variables, fueron superiores a los obtenidos por satélites precedentes como IKONOS o QuickBird. Por ejemplo, Mitchell y MacNabb (2010) alcanzaron precisiones verticales de 0.25 m (medidas como desviaciones estándar) trabajando con un estéreo par de GE-1. Una precisión vertical similar fue informada por Fraser y Ravanbakhsh (2009), pero en este caso expresada como error medio cuadrático ($RMSE_z$). Otros estudios realizados sobre estéreo pares obtuvieron valores de $RMSE_z$ mucho mayores, como los presentados por Wang y Zhao (2011), con una precisión vertical de 0.44 m, o los publicados por Meguro y Fraser (2010), con valores de $RMSE_z$ de alrededor de 0.7 m. Por otra parte, Mitchell y MacNabb (2010), en este caso usando un estéreo par de WV-2, generaron un *DSM* con una precisión vertical de 0.31 m (expresada como desviación estándar de los residuos verticales), mientras que Hobi y Ginzler (2012) obtuvieron un valor de 1.20 m ($RMSE_z$) trabajando en suelos con cubierta vegetal de hierba. Por lo general, las especificaciones de las medidas de precisión se basan en la suposición de que los errores verticales o residuos siguen una distribución Gaussiana y no existen resultados atípicos o valores groseros (*outliers*). Pero esto no es lo que sucede en la realidad, sobre todo en áreas de terreno “no abierto” o “*non open terrain*” (Aguilar

y Mills, 2008b) con abundancia de microrrelieve como vegetación, edificios, coches, etc. Por lo tanto, existe una tendencia creciente a proponer métodos estadísticos robustos y no paramétricos para estimar la precisión de *DSMs* en este tipo de escenarios donde la distribución del error generalmente está muy lejos de la distribución normal (Aguilar y Mills, 2008b). En este caso es recomendable el empleo de métodos estadísticos robustos como, por ejemplo, valores de cuantiles extraídos a partir de la distribución de residuos expresados como errores absolutos (Höhle y Höhle, 2009).

A parte de la precisión de los datos muestrales, su densidad y la distribución de los datos de origen, la exactitud de un *DSM* también depende de la rugosidad o morfología de la superficie del terreno (Li, 1992; Aguilar *et al.*, 2005) y la cubierta terrestre objeto de estudio (Poon *et al.*, 2005; Toutin, 2006; Hobi y Ginzler, 2012).

El procedimiento para evaluar la calidad de un modelo digital de elevaciones (*DEM*) o de un *DSM* incluye un examen de la precisión vertical y de la completitud del mismo (Butler *et al.*, 1998; Höle y Potuckova, 2006). La precisión vertical del *DSM* puede ser obtenida calculando la diferencia de alturas entre una serie de puntos de control y los puntos planimétricamente correspondientes extraídos a partir del *DSM*. Los puntos de control independientes (*Independent Check Points*, *ICPs*) deben ser al menos tres veces más precisos que la precisión esperada del *DSM* a evaluar. En cuanto al tamaño mínimo de la muestra requerido para asegurar una robusta evaluación de la precisión, no es fácil de especificar (Aguilar *et al.*, 2007a). Además, los *ICPs* deberían distribuirse homogéneamente sobre la zona de trabajo. Teniendo en cuenta todos los inconvenientes mencionados, muchos investigadores han propuesto el uso de *DSMs* de alta precisión generados a partir de datos *LiDAR* (*light detection and ranging*) como modelo de referencia (*Ground Truth*) para comprobar la precisión de los *DSMs* generados a partir de imágenes de satélite *VHR* (Toutin, 2004; Toutin, 2006; Mitchell y MacNabb, 2010; Capaldo *et al.*, 2012). Teniendo en cuenta que los *DSMs* automáticos no pueden ser determinados en todas las áreas debido a errores de *stereo matching* provocados por una textura insuficiente, oclusión o fallos radiométricos (artefactos), la medida cuantitativa de la precisión vertical de los *DSMs* debe complementarse con la “completitud” de dichos modelos, que puede definirse como el porcentaje de puntos homólogos

correctamente detectados en el área de trabajo o, en otras palabras, la cantidad de área donde se han podido obtener puntos *DSM* mediante *stereo matching* en relación con el total de área de trabajo (Höle y Potuckova, 2006).

Los objetivos de este capítulo serían, por tanto, la evaluación y comparación de los *DSMs* extraídos a partir de estéreo pares puros de imágenes *PAN* procedentes de los satélites GE-1 y WV-2, exactamente en la misma área de trabajo y en las mismas condiciones, mediante el uso como *Ground Truth* de un *DSM* generado a partir de datos *LiDAR* de alta precisión. También se evalúan los *DSMs* extraídos de estéreo pares combinados (estéreo pares mixtos) formados por una imagen de GE-1 y otra de WV-2. De forma más específica, a lo largo de este capítulo trataremos de evaluar el efecto, tanto en la precisión vertical como en la completitud de los *DSMs*, de varios factores como son: (i) modelos matemáticos de sensor empleados, (ii) número de puntos de control (*GCPs*) usados para ajustar el modelo de sensor, (iii) características radiométricas de cada imagen de satélite *VHR*, (iv) tiempo transcurrido entre la fecha de adquisición de cada una de las dos imágenes empleadas para generar cada *DSM*, (v) tipos de cubierta de la zona de estudio y (vi) geometría del estéreo par.

Para finalizar esta introducción, resulta de interés el puntualizar que la mayoría de los resultados que se van a exponer en este Capítulo de Tesis han sido aceptados para su publicación en la segunda revista más prestigiosa de las incluidas en el *Journal Citation Reports (JCR)* dentro de la categoría *Remote Sensing*, como es el *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* (Aguilar *et al.*, in press).

5.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS.

5.2.1. Zona de estudio.

La zona de estudio donde se han realizado los ensayos relativos a este Capítulo, y que se localiza en la provincia de Almería, ha sido descrita en el Capítulo 3 de esta Tesis.

5.2.2. Imágenes de satélite *VHR*.

Para llevar a cabo la extracción y evaluación de la calidad de los *DSMs* generados a partir de estéreo pares formados por imágenes de satélites *VHR*, se han utilizado las imágenes de GE-1 (GE11, GE12, GE13) y de WV-2 (WV21, WV22, WV23) descritas en el Capítulo 3 de esta Tesis y adquiridas durante los años 2010 y 2011.

En la Fig. V.1 se muestra un esquema gráfico de la posición de las imágenes de satélite *VHR* empleadas en este capítulo en función del azimuth y del ángulo de elevación del sensor en el momento de la toma de la imagen (el complementario de este ángulo sería el ya definido ángulo off-nadir).

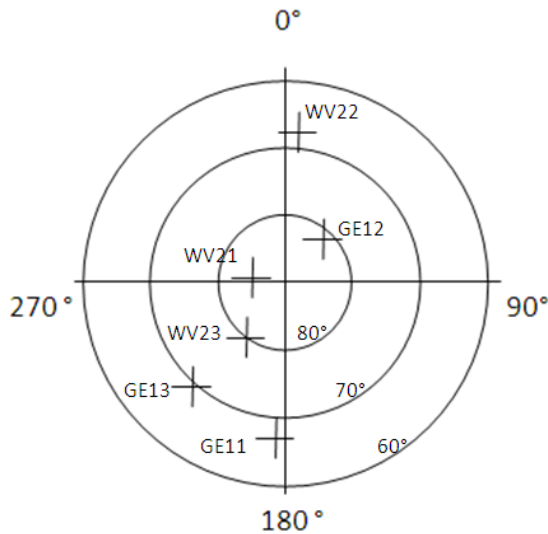


Fig. V.1. Posición de las imágenes de satélite en relación al azimuth y ángulo de elevación del sensor (complementario del ángulo off-nadir) en el momento de la toma de la imagen.

5.2.3. Puntos de control y comprobación. Datos *LiDAR*.

Las coordenadas de los puntos elegidos como *GCPs* e *ICPs* empleados en este estudio han sido medidos tal y como se detalla en el Capítulo 4 de esta Tesis. En este caso se emplearon 51 *GCPs* para llevar a cabo la orientación de sensor previa a la obtención de *DSMs*. La evaluación de la precisión altimétrica se llevó a cabo sobre 69 *ICPs*.

En este estudio se usó un *Ground Truth* consistente en un *DSM* basado en una nube de puntos *LiDAR* con cotas ortométricas (EGM96) y una alta precisión y resolución. Este *DSM* se generó a partir de un vuelo combinado de fotogrametría y *LiDAR*, realizado sobre la zona de estudio el 30 de Agosto de 2011, con una altura de vuelo de unos 350 m. Se utilizó un helicóptero con un sistema de escáner láser desarrollado por *AeroLaser System SL* basado en un escáner láser Q240i Riegl LMS empleando un ángulo de escaneo de 30° (*Field of View, FOV*). En estas condiciones de trabajo se alcanzó una densidad media de puntos superior a 2 puntos/m². La precisión vertical estimada del *DSM LiDAR* se calculó sobre 37 puntos de comprobación medidos mediante sistema diferencial de posicionamiento global (*DGPS*) distribuidos en toda la zona de trabajo, obteniendo como resultado un valor de 0.085 m (medido como *RMSE_z*).

5.3. METODOLOGÍA.

5.3.1. Estéreo pares.

Combinando las seis imágenes *PAN VHR* empleadas en este Capítulo, se formaron 15 estéreo pares diferentes (Tabla V.1). Para cada estéreo par, la Tabla V.1 muestra los principales factores que pueden afectar a los resultados de la precisión y/o completitud, como son la geometría del estéreo par (medida como ángulo de convergencia y como relación B/H), la diferencia entre las fechas de adquisición de las imágenes usadas para formar el estéreo par y, finalmente, los cambios en la posición solar de las dos tomas que conforman cada estéreo par. Obviamente, en el caso de los estéreo pares adquiridos en el modo *across-track*, cuanto mayor sea la diferencia temporal entre las tomas de las imágenes tendremos mayor probabilidad de encontrar diferencias radiométricas y espaciales entre dichas imágenes. Cambios en el área cubierta por nubes, en la vegetación, reflejos producidos por el agua, diferencias de la posición del sol, etc., contribuyen a acrecentar los posibles problemas de correlación digital entre las imágenes que conforman el estéreo par.

Tabla V.1. Características geométricas de los estéreo pares conformados a partir de las seis imágenes PAN empleadas en este estudio.

ID	Combinación de imágenes	Ángulo de convergencia (grados)	Ángulo de convergencia solar (grados)	Relación B/H	Diferencia en fecha de adquisición (días)
1	GE12-GE13	30.39	0.19	0.55	0
2	WV22-WV23	31.35	0.24	0.57	0
3	GE13-WV23	15.62	6.74	0.26	9
4	GE13-WV22	45.55	6.53	0.84	9
5	GE12-WV23	18.52	6.91	0.33	9
6	GE12-WV22	16.21	6.69	0.33	9
7	WV21-WV22	22.48	7.77	0.41	29
8	WV21-WV23	8.98	7.78	0.16	29
9	GE13-WV21	24.19	12.13	0.42	38
10	GE12-WV21	11.87	12.22	0.20	38
11	WV21-GE11	18.41	23.50	0.28	295
12	WV23-GE11	10.69	15.80	0.17	324
13	WV22-GE11	40.64	15.77	0.70	324
14	GE13-GE11	14.25	13.32	0.27	333
15	GE12-GE11	29.12	13.37	0.53	333

Con respecto a la geometría de las imágenes estéreo, el ángulo de convergencia puede ser definido como el ángulo, medido en el plano convergente o epipolar, entre dos rayos ópticos que unen dos puntos homólogos en las dos imágenes que conforman el estéreo par y el correspondiente punto común del terreno. La relación B/H está definida como el cociente entre la separación entre los centros ópticos de las dos imágenes (base estéreo) y la altura a la que orbita el sensor. Teóricamente, un ángulo de convergencia de entre 30° y 60° y un coeficiente B/H entre 0.5 y 1 serían los valores más recomendables, desde el punto de vista de la precisión altimétrica de los puntos obtenidos, para la creación de DEMs o DSMs.

En este sentido, el ángulo de convergencia, δ , entre dos imágenes (Li *et al.*, 2007) con valores de ángulo de elevación y azimut del sensor conocidos (α_1 , θ_1) y (α_2 , θ_2) puede ser calculado a partir de la siguiente expresión:

$$\cos \delta = \sin \alpha_1 \cdot \sin \alpha_2 + \cos \alpha_1 \cdot \cos \alpha_2 \cdot \cos (\theta_1 - \theta_2) \quad (1)$$

Para medir la diferencia entre la posición del sol en cada estéreo par, el ángulo de convergencia solar se calculó aplicando la fórmula 1, aunque en este caso se usaron los valores de azimut y elevación solar respectivamente. Cabe destacar que los dos estéreo pares puros de GE-1 y WV-2 (ID 1 y 2 respectivamente en la Tabla V.1) presentaron una configuración muy similar, con ángulos de convergencia de unos 30° y sin mostrar prácticamente ninguna diferencia en relación con las condiciones de iluminación (ángulo de convergencia solar prácticamente nulos).

5.3.2. Extracción de *DSMs* a partir de imágenes de satélite *VHR*.

El primer paso para la extracción de un *DSM* preciso a partir de estéreo pares formados por imágenes de satélite *VHR* se lleva a cabo mediante la orientación del sensor y el soporte de *GCPs* 3D. En las últimas décadas se han probado diferentes modelos matemáticos para realizar la orientación del sensor de imágenes de satélites *VHR* y geoposicionamiento 3D, todos ellos descritos en el Capítulo 4 de esta Tesis. *OrthoEngine*^{SE}, de *PCI Geomatica v. 2012*, desarrollado por *PCI Geomatics (PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canadá)*, fue el software fotogramétrico empleado en este trabajo para analizar los resultados obtenidos a partir de los modelos de sensor descritos en el Capítulo 4:

(i) Modelos físico 3D desarrollado por Toutin (2003) en el *Canada Centre for Remote Sensing (CCRS)*.

(ii) Modelo empírico basado en funciones racionales de tercer orden con coeficientes de polinomios racionales (*RPC*) suministrados por el proveedor y refinados mediante un ajuste polinómico de orden cero (*RPC0*) aplicando la metodología de transformaciones en el espacio imagen propuesta por Grodecki y Dial (2003).

El modelo de sensor *RPC0* ha sido señalado como el modelo de sensor que ofrece la mejor precisión en la fase de orientación trabajando con imágenes *PAN* de

WV-2 (Åstrand *et al.*, 2012; Aguilar *et al.*, 2013). Åstrand *et al.* (2012) evaluaron los resultados obtenidos a partir del uso de diferentes software (*PCI Geomatica*, *ERDAS Imagine* y *SISAR*) que aplicaban modelos tanto físicos como empíricos, concluyendo que la precisión de la orientación fue prácticamente independiente del software empleado. Tal y como se muestra en el Capítulo 4 de esta Tesis, el modelo de sensor *RPC0* alcanzó mejores resultados que el modelo *CCRS* para las imágenes *PAN* de GE-1 y WV-2. Sin embargo, estos resultados podrían ser diferentes en el caso de estéreo pares. Cabe destacar que, en el caso de *RPC0*, *OrthoEngine* calcula la orientación de cada imagen individualmente mediante los *GCPs* marcados en ella, pero no realiza un ajuste de bloque para compensar los residuos en el espacio imagen de ambas imágenes al mismo tiempo. Por el contrario, cuando se aplica el modelo de sensor *CCRS* se realiza una orientación del sensor real del estéreo par (intersección 3D) entre ambas imágenes (Toutin, 2012).

Con respecto al número de *GCPs*, y aunque algunos autores recomiendan el uso de sólo cuatro *GCPs* para la solución del modelo *RPC0* (Fraser y Ravanbakhsh, 2009; Åstrand *et al.*, 2012), en el estudio realizado sobre orientación del sensor en el Capítulo 4 de esta Tesis se llegó a la conclusión de que los mejores resultados con significación estadística se alcanzaban con el uso de 7 *GCPs*, tanto en el caso de GE-1 como WV-2. En el presente Capítulo se probaron tres sets diferentes de 7, 12 y 45 *GCPs* bien distribuidos sobre el área de trabajo. La precisión de la fase de orientación del sensor fue siempre estimada sobre los mismos 69 *ICPs*. De esta forma, y para el modelo *RPC0*, el *RMSE* se calculó sólo para cada eje *X* e *Y* tras la fase de orientación y para cada combinación de modelo de sensor y número de *GCPs* (*i.e.* no hay posibilidad del cálculo de la precisión en *Z*). Por otro lado, y en el caso del modelo de sensor *CCRS*, se realizó un informe de precisión completo incluyendo también el *RMSE* vertical. En el caso de 7 y 12 *GCPs*, todos los puntos fueron localizados en zonas abiertas. Sin embargo, el soporte de 45 *GCPs* obligó a que algunos de los puntos de comprobación estuvieran situados sobre bordillos, esquinas de edificios u otras estructuras elevadas. Es importante subrayar que, cuando los puntos de comprobación se localizan sobre estructuras elevadas, un pequeño error en el marcado de las coordenadas imagen (*pointing error*) puede provocar un error significativo en la determinación de la cota. En definitiva, la

orientación del sensor realizada para cada uno de los estéreo pares presentados en la Tabla V.1 fue llevada a cabo mediante cuatro estrategias diferentes: (i) aplicando el modelo de sensor *RPC0* y 7 *GCPs*, (ii) *RPC0* con 12 *GCPs*, (iii) *CCRS* con 12 *GCPs* y (iv) *CCRS* con 45 *GCPs*.

Después de llevar a cabo la fase de orientación del sensor, el módulo fotogramétrico de *PCI Geomatica*, denominado *OrthoEngine*, fue también usado para la extracción de *DSMs*. La extracción del *DSM* se realizó mediante un proceso de correlación automática basado en áreas (*Area Based Matching*) efectuado sobre imágenes epipolares calculadas a partir de las imágenes originales que formaban el estéreo par. Este procedimiento de extracción automática se basa en una correlación cruzada normalizada que se realiza de forma jerárquica en siete pasos. El algoritmo determina coeficientes de correlación entre 0 y 1 para cada píxel correlado, donde 0 representa una ausencia total de correlación y 1 representa el *stereo matching* perfecto. Cuando el coeficiente de correlación calculado para un punto es menor de 0.5, este punto es eliminado y su altura no se calcula, por lo que genera un hueco (*gap*) con la consecuente reducción en la completitud del *DSM*. Para la obtención de precisiones sub-píxel en la búsqueda de puntos homólogos, el procedimiento empleado ajusta una superficie de segundo orden a partir de los puntos con máximo coeficiente de correlación, detectando el máximo local en la ventana de búsqueda y, por tanto, permitiendo que la solución no tenga que coincidir obligatoriamente con los valores enteros de la posición de cada píxel en dicha ventana (Chen y Chaapel, 2008). Sólo los intervalos de muestreo (*i.e.* la resolución deseada en el *DSM* final) y el nivel de detalle (*i.e.* número de decimales de las cotas) son los parámetros que pueden ser ajustados por el usuario en el módulo de extracción de *DSMs* de *OrthoEngine*. Para cada *DSM*, se generaron las imágenes epipolares con un tamaño de 0.5 m. En este sentido, un *DSM* de gran detalle con 32 bits y un factor de muestra de píxel de 2 fue seleccionado en *OrthoEngine*, por lo que se generaron *DSMs* tipo *Grid* con un paso de malla de 1 m. Debido a que los *DSMs* extraídos por *OrthoEngine* estaban referenciados al elipsoide WGS84 (alturas elipsoídicas), se usó el modelo de geoide EGM96 para realizar la transformación a alturas ortométricas. Posteriormente no se aplicó ninguna edición ni filtrado a los *DSMs*.

5.3.3. Evaluación de la calidad de los DSMs.

La calidad de los DSMs extraídos fue evaluada mediante dos indicadores complementarios: precisión vertical y completitud. Teniendo en cuenta que la precisión vertical y la completitud de un DSM dependen en gran parte del tipo de cobertura del suelo sobre la que han sido obtenidos, se consideraron tres áreas diferentes: (i) toda la zona de trabajo, (ii) áreas que no han sufrido cambios a lo largo del tiempo, y (iii) áreas urbanas (Fig. V.2). En todos los casos, el DSM derivado de los datos LiDAR, como se ha descrito anteriormente, fue usado como *Ground Truth* para llevar a cabo la evaluación de la precisión de los DSMs extraídos a partir de cada estéreo par. Toda la zona de trabajo cubre 7.71 km² con más de 18 millones de puntos LiDAR disponibles. Siete áreas de control que representaban zonas urbanas y que cubrían unos 1.22 km² (casi tres millones de puntos LiDAR) fueron consideradas. Finalmente, 34 áreas planas y abiertas (*open terrain*) y sin cambios con el paso del tiempo, como campos de fútbol, pistas de tenis o baloncesto y similares, fueron incluidas en el estudio. Dichas áreas abarcaron alrededor de 0.03 km², estando representadas por unos 78,508 puntos LiDAR. Cabe destacar que no se aplicó ninguna edición a los DSMs extraídos a partir de imágenes de satélite VHR y, además, los huecos producidos por deficiencias de *stereo matching* no fueron rellenados mediante ningún proceso de interpolación.

En el caso de la evaluación de la precisión vertical sobre la totalidad de la zona de trabajo, el DSM tipo *grid* derivado de la nube de puntos LiDAR fue interpolado con un espacio de malla de 1 m mediante triangulación lineal. El DSM LiDAR finalmente obtenido fue empleado como *Ground Truth* para la evaluación de la precisión vertical de los DSMs obtenidos a partir de imágenes de satélite VHR. El modelo de orientación del sensor empleado en este caso particular fue *RPC0* con el soporte de 12 *GCPs*. Tras eliminar los errores groseros de la población de residuos verticales aplicando la conocida regla 3-sigma (Daniel y Tennant, 2001), se calcularon para la evaluación de la precisión vertical final estadísticos como: la media, desviación estándar, errores verticales lineales (percentiles de residuos expresados en valor absoluto) al 90th (LE90) y 95th (LE95).

Con el fin de conocer la precisión vertical de los DSMs extraídos en áreas urbanas, se realizó una evaluación sobre una zona urbana representativa de unos

93,000 m² situada en el pueblo de Villaricos (localizado en el norte de la zona de trabajo) siguiendo el mismo procedimiento descrito para la totalidad del área de estudio.



Fig. V.2. Áreas para evaluar la calidad de los *DSMs*. Las zonas urbanas están delineadas en color blanco, las áreas sin cambios aparecen coloreadas en negro, y el área de trabajo está delimitada con línea negra discontinua.

Si nos fijamos en las 34 áreas que no han sufrido cambios, la interpolación de la nube de puntos *LiDAR* (puntos espaciados irregularmente) fue llevada a cabo mediante el proceso de triangulación de *Delaunay* incluido en *RapidForm* (*INUS Technology Inc., Seoul, Korea*). De esta forma, no se modificó la nube de puntos original y se minimizaron los errores de interpolación. *RapidForm* se usó para comparar el *Ground Truth LiDAR* y los diferentes *DSMs* creados a partir de imágenes de satélite *VHR*. Para esta comparación se calculó la diferencia en *z* entre el *Ground Truth* y los diferentes *DSMs*. Hay que destacar que *RapidForm* sólo

reporta valores medios y desviación estándar cuando calcula la desviación de la distancia entre dos *DSMs*. Por lo tanto, los valores obtenidos de las diferencias en z no están disponibles para realizar análisis posteriores, (e.g. LE90 o LE95). De nuevo la regla 3-sigma (Daniel y Tennant, 2001) fue usada con el fin de eliminar los errores groseros (*outliers*) antes de acometer la evaluación estadística final. Para todos los análisis de precisión se calcularon diferencias de cota, entendiendo que el valor es positivo cuando el *DSM* derivado de satélites *VHR* se sitúa por encima del *DSM LiDAR*.

Además de la evaluación de la precisión, la completitud de los *DSMs* también fue estimada para las diferentes zonas estudiadas. Recordemos que la determinación por *stereo matching* de los puntos del *DSM* extraídos a partir de estéreo pares de imágenes *VHR* falla cuando el coeficiente de correlación calculado es menor de 0.5 (no data en entorno *OrthoEngine*). Así, la relación entre el número de puntos homólogos encontrado en ambas imágenes y el número máximo posible de puntos (dado en porcentaje) ofrece una medida cuantitativa de completitud del *DSM*.

5.4. RESULTADOS.

5.4.1. Precisión de los *DSMs*.

La evaluación de la precisión vertical de los *DSMs* extraídos de estéreo pares de satélites *VHR* fue llevada a cabo mediante 69 *ICPs* tras realizar la orientación de sensor y, en una segunda fase, mediante el uso de un *DSM LiDAR* usado como *Ground Truth* sobre las 34 áreas planas y sin cambios ya descritas. La Tabla V.2 muestra el *RMSE* estimado sobre los 69 *ICPs* para cada proyecto realizado a partir de los estéreo pares puros de GE-1 (ID 1) y WV-2 (ID 2). Si nos fijamos en el efecto producido por los diferentes modelos de sensor y el número de *GCPs* empleados como soporte sobre la precisión planimétrica alcanzada en la fase de orientación del sensor, podemos observar que las diferencias son despreciables. Además, cuando trabajamos con 12 *GCPs*, la precisión estimada para los modelos de sensor *RPC0* y *CCRS* fue muy similar. Cabe destacar que, en el caso de imágenes individuales, tal y como se muestra en el Capítulo 4 de esta Tesis, el modelo de

sensor *RPC0* con 7 *GCPs* fue claramente mejor (con precisiones planimétricas $RMSE_{2D}$ de alrededor de 0.37 m y 0.44 m para GE-1 y WV-2 respectivamente) que el modelo de sensor *CCRS* con 12 *GCPs* (con precisiones planimétricas de 0.50 m en el caso de GE-1 y 0.63 m para WV-2). Sin embargo, estas diferencias han sido reducidas en gran medida al realizar la orientación del sensor del estéreo par con el modelo de sensor *CCRS* (Tabla V.2). Como ya se ha mencionado anteriormente, *OrthoEngine* no proporciona la precisión vertical de los *ICPs* en el caso del modelo de sensor *RPC0*.

Tabla V.2. Resultados de la orientación del sensor realizada para los estéreo pares de GE-1 y WV-2 (ID 1 e ID 2), y resultados estadísticos (media y desviación estándar) obtenidos a partir de la comparación con los datos *LiDAR* en las zonas sin cambios.

Estéreo par	Modelo de sensor	No. GCPs	RMSE en 69 ICPs				DSM VHR-LiDAR (m)	
			<i>X</i>	<i>Y</i>	<i>XY</i>	<i>Z</i>	Media	σ
ID 1 GE-1	<i>RPC0</i>	7	0.287	0.269	0.393	-	0.115	0.399
	<i>RPC0</i>	12	0.273	0.264	0.380	-	0.141	0.387
	<i>CCRS</i>	12	0.283	0.254	0.375	0.573	-0.023	0.411
	<i>CCRS</i>	45	0.241	0.222	0.328	0.586	-0.197	0.426
ID 2 WV-2	<i>RPC0</i>	7	0.365	0.370	0.520	-	-0.026	0.528
	<i>RPC0</i>	12	0.338	0.349	0.486	-	-0.089	0.531
	<i>CCRS</i>	12	0.282	0.398	0.488	1.008	-0.238	0.682
	<i>CCRS</i>	45	0.274	0.347	0.442	0.770	0.033	0.637

Una vez realizada la orientación del sensor para las diferentes combinaciones de modelos de sensor y número de *GCPs*, cada *DSM* generado a partir de los estéreo pares fue comparado con el *DSM* usado como *Ground Truth* para estimar la precisión vertical sobre las 34 áreas sin cambios. Los resultados obtenidos muestran como las diferencias en precisión vertical (medida como desviación estándar) atribuibles a las variables modelo de sensor o número de *GCPs* fueron pequeñas. En cuanto a los sensores estudiados, los *DSMs* obtenidos a partir del estéreo par puro de GE-1 fueron más precisos que los obtenidos a partir de WV-2 (mejorando la precisión vertical en un valor medio de aproximadamente 0.19 m, *i.e.* alrededor de un 30%). Hay que tener en cuenta que la precisión vertical del

DSM (σ) para el estéreo par puro de GE-1 fue ligeramente mejor que el tamaño medio de píxel real de las imágenes originales (0.439 m). En el caso de WV-2, el tamaño medio de píxel real (0.498 m) fue menor que la precisión obtenida, especialmente cuando usamos el modelo de sensor *CCRS*. Generalmente no hubo errores sistemáticos importantes, aunque ocasionalmente se encontraron desviaciones verticales de alrededor de ± 0.20 m para los modelos de sensor y los estéreo pares puros estudiados (Tabla V.2).

El estudio de la evaluación de la precisión llevada a cabo hasta ahora refleja las mejores precisiones planimétricas y altimétricas que potencialmente se podrían adquirir en un *DSMs* generados a partir de imágenes de satélites *VHR*, debido a que la evaluación se ha realizado sobre zonas planas, abiertas y sin cambios. Sin embargo, también es importante conocer la precisión vertical de los *DSMs* extraídos en las zonas urbanas, así como la precisión global en el área total de trabajo. En este sentido, el modelo de sensor *RPCO* con 12 *GCPs* fue aplicado en la zona urbana situada en Villaricos. Una vez eliminados los *outliers* de la población de residuos verticales generados para GE-1 y WV-2 (*i.e.* 2,11% de valores atípicos detectados en el caso de GE-1, y un 2.09 % de valores atípicos en el caso de WV-2), se procedió a la estimación de los estadísticos o indicadores de precisión vertical comentados previamente. En el caso del *DSM* extraído del estéreo par puro de GE-1, se registró una desviación estándar de 2.673 m, con unos valores de LE90 y LE95 de 5.050 m y 6.864 m respectivamente. En el caso de WV-2, los resultados obtenidos fueron muy similares, con valores concretos de 2.740 m (σ), 5.257 m (LE90) y 7.096 m (LE95). Respecto a los errores sistemáticos, cifras de 0.875 m y 1.027 m fueron estimadas para los estéreo pares de GE-1 y WV-2 respectivamente. En la Fig. V.3 podemos observar el detalle de un área urbana de este estudio, sugiriendo que los *DSMs* extraídos de imágenes de satélite *VHR* deberían sufrir una importante labor de edición posterior en las zonas urbanas, especialmente en los bordes de los edificios donde el efecto de suavizado de los *DSMs* suele producir errores importantes (Fig. V.3). Este efecto de suavizado, señalado ya por (Alobeid *et al.*, 2010), resultó en un incremento significativo del error sistemático. Además, Alobeid *et al.* (2010) llegaron a la conclusión de que el procedimiento de *matching* para generar *DSMs* es crucial en entornos urbanos. De hecho, encontraron que el algoritmo de correlación basado en áreas y usando mínimos cuadrados (similar al

usado por *OrthoEngine*) no fue capaz de generar contornos claros de edificios y dependió fuertemente de las oclusiones. Por otra parte, el algoritmo de *matching* semiglobal (Hirschmüller, 1998) y de programación dinámica (Birchfield y Tomasi, 1998) alcanzaron los mejores resultados trabajando en zonas urbanas.

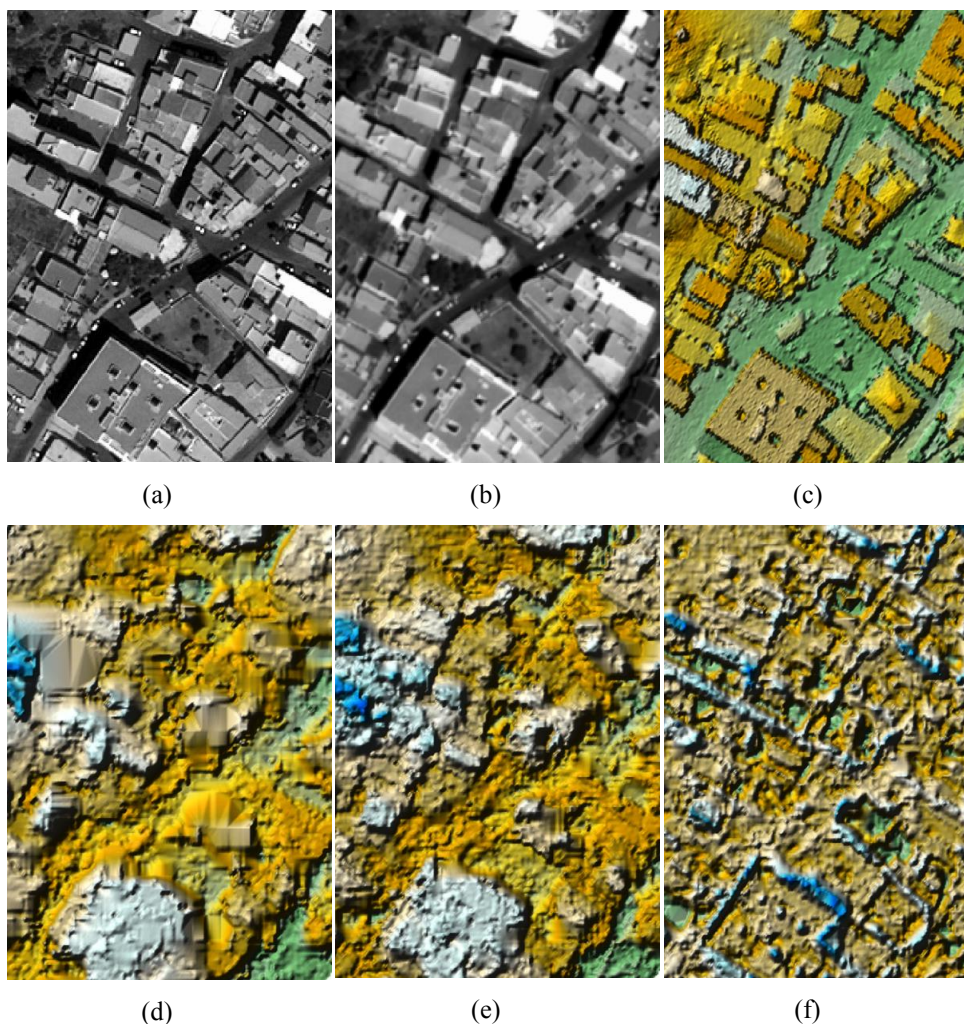


Fig. V.3. Análisis visual sobre un área urbana limitada (112 m x 150 m): (a) Imagen PAN original GE12, (b) Imagen PAN original WV23, (c) DSM LiDAR, (d) DSM del estéreo par ID 1, (e) DSM del estéreo par ID 2, y (f) residuos verticales obtenidos como diferencia entre el DSM del estéreo par de WV-2 (ID 2) y el DSM LiDAR.

Una evaluación de la precisión sobre toda el área de trabajo de los estéreo pares puros de GE-1 y WV-2 fue también llevada a cabo tomando el DSM LiDAR como referencia. El modelo de sensor empleado fue *RPC0* con 12 *GCPs*. En el caso

de GE-1, se obtuvieron valores de precisión vertical de 1.325 m (σ), 2.039 m (LE90) y 3.165 (LE95) calculados sobre un total de 6,880,160 residuos de z (2.20% de *outliers* eliminados). En el caso de WV-2, las precisiones verticales obtenidas fueron sensiblemente inferiores, con valores de 1.751 m (σ), 2.559 m (LE90) y 4.058 m (LE95) calculados sobre 7,189,869 residuos de z (1.51% de *outliers*). Respecto a los errores sistemáticos, GE-1 y WV-2 presentaron sesgos de 0.16 m y 0.12 m respectivamente. Para todos los tipos de cobertura de suelo analizados, el DSM extraído a partir del estéreo par puro de GE-1 consiguió mejores precisiones que el DSM generado a partir del estéreo par puro de WV-2.

La Fig. V.4 nos ayuda a analizar la precisión vertical de las áreas sin cambios de los DSMs para cada estéreo par considerado en este Capítulo de Tesis, en este caso a partir estéreo pares puros y mixtos. De esta forma, y respecto a la incertidumbre vertical medida como desviación estándar (Fig. V.4a), esta sigue una tendencia a disminuir con el aumento del ángulo de convergencia (*i.e.* mejora de la geometría del estéreo par), tal y como ya se ha señalado en otras investigaciones (Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2009). Hay que destacar que la precisión vertical para los estéreo pares puros, con un ángulo de convergencia de 30.39° para GE-1 y 31.35° para WV-2 (señalados mediante un círculo discontinuo en la Fig. V.4a), resultaron ser ligeramente mejores que los obtenidos a partir de los estéreo pares mixtos. Esto se debe a que los estéreo pares puros se tomaron en condiciones ideales, es decir, sin ninguna diferencia en la fecha de adquisición y con casi la misma posición del sol. El principal problema del uso de estéreo pares mixtos se debe a las diferencias radiométricas entre las imágenes que forman el estéreo par que, en gran medida, dependen de la diferencia en las fechas de adquisición de las imágenes. En este sentido, Crespi *et al.* (2008) ensayaron satisfactoriamente varios filtros de imagen (entre ellos el filtro de Wallis) para mejorar la definición de los bordes y posteriormente reducir los errores radiométricos en las imágenes originales que formaban un estéreo par del satélite Cartosat-1. En nuestro caso, y sin la aplicación de ningún filtro previo, las precisiones verticales oscilaron entre 0.60 m y 0.90 m en estéreo pares mixtos con ángulos de convergencia entre 22° y 30° (*i.e.* presentando una geometría similar a la de los estéreo pares puros). En cuanto a los errores sistemáticos de los DSMs (Fig. V.4b), los ángulos de convergencia inferiores a 18°, o relación B/H inferiores a 0.28, originaron errores

sistemáticos verticales más elevados y, además, produjeron valores más variables. Este hecho fue más intenso cuando se realizó la orientación del sensor con el modelo *RPC0* y soporte de 7 *GCPs*. Estos resultados permiten indicar que las configuraciones geométricamente poco robustas de estéreo pares deberían ser usadas con mucho cuidado.

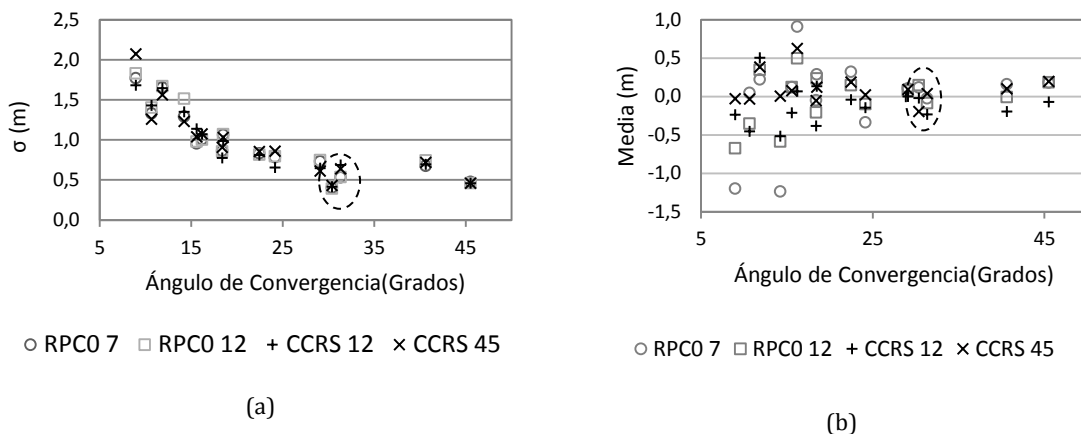
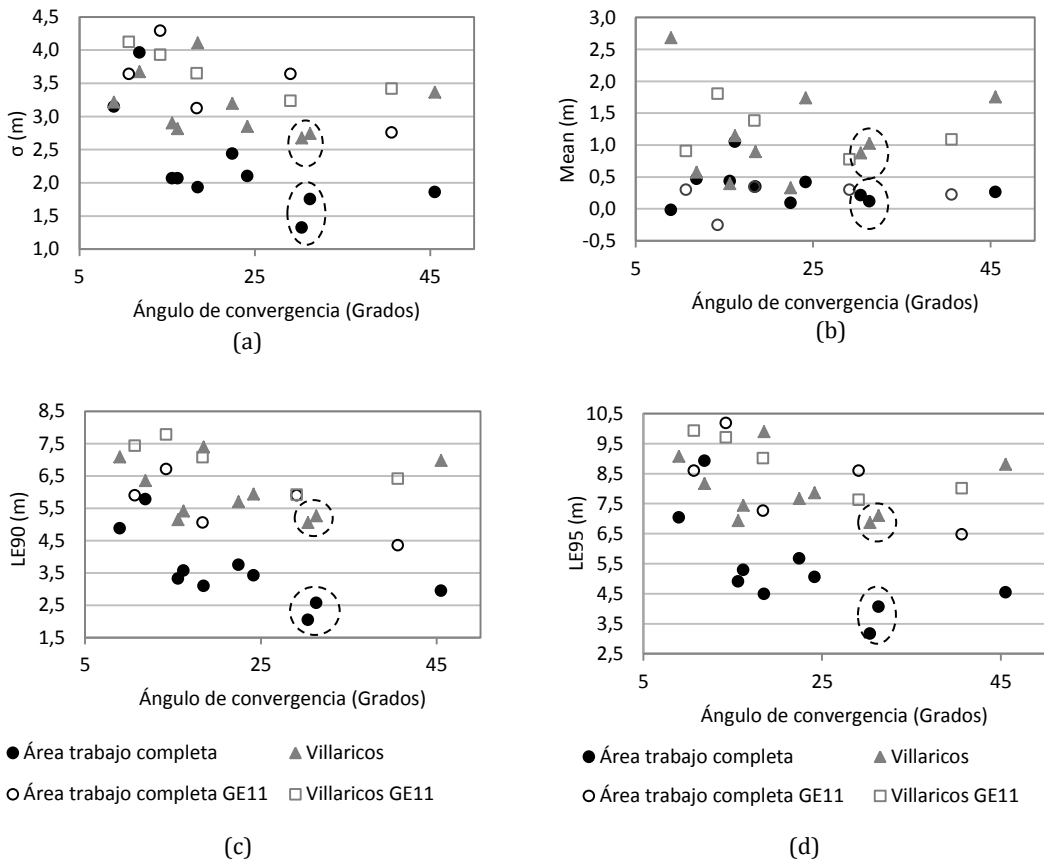


Fig. V.4. Relación ente las diferencias estadísticas en z, tras eliminar los valores atípicos, y el ángulo de convergencia de cada estéreo par. Todos los estadísticos presentados han sido calculados sobre zonas sin cambios. Las diferencias en z se refieren a la diferencia de altura entre cada *DSM* extraído de los estéreo pares y los datos de elevación del *LiDAR*. Los datos de los estéreo pares puros están señalados por un círculo discontinuo.

Cuando la evaluación de la precisión fue llevada cabo en toda la zona de trabajo (Fig. V.5), de nuevo las precisiones verticales más altas, en términos de desviación estándar, LE90 y LE95, fueron alcanzadas para elevados ángulos de convergencia. De esta forma, hay que destacar que los cinco estéreo pares mixtos que fueron tomados con una diferencia de más de 294 días (*i.e.* aquellos estéreo pares que usan la imagen GE11, representados en la Fig. V.5 con círculos negros sin relleno) muestran las peores precisiones verticales. Esto se debe, como podremos ver más tarde, a los cambios ocurridos a lo largo del tiempo, principalmente sobre zonas agrícolas. En la misma Fig. V.5, pero en este caso centrándonos en la zona urbana de Villaricos, la relación entre el ángulo de convergencia y la precisión vertical no es tan clara. Además, no se detectan diferencias entre los estéreo pares cuyas imágenes fueron adquiridas con menos

de 39 días de diferencia (triángulos grises sólidos en Fig. V.5) y las tomadas con más de 294 días de diferencia (triángulos grises sin relleno en Fig. V.5). En otras palabras, los cambios ocurridos a lo largo del tiempo no influyeron significativamente en la precisión obtenida en *DSMs* sobre zonas urbanas. Por último, y no por ello menos importante, el porcentaje de valores groseros detectados por la regla 3-sigma osciló entre 1.13% y 2.29% para todos los casos estudiados. El porcentaje de *outliers* no estuvo relacionado ni con el ángulo de convergencia ni tampoco con la fecha de adquisición de los datos.



5.4.2. Completitud de los *DSMs*.

La Fig. V.6 muestra que, en general, el modelo *RPC0* obtuvo resultados significativamente mejores en la completitud de los *DSM* generados que el modelo *CCRS* cuando se estimó para toda el área de trabajo. Resultados similares fueron obtenidos para un estéreo par de IKONOS por Toutin (2006). Sin embargo, trabajando con productos estéreo básicos de QuickBird (Toutin, 2006) y con imágenes estéreo de alta resolución de Radarsat-2 (Toutin, 2012), el modelo de sensor *CCRS* alcanzó una mayor tasa de aciertos en el proceso de *matching* (i.e. una mayor completitud). Es importante subrayar que, en el caso de estéreo pares puros, WV-2 alcanzó una completitud mucho mejor (83.35% para el modelo *RPC0* y 81.58% para *CCRS*) que la proporcionada por GE-1 (74.50% para el modelo *RPC0* y 73.64% para *CCRS*). Considerando los 15 estéreo pares, la Fig. V.6a indica que la diferencia temporal entre la adquisición de las imágenes que forman cada uno de ellos resultó ser el factor más importante en relación con de completitud del *DSM* en todo el área de trabajo. De hecho, los peores resultados fueron obtenidos cuando se incluyó la imagen GE11 (capturada en Septiembre de 2010) en los estéreo pares mixtos, lo que significa que la diferencia entre la captura de cada una de las imágenes que forman el estéreo par fue de 295 días o incluso más. Resumiendo, los valores de completitud fueron peores cuando se incrementó la diferencia entre la toma de las imágenes que forman cada estéreo par. Esto se hizo especialmente evidente en áreas que presentaron cambios temporales importantes. Sin embargo, el ángulo de convergencia no mostró ninguna clara relación con la completitud del *DSM* como se puede apreciar en la Fig. V.6b. En este sentido, la Fig. V.7 muestra la completitud del *DSM* (modelo de sensor *RPC0* con 12G *GCPs*) mediante la representación de los coeficientes de correlación o *score channel* calculados en el proceso de *matching* en *OrthoEngine*. Un mayor número de píxeles blancos (Fig. V.7b y c) indica una mejor correlación, mientras que los píxeles negros representan puntos que no han sido computados ya que sus coeficientes de correlación estuvieron por debajo de 0.5. Cabe destacar que, en las zonas agrícolas localizadas al oeste en la Fig. V.7, la completitud de *DSM* fue mucho mejor usando imágenes con la misma fecha de adquisición (Fig. 7b) que al emplear imágenes con una diferencia de 324 días en la toma de las imágenes (Fig. 7c). En las áreas urbanas, en general menos cambiantes con el tiempo y localizadas al

noreste de la Fig. V.7, la diferencia de fechas entre la toma de las imágenes no afectó tanto como en las zonas agrícolas.

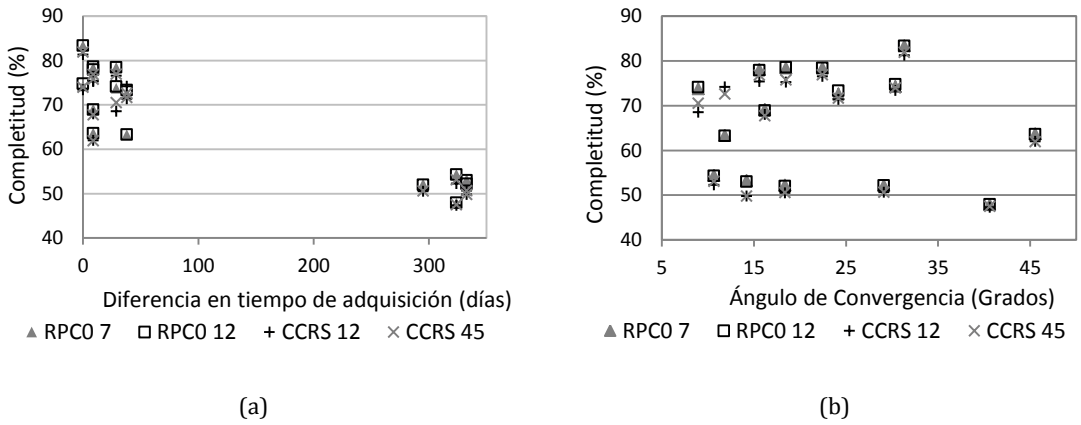


Fig. V.6. Completitud de cada *DSM* extraído para estéreo pares de satélites *VHR* sobre todo el área de trabajo en relación con: (a) diferencia temporal entre la adquisición de las imágenes y (b) ángulo de convergencia.

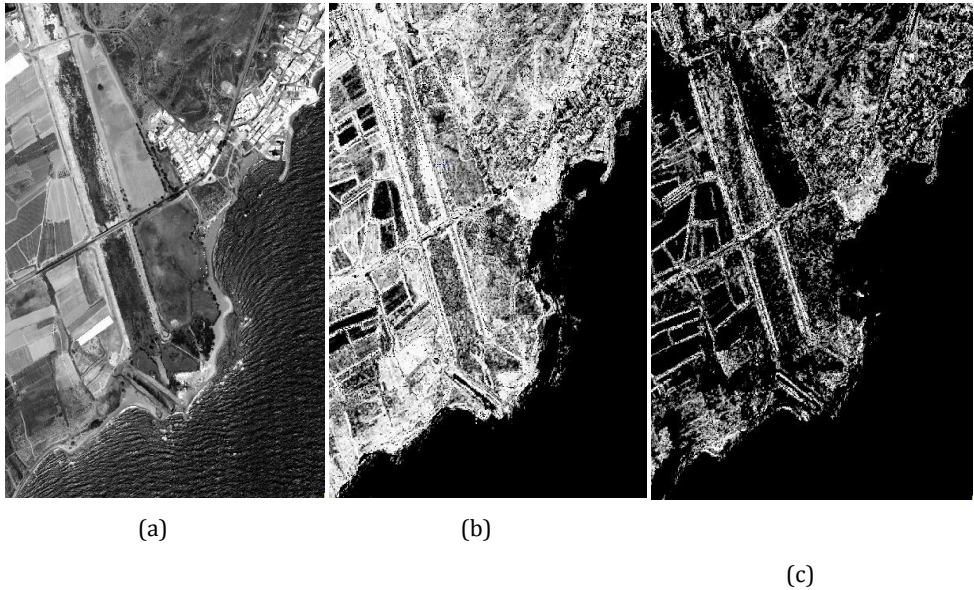


Fig. V.7. Completitud sobre un área de estudio limitada (160 m x 160 m): (a) imagen original PAN WV21, (b) *score channel DSM ID 2* (ver Tabla V.1), (d) *score channel DSM ID 13* (ver Tabla V.1).

La Fig. V.8 representa la relación entre la completitud de los *DSMs* y los ángulos de convergencia para cada estéreo par. Hay que tener en cuenta que los cinco estéreo pares que presentan más de 294 días entre la fecha de adquisición de las imágenes fueron previamente eliminados para evitar su influencia en los resultados. Igualmente, el modelo de sensor aplicado fue *RPC0* con el soporte de 12 *GCPs*. Se puede apreciar que el ángulo de convergencia no tiene ninguna influencia en la completitud en áreas planas y sin cambios. En el caso de zonas urbanas, la completitud de los *DSMs* fue mayor cuando decreció el ángulo de convergencia. Por lo tanto, no se puede recomendar un gran ángulo de convergencia o relación B/H para estéreo imágenes de zonas urbanas debido al incremento de zonas de oclusión y las sombras de las imágenes que conforman el estéreo par (Alobeid *et al.*, 2010; Eckert y Hollands, 2010). Respecto a los estéreo pares puros, resaltados por una elipse discontinua en la Fig. V.8, de nuevo WV-2 muestra mayor completitud que GE-1 en áreas sin cambios (77.69% frente a un 73.59% respectivamente) y, especialmente, en zonas urbanas (78.83% y 63.23%).

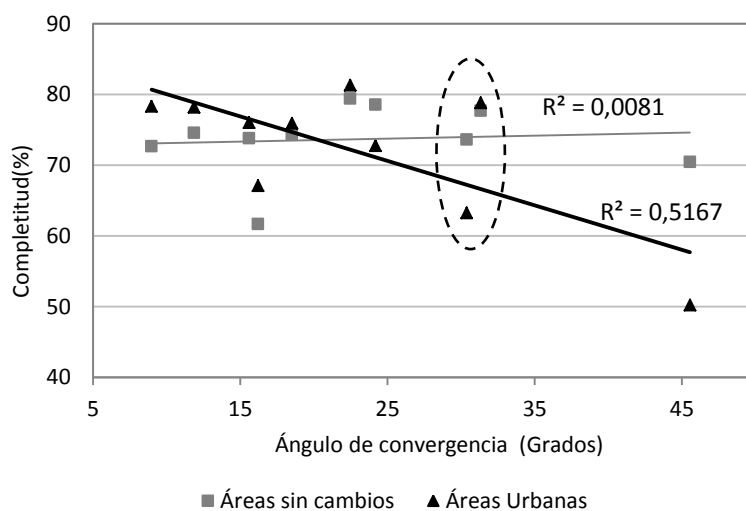


Fig. V.8. Completitud para cada *DSM* derivado de estéreo pares sobre las zonas sin cambios y zonas urbanas dependiendo del ángulo de convergencia. Líneas de tendencia lineal. Los estéreo pares puros se han indicado con una elipse discontinua.

5.4.3. Características Radiométricas.

Las imágenes de satélite *VHR* de GE-1 y WV-2 son capturadas con un rango dinámico de 11 bits por píxel, por lo que cada píxel puede alcanzar hasta 2048 números digitales (*Digital Number, DN*). Tal y como se ha descrito en el Capítulo 3 de esta Tesis, el análisis radiométrico sobre las imágenes *PAN* de ambos satélites ha mostrado que las imágenes correspondientes a WV-2 presentan una mayor compresión de los *DNs* que las imágenes *PAN* de GE-1. En dicho Capítulo se muestra visualmente esta compresión, tanto con las imágenes de los histogramas referentes a las seis imágenes de satélite empleadas (Fig. III.2 del Capítulo 3) como con las imágenes que representan el análisis visual sobre una zona limitada (Fig. III.3 del Capítulo 3). Además, y tal como hemos visto el Capítulo 3 de esta Tesis, la calidad de imágenes digitales se puede evaluar basándose en el cómputo del ratio de borrosidad (*Blur ratio, Br*) y el ratio de ruido (*Noise ratio, Nr*) de la imagen (Choi *et al.*, 2009).

En el caso de los estéreo pares puros de GE-1 y WV-2, debe señalarse que los *DSMs* de GE-1 alcanzaron mayor precisión que los obtenidos de WV-2, aunque los valores de completitud de los *DSMs* de GE-1 resultaron ser inferiores a los generados a partir de WV-2. Las diferencias radiométricas encontradas entre las imágenes de GE-1 y WV-2 podrían estar relacionadas con estos resultados. La hipótesis que se deduce de este trabajo es que las diferencias observadas en la calidad de las imágenes de GE-1 y WV-2 puede afectar a los resultados del algoritmo de correlación automática para la generación de los *DSMs*. Las diferencias en la calidad de la imagen podrían deberse a las condiciones operacionales en el momento de la adquisición de la imagen, como el ángulo de inclinación de la escena, elevación solar y condiciones atmosféricas (Poli *et al.*, 2010). Sin embargo, los resultados descritos en el Capítulo 3 apuntan a que las características radiométricas específicas de ambos sensores son el factor más importante. En este sentido, cuando se aplica el algoritmo de *matching* automático sobre un estéreo par, las imágenes borrosas pueden conducir a mejorar la tasa de éxito en dicho proceso (*i.e.* es más fácil encontrar puntos homólogos), aunque los puntos correlados tienen una peor precisión. De hecho, estudios previos realizados usando algoritmos de correlación automática de *DSMs* incluidos en *OrthoEngine* y

Leica IMAGINE orthoBASE (ambos usan una estrategia similar para el *matching*) demuestran que el efecto de suavizado de la imagen mejoró las tasas de correlación conseguidas, aunque también los puntos correlados en los *DSMs* extraídos resultaron ser menos precisos (Liu *et al.*, 2005; Shih y Liu, 2005). En nuestro caso, se detectó un efecto de suavizado o falta de contraste en las imágenes de WV-2 puesto de manifiesto en el Capítulo 3 de esta Tesis. La Fig. V.9 muestra una clara relación entre la completitud sobre todo el área de trabajo y el valor medio de *Br* para las imágenes que conforman cada estéreo par. En este caso, no se han introducido los resultados de los estéreo pares mixtos que incluyen la imagen GE11 ya que pueden introducir errores significativos. También hay que mencionar que la línea imaginaria que une los puntos correspondientes con los estéreo pares puros de GE-1 (ID 1) y WV-2 (ID 2) resultaría ser casi paralela a la línea de tendencia correspondiente a todos los datos representados en la Fig. V. 9.

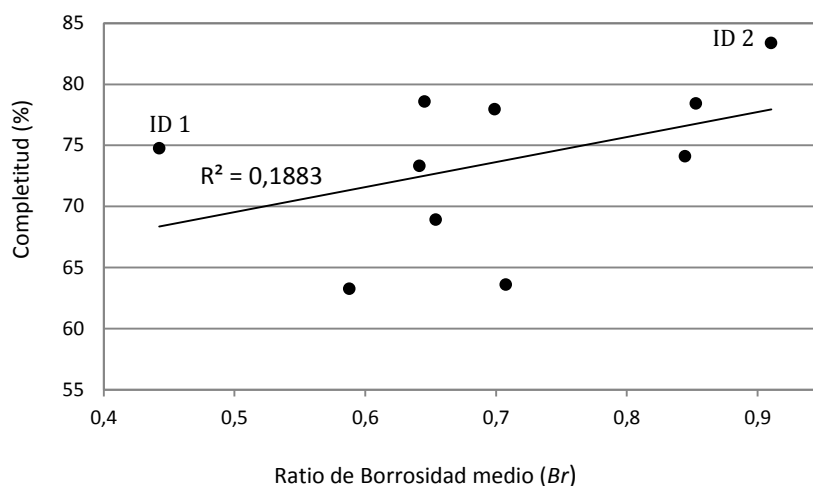


Fig. V.9. Relación entre la completitud sobre todo el área de trabajo y el valor medio de *Br* (ratio de borrosidad) para cada estéreo par.

Además, las zonas urbanas presentan diferencias de *Br* mayores entre las imágenes de GE-1 y WV-2 que las zonas no urbanas. Centrándonos en la zona urbana de Villaricos, la media de *Br* fue de 0.326 en imágenes de GE-1, mientras que para las imágenes de WV-2 se calculó un valor de *Br* de 0.869. Si nos fijamos en las zonas agrícolas, los valores medios de *Br* tomaron valores de 0.725 y 0.989

para imágenes de GE-1 y WV-2 respectivamente. Hay que tener presente que las diferencias de completitud en los *DSMs* de zonas urbanas entre los estéreo pares puros de GE-1 y WV-2 fueron también mayores que los valores obtenidos sobre las 34 zonas sin cambios o sobre todo el área de trabajo. Además, hay que destacar que los tres valores más altos de completitud de los *DSMs* en zonas urbanas fueron obtenidos por *DSMs* extraídos de tres estéreo pares compuestos íntegramente por imágenes de WV-2 (*i.e.* ID 2, 7 y 8; ver Tabla V.1).

Todos los satélites *VHR* emplean la tecnología *TDI*. Esta técnica de captura de imágenes en movimiento básicamente detecta patrones de carga y los desplaza a través del dispositivo de acoplamiento de carga (*charge-coupled device, CCD*) para alcanzar la línea final. Sin embargo, la acumulación de señal con la tecnología *TDI* conduce a un suavizado de la imagen, especialmente en la dirección del vuelo, ya que las líneas *TDI* no pueden representar exactamente la superficie de la misma escena y por lo tanto se produce una mezcla de señal (Baltsavias *et al.*, 2001). El hecho de que las imágenes de satélite *PAN* de GE-1 utilicen 16 fases *TDI*, mientras que las imágenes de WV-2 empleen 32 fases *TDI*, podría contribuir al mayor efecto borroso observado en las imágenes de WV-2.

De esta manera, sería interesante estudiar si las diferencias sobre la calidad de las imágenes *PAN* entre GE-1 y WV-2 son debidas simplemente a las condiciones operacionales relacionadas con la adquisición de la imagen, o son causadas por las características específicas de los sensores. Además, es extremadamente importante tener abierta esta línea de investigación para poder investigar si las diferencias radiométricas mencionadas entre los dos satélites realmente afectan a la precisión vertical de los *DSMs* y a los resultados de completitud cuando se usen otros paquetes fotogramétricos y se apliquen otros algoritmos de correlación automática.

5.5. CONCLUSIONES.

La precisión vertical de *DSMs*, llevada a cabo sobre zonas planas y sin cambios, no se mostró afectada por los modelos de orientación del sensor empleados, RPC0 y CCRS, ni por el número de GCPs de soporte utilizados. El error vertical observado, medido como desviación estándar, varió entre 0.39 m y 2.07 m

dependiendo fundamentalmente del uso de estéreo pares puros o mixtos y, en este segundo caso, del tiempo transcurrido entre la toma de las dos imágenes que conforman el estéreo par. La precisión vertical calculada en estas zonas fue siempre mayor al incrementar el ángulo de convergencia o la relación B/H. Además, los errores sistemáticos verticales fueron mayores cuando se usaron estéreo pares cuya configuración no era geométricamente robusta, *i.e.*, con ángulos de convergencia menores de 18° (o relación B/H menor de 0.28). En general, la calidad de los *DSMs* extraídos depende, en gran parte, del tipo de cubierta, siendo mejores los *DSMs* que cubren zonas planas y abiertas que los obtenidos sobre zonas urbanas. En relación a las precisiones verticales obtenidos sobre el conjunto del área de trabajo, éstas variaron entre 1.33 m (σ), 2.04 m (LE90) y 3.16 m (LE95) y 4.29 m (σ), 6.69 m (LE90) y 10.17 m (LE95). Estas variaciones dependieron, principalmente, de la geometría de las imágenes que formaban el estéreo par. Sin embargo, la precisión vertical en zonas urbanas no estuvo tan influenciada por el ángulo de convergencia, presentando valores relativamente pobres que variaron entre los 5.05 m y los 7.77 m (LE90).

Respecto a la completitud de los *DSMs*, el modelo de sensor *RPC0* con el soporte de 7 o 12 *GCPs* fue el modelo matemático que, ligeramente, alcanzó los mejores resultados, proporcionando valores de completitud desde 47.94% hasta 83.35%. En este caso, las diferencias temporales entre la fecha de adquisición de las imágenes fue el factor más influyente. Como se dijo anteriormente, estos resultados podrían ser potencialmente mejores si se realizase un pre-filtrado de las imágenes originales que componen cada estéreo par. Las zonas agrícolas fueron las más afectadas por este último factor. Como ocurre con la completitud de los *DSMs* en zonas urbanas, ángulos de convergencia menores de 25° serían recomendables con el fin de alcanzar mayor similitud entre las dos imágenes que forman el estéreo par y, además, para evitar zonas ocluidas. No se encontró ningún efecto relacionado con la diferencia de posición solar, tanto en la precisión vertical de los *DSMs* como en la completitud de los mismos. Seguramente este posible efecto estuvo de alguna manera enmascarado por otros factores más influyentes.

Aunque los *DSMs* extraídos de estéreo pares mixtos alcanzaron una buena calidad, la mejor precisión fue alcanzada a partir de los estéreo pares puros. De

hecho, estos estéreo pares presentan ángulos de convergencia de unos 30° y las menores diferencias radiométricas entre las imágenes, como cambios temporales e iluminación solar. Por último, los mayores valores de completitud de *DSMs* fueron alcanzados por WV-2 (83.35%) en comparación con los de GE-1 (74.50%). Al mismo tiempo, y trabajando sobre las zonas sin cambios, la mejor precisión vertical (medida como desviación estándar) fue alcanzada por el estéreo par puro de GE-1 (0.39 m y 0.53 m para GE-1 y WV-2 respectivamente). Esto se debe probablemente a su mejor contraste y calidad de la imagen. Si nos centramos en zonas urbanas, cabe destacar que las precisiones verticales (desviaciones estándar) de los *DSMs* calculadas a partir de los estéreo pares puros de ambos satélites fueron bastante peores que las obtenidas en áreas planas y abiertas, con valores de 2.67 m y 2.74 m para GE-1 y WV-2 respectivamente. Finalmente, la precisión vertical calculada para los *DSMs* sobre todo el área de trabajo arrojó unos resultados intermedios pero también consistentes, confirmando que GE-1 obtiene mejor precisión que WV-2. Las diferencias radiométricas entre las imágenes *PAN* de WV-2 y GE-1, siendo las imágenes de WV-2 claramente más borrosas que las imágenes de GE-1, se apunta como la principal causa de estos resultados.

5.6. BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M.A., Carvajal, F., 2005. Effects of terrain morphology, sampling density, and interpolation methods on Grid DEM accuracy. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(7): 805-816.

Aguilar, F. J., Agüera, F., Aguilar, M. A., 2007a. A theoretical approach to modeling the accuracy assessment of Digital Elevation Models. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12): 1367-1379.

Aguilar, M. A, Aguilar, F. J., Agüera, F., Sánchez, J.A., 2007b. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(12): 1321-1332.

Aguilar, M. A., Agüera, F., Aguilar, F. J., Carvajal, F., 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, F.J. y Mills, J.P., 2008b. Accuracy assessment of Lidar-derived digital elevation models. *The Photogrammetric Record*, 23(122): 148-169.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(2013): 427-435.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., in press. Generation and Quality Assessment of Stereo-Extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 Imagery. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*.

Alobeid, A., Jacobsen, K., Heipke, C., 2010. Comparison of Matching Algorithms for DSM Generation in Urban Areas from IKONOS Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76(9): 1041-1050.

Åstrand, P. J., Bongiorno, M., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Nowak Da Costa, J., Pieralice, F., Walczynska, A., 2012. The potential of WorldView-2 for ortho-image production within the "Control with Remote Sensing Programme" of the European Commission. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 335-347.

Baltsavias, E., Pateraki, A., Zhang, L., 2001. Radiometric and geometric evaluation of IKONOS Geo images and their use for 3D building modeling. *Proceedings of the ISPRS Workshop "High Resolution Mapping from Space"*, Hannover, Germany, Sep. 19-21.

Birchfield, V. y Tomasi, C., 1998. A pixel dissimilarity measure that is insensitive to image sampling. *Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 20(4): 401-406.

Butler, J. B., Lane, S. N., Chandler, J. H., 1998. Assessment of DEM quality for characterizing surface roughness using close range digital photogrammetry. *The Photogrammetric Record*, 16(92): 271-291.

Capaldo, P., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Nascetti, A., Pieralice, F., 2012. DSM generation from high resolution imagery: applications with WorldView-1 and GeoEye-1. *Italian Journal of Remote Sensing*, 44(1): 41-53.

Chen, P. y Chaapel, C., 2008. Automatic DEM Generation using WorldView-1 Stereo Data with or without Ground Control. *GeoInformatics*, 7: 34-39.

Choi, M. G., Jung, J. H., Jeon, J. W., 2009. No-Reference Image Quality Assessment using Blur and Noise. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 50: 163-167.

Crespi, M., De Vendictis, L., Poli, D., Wolff, K., Colosimo, G., Gruen, A., Volpe, F., 2008. Radiometric quality and DSM generation analysis of Cartosat-1 stereo imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 37 (B1-3): 1349-1355, 2008.

Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F., Pieralice, F., 2009. High Resolution Satellite Image Orientation Models: Geospatial Technology for Earth Observation. D. Li, J. Shan and J. Gong, editors, Springer US, pp. 63-104.

Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F., Pieralice, F., 2012. A new rigorous model for high-resolution satellite imagery orientation: application to EROS A and QuickBird. *International Journal of Remote Sensing*, 33(8): 2321-2354.

Daniel, C. y Tennant, K., 2001. DEM quality assessment, *Digital Elevation Model Technologies and Applications: The DEM Users Manual*. D. F. Maune, editor, American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland, pp. 395-440.

Davis, C. H. y Wang, X., 2003. Planimetric accuracy of Ikonos 1 m panchromatic orthoimage products and their utility for local government GIS basemap applications. *International Journal of Remote Sensing*, 24(22): 4267-4288.

Deilami, K. y Hashim, M., 2011. Very High Resolution Optical Satellites for DEM Generation: A Review. *European Journal of Scientific Research*, 49(4): 542-554.

Eckert, S. y Hollands, T., 2010. Comparison of Automatic DSM Generation Modules by Processing IKONOS Stereo Data of an Urban Area. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 3(2): 162-167.

Fraser, C. S., Baltsavias, E., Gruen, A., 2002. Processing of Ikonos for submetre 3D positioning and building extraction. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56: 177-194.

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

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

Hirschmüller, H., 2008. Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 30(2): 328-341.

Hobi, M. L. y Ginzler, C., 2012. Accuracy Assessment of Digital Surface Models Based on WorldView-2 and ADS80 Stereo Remote Sensing Data. *Sensors*, 12: 6347-6368.

Höhle, J. y Potuckova, M., 2006. The EuroSDR Test: Checking and Improving of Digital Terrain Models. EuroSDR, European Spatial Data Research, Official Publication, 51: 9-141.

Höhle, J. y Höhle, M., 2009. Accuracy assessment of digital elevation models by means of robust statistical methods. *ISPRS Journal Photogrammetric and Remote Sensing*, 64: 398-406.

Jacobsen, K., Crespi, M., Fratarcangeli, F., Giannone, F., 2008. DEM generation with CARTOSAT-1 Stereo Imagery. *Proc. EARSeL Joint Workshop Remote Sensing, New Challenges of High Resolution*, Bochum, Germany, 5-7 March., 8 pages (on CDROM).

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

Li, Z., 1992. Variation of the accuracy of digital terrain models with sampling interval. *The Photogrammetric Record*, 14(79): 113-128.

Li, R., Zhou, F., Niu, X., Di, K., 2007. Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(9): 1067-1074.

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

Liu, J. K., Wu, J. H., Shih, T. Y., 2005. Effects of JPEG2000 on the information and geometry content of aerial photo compression. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71(2): 157-167.

Meguro Y. y Fraser, C.S., 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 Commision VIII, pp. 1069-1072.

Mitchell, G. y MacNabb, K., 2010. High resolution stereo satellite elevation mapping accuracy assessment. *Proc. Annual ASPRS Conference*, San Diego, California, April 26-30.

Poli, D., 2005. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. Dissertation, Technische Wissenschaften ETH Zurich, No. 15894, IGP Mitteilung.

Poli, D., Angiuli, E., Remondino, F., 2010. Radiometric and geometric analysis of WorldView-2 stereo scenes. *Int. Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science*, Calgary, AB, Canada, June, 38 (1): 15-18.

Poon, J., Fraser, C. S., Chunsun, Z., Li, Z., Gruen, A., 2005. Quality assessment of digital surface models generated from IKONOS imagery. *The Photogrammetric Record*, 20(110): 162-171.

Poon, J., Fraser, C. S., Zhang, C., 2007. Digital surface models from high resolution satellite imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(11): 1225-1232.

Shih, T. Y. y Liu, J. K., 2005. Effects of JPEG 2000 compression on automated DSM extraction: evidence from aerial photographs. *The Photogrammetric Record*, 20(112): 351-365.

Toutin, T., 2000. Elevation modeling from satellite data. Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation, R. A. Meyers, Ed. Chichester, U.K.: Wiley, 10: 8543-8572.

Toutin, T., 2003. Error tracking in Ikonos geometric processing using a 3D parametric model. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 69(1): 43-51.

Toutin, T., 2004. 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., 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., 2012. Radarsat-2 DSM Generation With New Hybrid, Deterministic, and Empirical Geometric Modeling Without GCP. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 50(5): 2049-2055.

Wang, W. y Zhao, L., 2011. Geolocation Accuracy Evaluation of GeoEye-1 Stereo Image Pair. In: International Symposium on Image and Data Fusion, ISIDF, Yunnan, China (Conference papers from IEEEExplore).

Yuan, X., 2009. Geometric processing models for remotely sensed imagery and their accuracy assessment: Geospatial Technology for Earth Observation. D. Li, J. Shan and J. Gong, editors, Springer US, pp. 105-139, 2009.

Zhang, L. y Gruen, A., 2006. Multi-image matching for DSM generation from IKONOS imagery. ISPRS Journal Photogrammetric and Remote Sensing, 60: 195-211.

CAPÍTULO 6.

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD GEOMÉTRICA DE ORTOIMÁGENES GENERADAS A PARTIR DE IMÁGENES DE SATÉLITE DE MUY ALTA RESOLUCIÓN.

6.1. INTRODUCCIÓN.

La ortorrectificación de imágenes de satélite es uno de los pre-procesos más importantes y necesarios para llevar a cabo aplicaciones cartográficas, identificar una amplia gama de características y usos del suelo (*i.e.* clasificación de imágenes) y para añadir datos georreferenciados en los Sistemas de Información Geográfica (*SIG*). De hecho, las ortoimágenes se están convirtiendo en la capa de información principal de los *SIG*, representando una fuente de información temática extraordinaria. En este sentido, la aparición de los primeros satélites de muy alta resolución (*VHR*), capaces de capturar imágenes pancromáticas (*PAN*) de la superficie terrestre con un tamaño de píxel (*GSD*) menor de 1 m, marca una nueva era en el campo de la teledetección y de la inclusión de imágenes georreferenciadas de alta resolución como cobertura adicional en los *SIG*.

En los últimos años se han realizado diversos estudios sobre las aplicaciones de estos nuevos satélites *VHR* (*e.g.* Dennison *et al.*, 2010; Ozdemir y Karnieli, 2011). Muchos de los trabajos realizados se han llevado a cabo con el objetivo de estudiar y mejorar el proceso de ortorrectificación de imágenes *PAN* y/o *pan-sharpened* de satélites *VHR* (*e.g.* Kay *et al.*, 2003; Toutin, 2004; Aguilar *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2007; Aguilar *et al.*, 2008; Fraser y Ravanbakhsh, 2009; Åstrand *et al.*, 2012). Sin embargo, las investigaciones científicas realizadas con imágenes de satélites *VHR* multiespectrales (*MS*) han sido, hasta ahora, dirigidas principalmente a la clasificación automática de usos de suelo o determinadas clases de interés, dejando de lado la precisión geométrica de ortoimágenes generadas a partir de dichas imágenes *MS*. Teniendo en cuenta que la precisión de las características extraídas mediante procesos de clasificación de imágenes deben estar basadas en

una adecuada georreferenciación de las mismas, sería necesario realizar estudios sobre la precisión de geoposicionamiento de las ortoimágenes generadas a partir de imágenes tanto *PAN* como *MS* de satélites *VHR* bajo condiciones operacionales.

Una ortoimagen u ortofotografía (del griego *Orthós*: correcto, exacto) es una representación fotográfica de una zona de la superficie terrestre en la que todos los elementos presentan la misma escala y están libres de errores y deformaciones causadas por la inclinación del eje óptico de la proyección central y del relieve. Por lo tanto, una ortofotografía combina las características de detalle de una fotografía aérea con las propiedades métricas y geométricas de un plano. Al proceso de corrección digital de las fotografías originales para obtener la ortoimagen final se le denomina ortorrectificación

Para llevar a cabo el proceso de ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR* es necesario llevar a cabo diferentes pasos. El primero de ellos consistiría en la triangulación u orientación del sensor (Capítulo 4 de esta Tesis), mientras que el segundo se centraría en la eliminación de los efectos de distorsión provocados por el relieve del terreno mediante el uso de un modelo digital de elevaciones (*DEM*) adecuado.

Por otra parte, las ortoimágenes de alta resolución están contribuyendo al desarrollo de una metodología rápida y rentable para la actualización de la información espacial. Esto permite una actualización de la cartografía en ciclos más cortos y, por tanto, resulta de gran relevancia para los *SIG* orientados a grandes escalas (Baltsavias y Hahn, 1999), especialmente cuando se usan como fuentes de imágenes aquellas procedentes de satélites *VHR* (Aguilar *et al.*, 2006).

Tanto *GeoEye* como *DigitalGlobe* proporcionan imágenes *PAN* y *MS* directamente ortorrectificadas según diferentes niveles de procesamiento. Por ejemplo, la empresa *GeoEye* ofrece dos productos georreferenciados, llamados *GeoProfesional* y *Precision*, que proporcionan precisiones cartográficas, medidas como errores circulares con un nivel de confianza del 90% (CE90), de unos 10 m y 4 m respectivamente. Los productos *Mapping* y *Precision Ortho*, correspondientes a *DigitalGlobe*, proporcionan precisiones cartográficas similares. De hecho, muchos trabajos relacionados con la obtención de mapas temáticos a partir de procesos de

clasificación usan directamente este tipo de ortoimágenes *MS* de satélites *VHR* (e.g. Dalponte *et al.*, 2012; Ozdemir y Karnieli, 2011). Sin embargo, GE-1 y WV-2 también proporcionan productos con un bajo nivel de procesamiento y de menor coste (ver Capítulo 1), que brindan la posibilidad, a usuarios con capacidades fotogramétricas, de generar sus propias ortoimágenes altamente precisas, usando software comerciales y datos auxiliares como *DEMs* y puntos de control (*GCPs*). Los productos más adecuados para llevar a cabo el proceso de orrorrectificación serían el formato Geo, para el satélite GE-1, y los formatos Ortho Ready Standard Level-2A (ORS2A) y Básico en el caso de WV-2. Las características específicas de dichos formatos de imágenes de satélite *VHR* ya fueron definidas en el Capítulo 3 de esta Tesis.

El objetivo principal de este Capítulo sería el estudio de la precisión geométrica alcanzable en el proceso de orrorrectificación de imágenes *PAN*, *MS* y *pan-sharpened* de los satélites GE-1 y WV-2. Los ensayos serán realizados usando datos auxiliares de gran precisión, en condiciones operacionales, sobre la misma área de trabajo y en las mismas condiciones. Así podremos realizar también una comparación de los productos finales obtenidos a partir de ambos sensores. Los factores que van a ser tenidos en cuenta en este Capítulo son: (i) precisión del *DEM* usado en la orrorrectificación de imágenes de satélite *VHR* y (ii) el ángulo de inclinación de la toma (ángulo off-nadir).

Para finalizar esta introducción, es necesario añadir que la mayoría de los resultados que se van a exponer en este Capítulo de Tesis han sido publicados en dos prestigiosas revistas incluidas en el *Journal Citation Reports (JCR)* de Thomson Reuters, dentro de la categoría de *Remote Sensing*, como son el *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* (Aguilar *et al.*, 2012) y el *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* (Aguilar *et al.*, 2013).

6.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS DE PARTIDA.

6.2.1. Zona de estudio.

La zona de estudio donde se han realizado los estudios relativos al proceso de ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR* se encuentra en la provincia de Almería. Sus características y situación han sido descritas en el Capítulo 3 de esta Tesis.

6.2.2. Puntos de control y de comprobación.

Las coordenadas de los puntos elegidos como *GCPs* y puntos de comprobación (*ICPs*) empleados para el proceso de ortorrectificación de imágenes han sido medidos y distribuidos tal y como se detalla en el Capítulo 4 de esta Tesis.

6.2.3. Modelos digitales de elevaciones.

En el proceso de captura de imágenes, ya sea mediante vuelos fotogramétricos o tomadas desde satélites, el relieve del terreno provoca que los objetos que se encuentren en un mismo punto, pero a diferentes alturas, sean proyectados en diferentes posiciones en la imagen (Fig. VI.1).

En el proceso de ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR*, es necesario corregir el desplazamiento debido a la inclinación del sensor y al relieve del terreno. Para ello es necesario usar un *DEM* y realizar lo que se denomina una rectificación diferencial u ortoproyección.

Un Modelo Digital del Terreno (*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*.

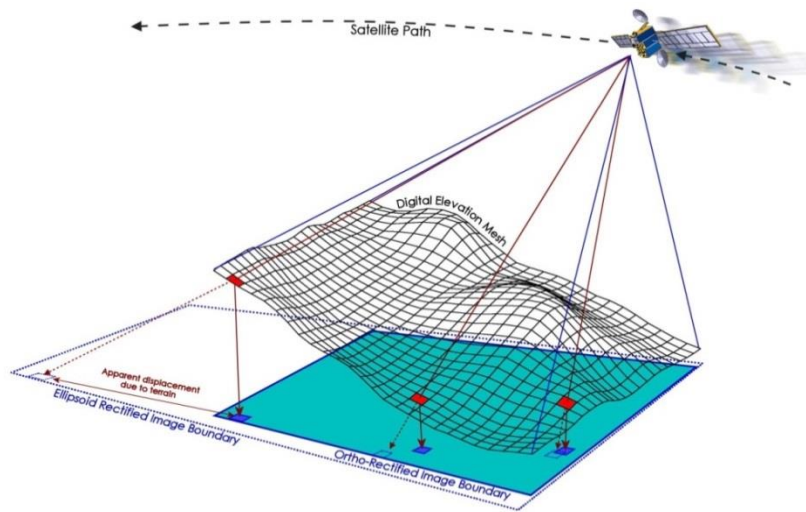


Fig. VI.1. Representación de la captura de imágenes de la superficie del terreno y efecto de desplazamiento debido al relieve.

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; (ii) que la variable a representar debe de ser 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 del terreno, dando lugar a los *DEM*, que pueden considerarse la versión digital de las curvas de nivel representadas en los mapas topográficos clásicos.

Se acepta que la elevación representada en un *DEM* es la cota de la superficie del terreno, por lo que deberíamos obviar estructuras como edificios o elementos como árboles (microrrelieve). En el caso de incluir estos elementos, se suele hablar de modelos digitales de superficie (*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*) incluyen todos los elementos superficiales, sin aislar o filtrar 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 (Aguilar *et al.*, 2010). También se pueden obtener *DEMs* de buena calidad a través de estéreo pares formados por imágenes de satélites *VHR*, como ya analizamos en detalle en el Capítulo 5 de esta Tesis.

Para los procesos de ortorrectificación desarrollados en este Capítulo se han empleado dos *DEMs* diferentes. El primero es el proporcionado por la Junta de Andalucía, procedente de un vuelo fotogramétrico. El segundo ha sido obtenido a partir de datos *LiDAR*.

6.2.3.1. Modelos digitales de elevaciones generados a partir de vuelos fotogramétricos.

Las técnicas más empleadas para la generación de *DEMs* 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 un *DEM* de malla regular, la información obtenida puede ser completada con información de líneas de ruptura, espaciamiento de la malla y otros elementos geomorfológicos de la zona.

El *DEM* fotogramétrico usado en este Capítulo ha sido el proporcionado por la Junta de Andalucía, con un paso de malla regular de 10 m. Este *DEM* fue obtenido a partir de un vuelo fotogramétrico en blanco y negro, a una escala aproximada 1/20,000, realizado durante los años 2001 y 2002 y publicado en el año 2005 (Junta de Andalucía, 2005). El *DEM* original de la Junta de Andalucía correspondiente a la zona de estudio debió ser transformado desde el sistema *UTM*

European Datum 1950, cotas ortométricas, al sistema *ETRS89* con cotas elipsoidicas (elipsoide GRS80), nuevo sistema de referencia oficial en España. Para ello se usó el método de la mínima curvatura desarrollado por el Instituto Geográfico Nacional (González-Matesanz *et al.*, 2006). La precisión correspondiente a este *DEM* para el área de trabajo fue calculada en 62 *ICPs* medidos, con técnicas *DGPS*, que se encontraban posicionados en terreno abierto, obteniéndose una precisión vertical de aproximadamente 1.34 m (expresada como $RMSE_z$).

6.2.3.2. Modelos digitales de elevaciones a partir de datos *LiDAR*.

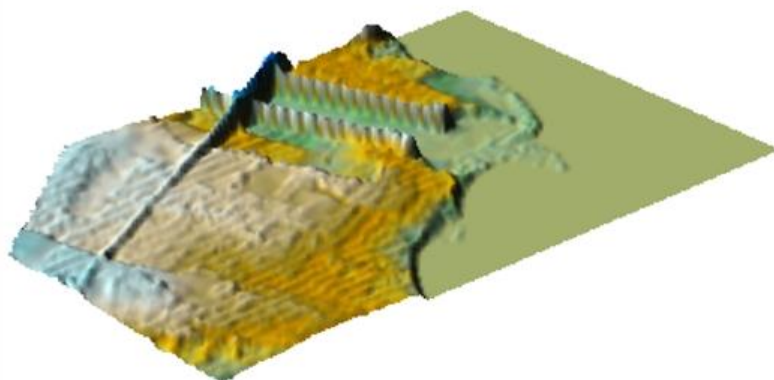
La tecnología *LiDAR* representa un procedimiento alternativo a los métodos de medida indirecta a partir de fotografías aéreas (fotogrametría) o medida directa en campo a través de sistemas *GPS*. El desarrollo de la tecnología *LiDAR* responde a las necesidades del sector geomático de búsqueda y desarrollo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

El *DEM LiDAR* usado en este Capítulo para llevar a cabo los procesos de ortorrectificación tiene una resolución final de 1 m. Este *DEM* se generó a partir de un vuelo combinado de fotogrametría y *LiDAR* realizado por la empresa Stereocarto sobre la zona de estudio el 28 de Agosto de 2009. La altura de vuelo fue de unos 1,000 m, y se usó un láser escáner Leica ALS60 con 35° FOV. También se utilizó una estación *GPS* fija de referencia en el terreno. La precisión vertical del *DEM LiDAR* calculada sobre 62 *ICPs*, distribuidos por toda la zona de trabajo en terreno abierto, fue de 8.9 cm ($RMSE_z$).

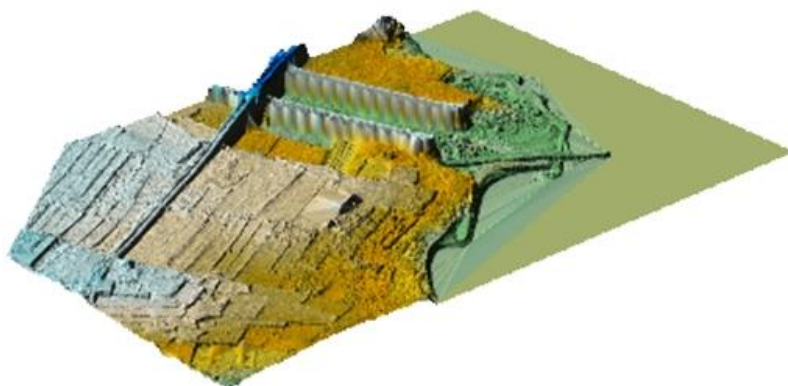
Todos los procesos necesarios para filtrar la nube de puntos *LiDAR* y ajustar las cuatro pasadas de vuelo tomadas fueron realizados mediante el software TerraMatch® y TerraScan® 010.

En la Fig. VI.2 se puede observar claramente que la diferencia de detalle entre el *DEM* proporcionado por la Junta de Andalucía (Fig. VI.2a) y el obtenido a partir

de datos *LiDAR* (Fig. VI.2b) resultó bastante significativa debido a la diferencia de resolución y precisión existente entre ambos *DEMs*.



a)



b)

Fig. VI.2. Representación de datos altimétricos de una misma zona de los *DEMs* empleados para la ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR*: a) *DEM* obtenido a partir del vuelo fotogramétrico de la Junta de Andalucía; b) *DEM* obtenido a partir del vuelo *LiDAR*.

6.3. METODOLOGÍA.

6.3.1. Estudio de la calidad geométrica.

La ortorrectificación transforma la proyección cónica 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. Atendiendo a Aguilar *et al.*, (2006), el error geométrico de la ortoimagen (σ_{ortho}) puede ser expresado como la suma del error en la fase de orientación del sensor (σ_o) más el error debido al DEM (σ_{DEM}). Todos los términos son expresados como desviación estándar.

$$\sigma_{ortho}^2 = \sigma_o^2 + \sigma_{DEM}^2 \quad (1)$$

La ecuación 1 está basada en la teoría de propagación general de errores, asumiendo que las fuentes de error son independientes y no correladas y, al mismo tiempo, que estos errores son distribuidos al azar.

Por lo tanto, la precisión obtenida en la orientación del sensor influye directamente en la precisión de las ortoimágenes finales. Es importante reseñar aquí que la orientación del sensor de todas las imágenes de satélite *VHR* ortorrectificadas en este Capítulo fue realizada, siguiendo las recomendaciones del Capítulo 4, mediante el modelo de sensor *RPC0* y usando 7 *GCPs*.

6.3.2. Evaluación de la precisión en ortoimágenes *PAN*.

Como se ha comentado anteriormente, es necesario el uso de un *DEM* en el proceso de ortorrectificación. De hecho, la precisión de la ortoimagen final depende también de la precisión del *DEM* (ecuación 1) empleado para su ortorrectificación. En este caso se emplearon los dos *DEMs* previamente detallados en el apartado 6.2.3 de este Capítulo.

El software empleado para la generación de imágenes ortorrectificadas fue el módulo fotogramétrico de *Geomatica* v.10.3.2 (PCI Geomatics), denominado *OrthoEngine*. El paso previo a la ortorrectificación fue realizar la orientación del sensor de las correspondientes imágenes *PAN* Geo de GE-1 y ORS2A de WV-2 (*i.e.*

GE11, GE12, GE13, WV21, WV22 y WV23). Basándonos en los resultados obtenidos en el Capítulo 4 de esta Tesis, las imágenes Básicas de WV-2 no fueron sometidas al proceso de ortorrectificación debido a los malos resultados obtenidos en la fase de orientación. Por otro lado, solo se empleó el modelo de sensor *RPC0* con el soporte de 7 *GCPs* para realizar la orientación del sensor. Para evaluar la precisión de las imágenes ortorrectificadas desde un punto de vista estadístico, se procedió a un diseño experimental donde se realizaron cinco repeticiones con el mismo modelo de sensor y diferentes subconjuntos formados siempre por 7 *GCPs*.

Por cada imagen *PAN* se generaron dos ortoimágenes para cada una de las cinco repeticiones, *i.e.* una imagen con el *DEM* de la Junta de Andalucía y otra imagen con el *DEM* obtenido a partir de datos *LiDAR*, por lo que en total se generaron diez ortoimágenes para cada imagen *PAN*. Todas las ortoimágenes se generaron con una resolución de 0.5 m empleando un remuestreo sinusoidal ($\sin(x)/x$ con ventanas de 16×16) (Toutin, 2004).

Sólo 48 de los 75 *ICPs* disponibles fueron empleados para evaluar la precisión de las ortoimágenes generadas. Esto se debe a que algunos de los *ICPs* se encontraban situados en esquinas elevadas de edificios (*i.e.* no estaban localizados sobre el terreno) y, por tanto, podían incrementar significativamente el error de punteamiento al marcarlos sobre el espacio imagen. Para evaluar la precisión geométrica de las ortoimágenes se llevó a cabo un análisis de la varianza (ANOVA) donde la variable observada o dependiente fue el *RMSE* planimétrico ($RMSE_{2D}$) para cada imagen, estimado en cada una de las cinco repeticiones sobre los mismos 48 *ICPs* (Snedecor y Cochran, 1980). Las fuentes de variación o factores estudiados en este análisis estadístico fueron: (i) el tipo de imagen de partida (*i.e.* imágenes Geo de GE-1 o con formato ORS2A de WV-2), (ii) el *DEM* empleado, y (iii) el ángulo off-nadir con el que fueron tomadas cada una de las imágenes. Cuando los resultados del análisis ANOVA presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), la separación de medias se realizó mediante el test de Duncan a un nivel de confianza del 95%.

6.3.3. Evaluación de la precisión en ortoimágenes *MS*.

El proceso llevado a cabo para evaluar la precisión en las imágenes ortorrectificadas *MS*, compuestas solo por las bandas *RGB*, fue similar al realizado en el caso de las ortoimágenes *PAN*.

Para cada imagen *MS* también fueron generadas 10 ortoimágenes, es decir, el equivalente a cinco repeticiones por dos *DEMs* ensayados. El modelo de sensor usado para la orientación del sensor fue también el *RPC0* con el soporte de 7 *GCPS*. Todas las ortoimágenes *MS* fueron generadas con un tamaño de píxel de 2 m, aplicando un remuestreo sinusoidal ($\sin(x)/x$ con ventanas de 16×16) (Toutin, 2004).

En este caso, y por el mismo motivo comentado anteriormente para el caso de imágenes *PAN*, sólo 32 *ICPs* de los 50 *ICPs* inicialmente disponibles fueron empleados para la evaluación de la precisión geométrica de las ortoimágenes. Finalmente se realizó un análisis estadístico similar al llevado a cabo en el caso de las ortoimágenes *PAN*. La variable dependiente fue de nuevo el *RMSE* planimétrico obtenido en las cinco repeticiones y calculado sobre los mismos 32 *ICPs* para cada repetición y en cada imagen *MS* (Snedecor y Cochran, 1980). Al igual que en el caso de las imágenes *PAN*, los tres factores estudiados fueron el tipo de imagen, el ángulo off-nadir y el *DEM*. Cuando los resultados del análisis ANOVA presentaron diferencias significativas ($p < 0.05$), la separación de medias se realizó mediante el test de Duncan a un nivel de confianza del 95%.

6.4. RESULTADOS.

Los resultados obtenidos en el proceso de ortorrectificación de imágenes de satélite *VHR* de GE-1 y WV-2 van a ser analizados diferenciando el caso de imágenes *PAN*, con 0.5 m *GSD*, y de imágenes *MS*, con 2 m *GSD*.

6.4.1. Evaluación de la precisión en ortoimágenes *PAN*.

Del análisis estadístico global (ANOVA) para las precisiones 2D (medidas como *RMSE_{2D}*) de las 60 ortoimágenes generadas a partir de las imágenes originales *PAN* Geo de GE-1 y ORS2A de WV-2, se observa como los tres factores

estudiados en este apartado (*i.e.* sensor, *DEM* y off-nadir) resultaron significativos ($p < 0.05$). La Tabla VI.1 muestra la separación de medias mediante el estudio de las tres fuentes de variación de forma independiente, usando un análisis ANOVA de un solo factor (One-way ANOVA). Fijándonos en los valores de precisión planimétrica obtenidos (Tabla VI.1), podemos afirmar que, a grandes rasgos y de forma cuantitativa, la calidad del *DEM* empleado en la ortorrectificación fue el factor más influyente, seguido del ángulo off-nadir y el tipo de sensor empleado.

Tabla VI. 1. Separación de medias del $RMSE_{2D}$ para el One-way ANOVA para cada factor. $RMSE_{2D}$ estimado sobre 48 ICPs en ortoimágenes PAN de GE-1 Geo y WV-2 ORS2A, usando *RPC0* y 7 *GCPs*. Los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$.

Sensor	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)	<i>DEM</i>	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)	Off-nadir	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)
GE-1 Geo	0.537 ^a	LiDAR	0.481 ^a	5°	0.463 ^a
				8.5°	0.475 ^a
				10°	0.523 ^b
WV-2 ORS2A	0.592 ^b	Andalucía	0.649 ^b	20.6°	0.543 ^b
				23.1°	0.595 ^c
				22.4°	0.792 ^c

Sin embargo, los resultados generales apuntados en la tabla anterior deben ser matizados y discretizados convenientemente. En este sentido, la Tabla VI.2 muestra los valores medios estimados para las precisiones 2D de las imágenes ortorrectificadas GE-1 Geo y WV-2 ORS2A, teniendo en cuenta, además, la calidad del *DEM* empleado. Cuando se usó el *DEM* derivado de datos *LiDAR*, con una elevada precisión vertical de unos 0.09 m, se alcanzaron precisiones geométricas 2D significativamente mejores ($p < 0.05$) que las estimadas sobre las ortoimágenes generadas usando el *DEM* publicado por la Junta de Andalucía (precisión vertical de 1.34 m). Si comparamos las precisiones obtenidas con las diferentes imágenes ortorrectificadas, encontramos que las imágenes GE-1 Geo presentaron una precisión geométrica 2D ligeramente mejor que las generadas a partir de las imágenes WV-2 ORS2A, especialmente cuando usamos ángulos off-nadir muy

elevados. En este sentido, conviene indicar que el ángulo off-nadir muestra un efecto significativo en la precisión geométrica final de las ortoimágenes ($p < 0.05$), obteniéndose valores más elevados de $RMSE_{2D}$ a medida que aumenta la inclinación de la toma.

Las ortoimágenes generadas usando el *DEM* obtenido a partir de datos *LiDAR* tuvieron precisiones planimétricas ($RMSE_{2D}$) que variaron entre 0.40 m y 0.63 m, mientras el $RMSE_{2D}$ alcanzó valores entre 0.50 m y 0.95 m cuando se usó el *DEM* procedente de la Junta de Andalucía (Tabla VI.2). En este sentido, la elección de un *DEM* muy preciso tiene una gran importancia en la precisión geométrica de la ortoimagen final, especialmente cuando se usan imágenes con elevados ángulos off-nadir. Como podemos ver en la Tabla VI.2, la imagen ortorrectificada de WV-2 con mayor ángulo off-nadir (imagen WV22) mediante un *DEM* de precisión media (*DEM* Junta de Andalucía) obtuvo un valor medio de $RMSE_{2D}$ de 0.95 m, mientras que la precisión planimétrica mejoró drásticamente cuando se usó el *DEM* *LiDAR* en el proceso de ortorrectificación. En otras palabras, es recomendable el uso de un *DEM* de elevada precisión cuando se desean obtener ortoimágenes de gran precisión geométrica a partir de imágenes de satélite con elevado off-nadir. Cuando sólo se disponga de *DEMs* de precisión media para el proceso de ortorrectificación, las imágenes de satélite deberían ser capturadas con el menor ángulo off-nadir posible. Es interesante añadir que los clientes pueden solicitar que el ángulo off-nadir esté comprendido entre 0° y 18° a cambio del pago de una tarifa adicional en los productos de GE-1 (GeoEye, Inc, 2009) con la finalidad de incrementar la precisión posicional de la imagen ortorrectificada final. Hay que destacar que en un trabajo publicado por Nowak Da Costa y Walczyńska (2011), donde se usaban imágenes WV-2 ORS2A y un *DEM* con una precisión vertical de 0.60 m, los valores de $RMSE_{2D}$ estimados fueron de 0.74 m, 1.11 m y 1.07 m para ángulos off-nadir de 26.7° , 31.6° y 36° respectivamente.

La Tabla VI.2 muestra también las desviaciones estándar de los valores medios del $RSME_{2D}$ (para las cinco repeticiones). Es importante subrayar que valores pequeños de desviaciones estándar indican una mayor fiabilidad en la evaluación de la precisión geométrica de las ortoimágenes. En general, los valores

más altos de las desviaciones estándar fueron asociados a ángulos off-nadir elevados y a un *DEM* poco preciso.

Tabla VI. 2. Valores medios y desviaciones estándar del $RMSE_{2D}$ (cinco repeticiones) estimados sobre 48 ICPs en ortoimágenes PAN GE-1 Geo y WV-2 ORS2A y usando el modelo de orientación de sensor RPCO con soporte de 7 GCPs. Para cada *DEM* e imagen analizada, los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indica diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$.

Imagen	Off-nadir	RMSE _{2D} ICPs (m) Ortoimagen DEM LiDAR		RMSE _{2D} ICPs (m) Ortoimagen DEM Andalucía	
		Valor medio	Desviación estándar	Valor medio	Desviación estándar
GE12	8.5°	0.404 ^a	0.027	0.546 ^a	0.038
GE11	20.6°	0.464 ^b	0.021	0.622 ^b	0.016
GE13	23.1°	0.501 ^c	0.025	0.689 ^c	0.048
WV21	5°	0.425 ^a	0.010	0.501 ^a	0.022
WV23	10°	0.462 ^a	0.019	0.584 ^b	0.039
WV22	22.4°	0.632 ^b	0.055	0.951 ^c	0.093

En cualquier caso, y centrándonos en nuestro caso particular, se trata de una zona de trabajo pequeña y con un relieve muy suave. Probablemente la incidencia del *DEM* y del ángulo off-nadir se vería acentuada en zonas con un relieve más abrupto y cuya superficie obligase a usar zonas periféricas de la escena. Los resultados obtenidos, sin embargo, indican que es posible obtener ortoimágenes con presiones geométricas 2D entre 0.50 m y 0.58 a partir de imágenes de satélite VHR con ángulos off-nadir menores de 15° y un *DEM* de precisión vertical media como el procedente de la Junta de Andalucía. Cuando se busca una precisión sub-píxel, debemos usar un *DEM* más preciso, evitando, cuando sea posible, ángulos off-nadir elevados.

Aunque no se presentan los resultados correspondientes a las precisiones unidimensionales ($RMSE_x$ y $RMSE_y$), es interesante mencionar que fueron detectados ligeros errores sistemáticos en el eje *Y* (*i.e.* en la dirección de desplazamiento del satélite; *along-track*) en algunas de las imágenes utilizadas. Estas desviaciones fueron encontradas principalmente en las ortoimágenes,

aunque, en menor medida, también fueron registradas en la fase de orientación. Los mayores errores sistemáticos fueron registrados en ortoimágenes generadas mediante el *DEM* de la Junta de Andalucía e imágenes con elevados ángulos off-nadir (23.1° y 22.4°), tanto para imágenes Geo de GE-1 como para las ORS2A de WV-2. Estos errores a lo largo del eje Y han sido ya reportados en el caso de imágenes de QuickBird e IKONOS (Noguchi *et al.*, 2004; Fraser y Hanley, 2005; Aguilar *et al.*, 2007).

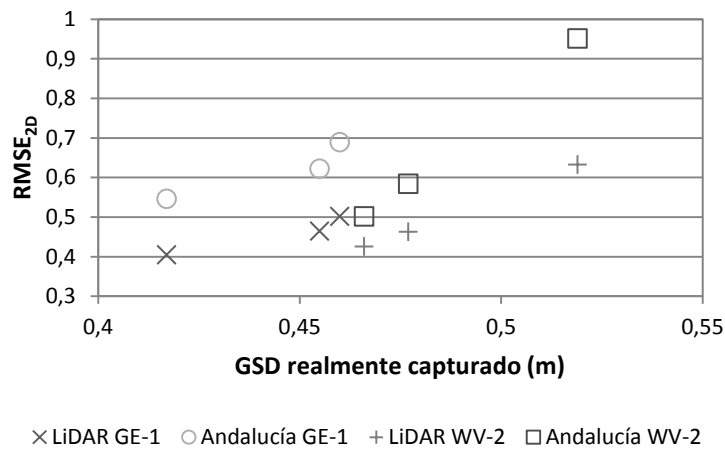


Fig. VI.3. Relación entre el GSD real (dependiente del ángulo off-nadir) y el valor medio del $RMSE_{2D}$ obtenido en la fase de orrorrectificación para cada *DEM* e imagen *PAN* analizada.

Respecto a la influencia del ángulo off-nadir en las precisiones obtenidas en el proceso de orrorrectificación de imágenes *PAN*, en la Fig. VI.3 se muestra la relación entre el GSD real de cada imagen (media del tamaño de píxel realmente capturado en columnas y filas para las imágenes *PAN*; ver Tablas III.1 y III.2 del Capítulo 3) y las precisiones planimétricas, medidas como $RMSE_{2D}$, de las ortoimágenes generadas con los dos *DEMs* empleados en este capítulo (Tabla VI.2). Hay que tener en cuenta que el GSD real de una imagen de satélite presenta una relación directa con el ángulo off-nadir de dicha imagen. Como podemos observar en dicha figura, la clara relación existente entre la precisión obtenida en la fase de orrorrectificación y el GSD, podría ser, en parte, debida al incremento del error de

punteamiento en la orientación del sensor (Capítulo 4) y en el control de calidad de la ortofoto. Por otra parte, en la Fig. VI.3 queda representada de una manera clara la influencia de la precisión y calidad del *DEM* utilizado para el proceso de ortorrectificación, sobre la precisión planimétrica obtenida en las ortoimágenes. En otras palabras, para ambos sensores, el uso de un *DEM* menos preciso parece estar relacionado con el aumento del $RMSE_{2D}$.

6.4.2. Precisión geométrica 2D en la orientación de imágenes MS.

La Tabla VI.3 presenta los resultados de precisión planimétrica ($RMSE_{2D}$) calculadas en 32 *ICPs*, generados al estudiar cada una de las tres fuentes de variación de forma independiente, mediante análisis ANOVA de un solo factor (One-way ANOVA). En este sentido se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$) en la precisión 2D obtenida en las ortoimágenes *MS*, considerando el tipo de imagen *MS* original de partida (*i.e.* sensor y formato de imagen empleados) como único factor de variación en el análisis estadístico. Así, las mejores precisiones planimétricas se alcanzaron cuando las ortoimágenes se generaron a partir de imágenes *MS* Geo de GE-1. Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas en precisión entre las ortoimágenes *MS* WV-2 ORS2A y WV-2 Básicas (Tabla VI.3). En cuanto al *DEM* utilizado en el proceso de ortorrectificación de las imágenes *MS*, al contrario que en el caso de las imágenes *PAN*, el uso de un *DEM* de alta precisión (*LiDAR*) frente un *DEM* de precisión media (*DEM* Junta de Andalucía) no resultó ser significativo. Del mismo modo, en el análisis de la influencia del ángulo off-nadir en el proceso de ortorrectificación, los resultados tampoco muestran diferencias significativas entre los $RMSE_{2D}$ medios obtenidos y el ángulo off-nadir, aunque la mejor precisión fue obtenida siempre para las ortofotos generadas a partir del satélite GE-1.

Tabla VI.3. Separación de medias del $RMSE_{2D}$ para los factores principales (One-way ANOVA). $RMSE_{2D}$ estimado sobre 32 ICPs en ortoimágenes MS de GE-1 Geo, WV-2 ORS2A y WV-2 Básicas, usando RPC0 y 7 GCPs. Valores en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$.

Sensor y formato	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)	DEM	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)	Off-nadir	Valor medio $RMSE_{2D}$ (m)
GE-1 Geo	1.960 ^a	LiDAR	2.002	8.5°	1.850 ^a
				20.6°	1.933 ^{ab}
				5°	1.996 ^{bc}
WV-2 ORS2A	2.085 ^b	Andalucía	2.073	22.4°	2.052 ^{bcd}
				23.1°	2.098 ^{cd}
WV-2 Básicas	2.106 ^b			10°	2.167 ^d

La Tabla VI.4 muestra los valores medios de la precisión planimétrica ($RMSE_{2D}$) agrupados para cada imagen de origen y para cada uno de los DEMs utilizados. Con respecto al DEM empleado, y aunque parece haber una tendencia a mejorar la precisión geométrica de las ortoimágenes al aplicar el DEM LiDAR, no se registraron diferencias significativas ($p < 0.05$). Es necesario indicar que en imágenes MS de satélites VHR con un tamaño de píxel terreno de 2 m, la precisión vertical del DEM usado para el proceso de orrorrectificación juega un papel menos importante en la precisión geométrica final de la ortoimagen, seguramente debido a la mayor influencia de otros factores como por ejemplo el error de punteamiento en espacio imagen.

Aunque se sabe que el ángulo off-nadir tiene una gran influencia en la precisión geométrica 2D de ortoimágenes obtenidas a partir de imágenes PAN VHR (e.g. Toutin, 2004; Kapnias *et al.*, 2008; Nowak Da Costa y Walczyńska, 2011; Åstrand *et al.*, 2012), los resultados observados en nuestro caso trabajando con imágenes MS orrorrectificadas fueron muy heterogéneos. Nótese que en el caso de imágenes MS VHR, el error de punteamiento de los puntos marcados en cada imagen suele ser muy importante (de alguna manera estos están directamente

relacionados con el tamaño de píxel terreno), por lo que los posibles efectos, tanto del ángulo off-nadir, como de la precisión del *DEM*, podrían verse enmascarados.

Tabla VI.4. Valores medios de $RMSE_{2D}$ estimados sobre 32 *ICPs* (para las cinco repeticiones) en ortoimágenes generadas a partir de imágenes *MS* de GE-1 y WV-2 usando *RPCO* con soporte de 7 *GCPs*. Para cada *DEM* e imagen analizada, los valores medios en la misma columna seguidos de diferentes superíndices indican diferencias significativas a un nivel $p < 0.05$.

Imagen	Off-nadir	$RMSE_{2D}$ <i>ICPs</i> (m) Ortoimagen <i>DEM LiDAR</i>	$RMSE_{2D}$ <i>ICPs</i> (m) Ortoimagen <i>DEM Andalucía</i>
GE12	8.5°	1.843	1.856 ^a
GE11	20.6°	1.888	1.978 ^a
GE13	23.1°	2.005	2.190 ^b
WV21	5°	1.995	1.997 ^a
WV23	10°	2.124	2.223 ^b
WV25	10°	2.124	2.196 ^a
WV24	22.4°	2.031	2.073 ^b

La Fig. VI.4 muestra la relación entre el *GSD* real de cada imagen de partida (media del tamaño de píxel realmente capturado en columnas y filas para las imágenes *MS*; ver Tablas III.1 y III.2 del Capítulo 3) y las precisiones, medidas como $RMSE_{2D}$, en las ortoimágenes generadas con los dos *DEMs* empleados en este capítulo (Tabla VI.3). En dicha figura, cabe destacar que las imágenes Básicas y ORS2A de WV-2 han sido tratadas conjuntamente, debido a la ausencia de diferencias entre las mismas. Podemos observar que para las ortoimágenes *MS* de GE-1, parece existir una relación directa entre la precisión obtenida en la fase de ortorrectificación, el incremento del *GSD* y el *DEM* empleado para el proceso de ortorrectificación, al igual que en el caso de las imágenes *PAN*, aunque en este caso las diferencias entre el uso de los diferentes *DEMs* son menores. Sin embargo, en el caso de las ortoimágenes *MS* de WV-2, esta relación no está tan clara, ya que al aumentar el ángulo off-nadir no siempre aumenta el valor medio del $RMSE_{2D}$. Cabe destacar, que para WV-2, al igual que en el caso de GE-1, el uso de un *DEM* de alta precisión (*LiDAR*) provoca mejores resultados, aunque las diferencias son menores

que en el caso ortoimágenes *PAN*. El hecho de que el tamaño de píxel real capturado sea de alrededor de 2 m puede estar relacionado con estos resultados, ya que, en el momento de marcado de los puntos, el error de punteamiento en el espacio imagen aumenta significativamente.

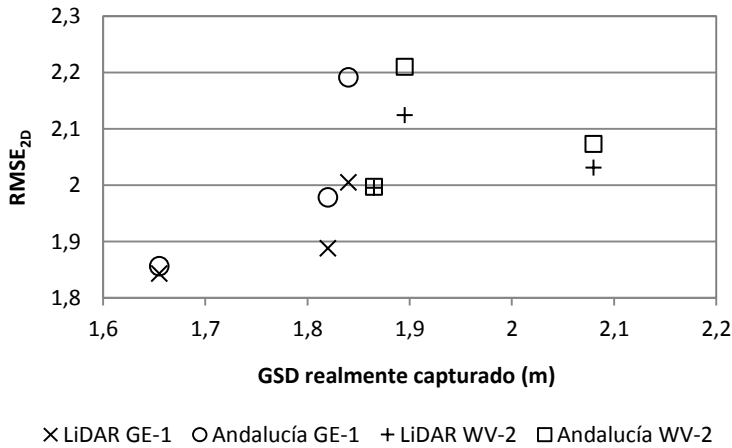


Fig. IV.4. Relación entre el *GSD* real y el *RMSE_{2D}* obtenido en la fase de ortorrectificación para cada *DEM* e imagen *MS* original.

6.5. CONCLUSIONES.

La precisión geométrica 2D de ortoimágenes producidas a partir de imágenes *PAN* GE-1 Geo y WV-2 ORS2A, aplicando el modelo de orientación de sensor *RPC0* con soporte de 7 *GCPs*, arrojó resultados similares cuando el ángulo off-nadir fue inferior a 20°. Se demostró que los valores de error más elevados, medidos como *RMSE_{2D}*, estuvieron relacionados con el incremento del ángulo off-nadir.

El empleo del modelo de sensor *RPC0*, con 7 *GCPs* bien distribuidos en la zona de trabajo y evitando las dos imágenes *PAN* de mayor off-nadir, permitió la producción de ortoimágenes con precisión sub-píxel mediante el concurso de un *DEM* altamente preciso generado a partir de datos *LiDAR*, tanto para las imágenes *PAN* GE-1 Geo como para las imágenes *PAN* WV-2 ORS2A. Sin embargo, y con las mismas condiciones operacionales pero usando un *DEM* menos preciso (*DEM* de la Junta de Andalucía generado a partir de vuelos fotogramétricos), las precisiones

planimétricas alcanzadas en las ortoimágenes *PAN* generadas variaron entre 0.5 m y 0.62 m.

Con respecto a las imágenes *MS* ortorrectificadas, los resultados obtenidos con ambos *DEMs* (*DEM LiDAR* y *DEM* de la Junta de Andalucía) fueron similares. En este caso no se pudo demostrar estadísticamente que el ángulo off-nadir influyera en la calidad geométrica 2D de las ortoimágenes *MS*. Por otro lado, las ortoimágenes obtenidas a partir de imágenes *MS* GE-1 Geo presentaron una precisión planimétrica significativamente ($p < 0.05$) mejor. Las ortoimágenes *MS* de WV-2 ORS2A y WV-2 Básicas presentaron precisiones muy similares. Valores de precisiones geométricas ($RMSE_{2D}$) de alrededor de un píxel (*i.e.* 2 m) pueden ser obtenidos en ortoimágenes *MS* con ángulos off-nadir menores de 24°, aún cuando el *DEM* no sea muy preciso (*i.e.* precisión vertical estimada de alrededor de 1.3-1.4 m).

6.6. BIBLIOGRAFÍA.

Aguilar, F.J., Aguilar, M.A., Carvajal, F., Agüera, F., 2006. An integrated model to estimate the accuracy of digital orthoimages from high resolution satellite imagery. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, 184: 11-16.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Agüera, F., Sánchez, J.A., 2007. Geometric accuracy assessment of QuickBird basic imagery using different operational approaches. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73 (12), 1321–1332.

Aguilar, M.A., Agüera, F., Aguilar, F.J., Carvajal, F., 2008. 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, F.J., Mills, J.P., Delgado, J., Aguilar, M.A., Negreiros, J.G., Pérez, J.L., 2010. Modelling vertical error in LiDAR-derived digital elevation models. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 65(1), 103-110.

Aguilar, M.A., Aguilar, F.J., Saldaña, M.M., Fernández, I., 2012. Geopositioning accuracy assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 78(3): 247-257.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(2013): 427-435.

Åstrand, P.J., Bongiorni, M., Crespi, F., Fratarcangeli, J., Nowak Da Costa, F., Pieralice, Walczyńska, A., 2012. The potential of WorldView-2 for ortho-image production within the - Control with Remote Sensing Programme - of the European Commission, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 19: 335-347.

Baltsavias, E.P. y Hahn, M., 1999. Integration of image analysis and GIS. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, 32(part 7-4-3W6): 12-19.

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

Dalponete, M., Bruzzone, L., Gianelle, D., 2012. Tree species classification in the Southern Alps based on the fusion of very high geometrical resolution multispectral/hyperspectral images and LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 123: 258-270.

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

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

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

GeoEye, Inc., 2009. GeoEye Product Guide. URL: http://www.genesiis.com/pdf/2009_geoeye_product_guide.pdf (último acceso: 7 Febrero 2013).

González-Matesanz, J., Malpica, J.A., Dalda, A., 2006. A range of ED50-ETRS89 datum transformation models tested on the Spanish Geodetic Network. *Survey Review*, 38(102):654–667.

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

Kapnias, D., Milenov, P., y Kay, S., 2008. Guidelines for Best Practice and Quality Checking of Ortho Imagery, Issue 3.0. European Commission, JRC Scientific and Technical Reports EUR 23638 EN-2008. URL: <http://mars.jrc.ec.europa.eu/mars/Bulletins-Publications/Guidelines-for-Best-Practice-and-Quality-Checking-of-Ortho-Imagery-v-3.0> (último acceso: 25 Febrero 2013).

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

Li, R., Zhou, F., Niu, Di, X.K., 2007. Integration of Ikonos and QuickBird imagery for geopositioning accuracy analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73(9): 1067-1074.

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

Nowak Da Costa, J.K., Walczyńska, A., 2011. Geometric Quality Testing of the WorldView-2 Image Data Acquired over the JRC Maussane Test Site using ERDAS LPS, PCI Geomatics and Keystone Digital Photogrammetry Software packages – Initial Findings with ANNEX. JRC Scientific and Technical Reports EUR 24525 EN.

Ozdemir, I. y Karnieli, A., 2011. Predicting forest structural parameters using the image texture derived from WorldView-2 multispectral imagery in a Dryland

forest, Israel. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13, 701–710.

Snedecor, G.W. y Cochran, W.G., 1980. *Statistical Methods*, seventh ed. Iowa State University Press, Ames, IA, 507 páginas.

Toutin, T., 2004. Review article: Geometric processing of remote sensing images: models, algorithms and methods. *International Journal of Remote Sensing*, 25(10): 1893-1924.

CAPÍTULO 7.

CLASIFICACIÓN DE USOS DEL SUELO EN ZONAS URBANAS MEDIANTE TÉCNICAS OBIA A PARTIR DE ORTOIMÁGENES DE GEOEYE-1 Y WORLDVIEW-2.

7.1. INTRODUCCIÓN.

La obtención de mapas temáticos o la clasificación del territorio según usos del suelo, tipos de vegetación y densidad de construcción en zonas urbanas es importante para la toma de decisiones en proyectos de gestión del territorio, agroforestales o urbanísticos. En los últimos años, la disponibilidad de sensores espaciales de alta resolución espacial ofrece nuevas posibilidades en la clasificación automática de imágenes, lo cual supone una reducción importante de los trabajos de campo que encarecen la producción de cartografía temática, así como su actualización. Para ello, es preciso desarrollar y validar métodos y algoritmos de clasificación que aprovechen las nuevas características de estos sensores espaciales.

Según algunos autores, la introducción de las nuevas bandas espectrales de WV-2 (*Coastal, Yellow, Red-Edge* y *NIR-2*) puede proporcionar una mejora en la precisión de la clasificación de entre un 5% y un 20% para ciertos tipos de cubierta terrestre como materiales artificiales, diferentes tipos de vegetación, suelos, sombras, turbidez en el agua y batimetrías (Marchisio *et al.*, 2010). Sin embargo, otros trabajos indican todo lo contrario. Por ejemplo, Tasdemir y Reis (2011), trabajando con imágenes de satélite WV-2 para identificar tipos de usos de suelo sobre campos de avellanos, obtuvieron que la precisión global (*overall accuracy*) fue sorprendentemente mayor cuando sólo consideraron las 4 bandas tradicionales en lugar de las 8 bandas espectrales que presenta WV-2. En este mismo sentido, Marshall *et al.* (2012) concluyeron que no se obtenían mejores resultados en la clasificación y discriminación de especies de vegetación invasiva mediante el uso de las cuatro bandas adicionales que aporta el satélite WV-2 en relación a la configuración de bandas clásicas (*R, G, B, NIR*). Como conclusión, podemos establecer que no existe unanimidad en cuanto a la ventaja, entendida

como mejora de la precisión global de la clasificación, del uso de las 8 bandas espectrales disponibles en la imagen multispectral WV-2 frente al empleo de sólo las cuatro bandas clásicas típicas del resto de satélites comerciales VHR.

Además, la evolución y el dinamismo de las áreas urbanas requiere la actualización frecuente de las bases de datos cartográficas. Tradicionalmente, dicha actualización ha sido llevada a cabo mediante la fotointerpretación de imágenes aéreas, procedimiento costoso y que consume mucho tiempo (*e.g.* Hermosilla *et al.*, 2011). Recientemente muchos investigadores han usado diferentes imágenes de satélite VHR para la extracción automática de datos georreferenciados en zonas urbanas. Entre otros satélites, podemos destacar el caso de IKONOS (*e.g.* Turker y San, 2011; Pu *et al.*, 2011), GE-1 (*e.g.* Hussain *et al.*, 2011; Grigillo y Kosmatin Fras, 2011) y WV-2 (*e.g.* Longbotham *et al.*, 2012; Zhou *et al.*, 2012). De hecho, la extracción o clasificación automática de edificios a partir de imágenes de satélite VHR es una tarea muy difícil y ha sido, durante la última década, foco de diversas investigaciones. Es importante destacar que el incremento de la resolución de las imágenes de entrada se traduce en un incremento de la variabilidad espectral local de las clases de usos de suelo urbanos (Myint *et al.*, 2011), por lo que se suele observar una reducción de la precisión global obtenida a partir de métodos de clasificación tradicionales basados en píxeles (*per-pixel classification*). De hecho, los resultados de este tipo de clasificación suelen mostrar un efecto de “sal y pimienta” muy característico (Treitz y Howarth, 2000; Pu *et al.*, 2011). La clasificación automática, como método eficiente de actualización cartográfica, es particularmente problemática en ambientes urbanos que, por lo general, están formados por mosaicos de pequeñas áreas, más o menos conexas, compuestas de materiales artificiales fabricados por el hombre y, por tanto, con diferentes y muy variables propiedades físicas (Mathieu *et al.*, 2007). En los últimos años ha surgido una metodología alternativa, denominada análisis de imágenes basado en objetos (*Object-Based Image Analysis, OBIA*), que pretende resolver los problemas planteados por la clasificación supervisada tradicional basada en la clasificación de píxeles aislados (Carleer y Wolff, 2006; Im *et al.*, 2008; Blaschke 2010; Lu *et al.*, 2010; Myint *et al.*, 2011). De hecho, *OBIA* supone un nuevo paradigma en el campo de las ciencias de la información geográfica donde se propone que las imágenes sean divididas en segmentos homogéneos y

significativos (u objetos) según diferentes criterios antes de la clasificación (proceso de segmentación). Las técnicas *OBIA* se basan en la agregación de píxeles similares para obtener objetos homogéneos a los que se les asigna una clase de destino. El uso de objetos en lugar de píxeles como unidad mínima de información reduce el efecto “sal y pimienta” de la clasificación *per-pixel* debido a la heterogeneidad espectral de los píxeles individuales. Además, y a diferencia de los métodos tradicionales basados en píxeles que solo usan información espectral, el nuevo enfoque basado en objetos puede usar otros grupos de características relativas a la forma, textura e información contextual de los objetos, con lo que se incrementa notablemente el potencial para manejar de manera eficiente las tareas más difíciles en el análisis de las imágenes (*e.g.* Marpu *et al.*, 2010). En efecto, la cantidad de trabajos disponibles relacionados con técnicas *OBIA* está aumentando rápidamente, pudiéndose agrupar en varias áreas temáticas como: (i) jerarquía *OBIA* y conceptos de escala (Addink *et al.*, 2007), (ii) segmentación de imágenes (Drăguț *et al.*, 2010; Marpu *et al.*, 2010), (iii) detección de cambios *OBIA* (Im *et al.*, 2008) y, (iv) la evaluación de la precisión *OBIA* (Platt y Rapoza, 2008; Albrecht *et al.*, 2010; Lang *et al.*, 2010). En un reciente trabajo de Blaschke (2010) puede encontrarse una revisión exhaustiva de las ventajas y desventajas de las técnicas *OBIA* para la clasificación de imágenes, así como el estado del arte de estos métodos.

Teniendo en cuenta que la clasificación supervisada es uno de los análisis más comunes realizados en teledetección, es importante destacar que la precisión alcanzada en la clasificación final varía en función de los datos de entrenamiento usados, principalmente del tamaño y de su calidad (*e.g.* Foody, 1999; Tsai y Philpot, 2002; Foody y Mathur, 2006). En este sentido, los clasificadores pueden necesitar diferentes tipos de información de entrenamiento (Foody, 1999), *i.e.* un set de entrenamiento que permite una clasificación de gran precisión para un clasificador determinado, puede producir una precisión considerablemente peor con otro clasificador. La literatura, sin embargo, aboga por un enfoque relativamente uniforme e independiente del clasificador en cuanto al diseño del grupo de muestras para la fase de entrenamiento se refiere. Las recomendaciones para el diseño de la fase de entrenamiento del clasificador apuntan al uso de muestras grandes (“cuanto más grandes mejor”) de objetos puros seleccionados al

azar con el fin de caracterizar las clases elegidas. Es una práctica común en teledetección asegurar que el número de muestras para cada una de las clases de entrenamiento comprenda al menos 10-30 veces el número de bandas usadas en el análisis (Piper, 1992; Mather, 2004). Sin embargo, la naturaleza de un set de entrenamiento ideal no está nada clara, y puede depender de la finalidad del entrenamiento.

En este Capítulo se ha analizado la precisión de una clasificación supervisada basada en objetos aplicada sobre áreas urbanas a partir de ortoimágenes pancromáticas (*PAN*) y *pan-sharpened* procedentes de GE-1 y WV-2, aproximadamente en las mismas condiciones de adquisición. Las variables estudiadas han sido: (i) tipo de imágenes de satélite *VHR* (*i.e.* tipo de sensor usado), (ii) conjunto de características de los objetos segmentados que participan en su clasificación (*i.e.* vector de características o *features*) y, (iii) el porcentaje de muestras de entrenamiento consideradas respecto al total. Para la obtención de unos resultados robustos que respondan a los objetivos planteados se llevó a cabo un estudio estadístico exhaustivo.

Los resultados que se van a exponer en este Capítulo de Tesis han sido recientemente publicados en la revista *International Journal of Remote Sensing*, incluida en el *Journal Citation Reports (JCR)* dentro de la categoría de *REMOTE SENSING* (Aguilar *et al.*, 2013b).

7.2. ZONA DE ESTUDIO Y DATOS EMPLEADOS.

7.2.1. Zona de estudio.

La zona de trabajo referente a este Capítulo se localiza en la provincia de Almería y ocupa unas 17 ha de la pequeña localidad costera de Villaricos (Fig. VII.1). Se trata de un pueblo costero que presenta un paisaje urbano con una alta heterogeneidad, donde se mezclan viejos edificios del casco antiguo con nuevas y recientes urbanizaciones. La zona de trabajo para este Capítulo está situada al norte de la zona de estudio descrita en el Capítulo 3 de esta Tesis.



Fig. VII.1. Localización de la zona de trabajo. Población de Villaricos (Almería).

7.2.2. Ortoimágenes de satélites *VHR*.

Para poder llevar a cabo los diferentes ensayos mostrados en este capítulo, se han utilizado las imágenes pancromáticas (*PAN*) y multiespectrales (*MS*) GE11 y WV23 descritas con detalle en el Capítulo 3 de esta Tesis. Para ambos satélites se siguió el mismo procedimiento.

La imágenes *pan-sharpened* fueron creadas con un tamaño de píxel de 0.5 m y contienen la información espectral procedente de las imágenes *MS* (4 bandas para GE11 y 8 bandas para WV23). Para su generación fue utilizado el módulo PANSARP incluido en *Geomatica v. 12* (*PCI Geomatics, Richmond Hill, Ontario, Canada*). A continuación se generaron cuatro ortoimágenes con 0.5 m de tamaño de píxel (una ortoimagen *PAN* y otra *pan-sharpened* para cada imagen de satélite usada) mediante *OrthoEngine*, el módulo fotogramétrico del software *Geomatica*. Todas las ortoimágenes fueron obtenidas mediante el procedimiento explicado en el Capítulo 6 de esta Tesis. Se aplicó el modelo de orientación de sensor basado en coeficientes de polinomios racionales de orden cero (*RPC0*) con el soporte de 7 puntos de control (*GCPs*) y un modelo digital de elevaciones (*DEM*) derivado de un conjunto de datos *LiDAR* que describiremos en el siguiente apartado (Aguilar *et al.*, 2013b).

7.2.3. Modelo digital de superficies normalizado.

Los datos altimétricos empleados en este estudio fueron generados a partir de un vuelo combinado fotogramétrico y *LiDAR* realizado el 28 de Agosto de 2009 por la empresa Stereocarto. A partir de la correspondiente nube de puntos *LiDAR*, un *DEM* y un modelo digital de superficies (*DSM*) en formato *grid*, ambos con un paso de malla regular de 1 m, fueron obtenidos (ver Capítulo 6).

El *DSM* normalizado (*nDSM*) fue generado mediante la diferencia, píxel a píxel, entre las elevaciones contenidas en el *DEM* y *DSM* ($nDSM = DEM - DSM$). De esta forma los objetos artificiales (*e.g.* edificios) o naturales (*e.g.* árboles) pueden distinguirse más fácilmente como elementos del microrrelieve (Fig. VII.2c). Al mismo tiempo que se realizaba la adquisición de datos *LiDAR*, una cámara digital fotogramétrica *DMC* (*Intergraph Z/I Imaging*) fue usada para capturar imágenes digitales *VHR RGB+Nir* con un tamaño de píxel terreno de 0.15 m.

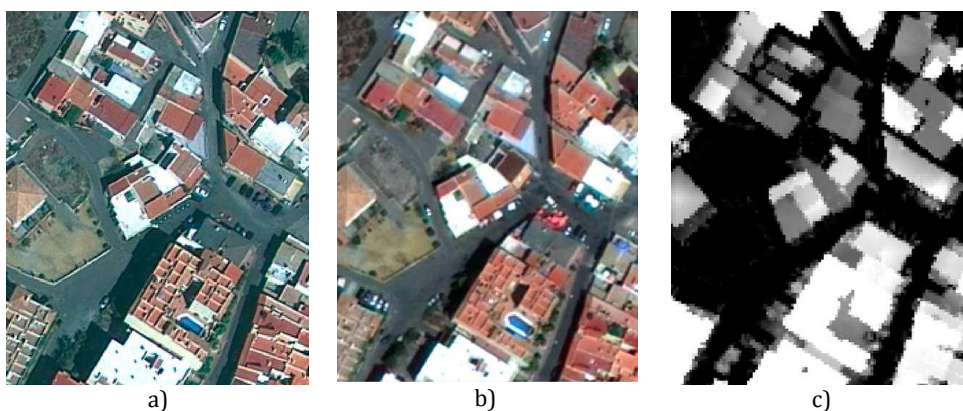


Fig. VII.2. Información detallada (rectángulo de 110 m por 135 m) obtenida de la zona de trabajo: a) ortoimagen *pan-sharpened* de GE-1, b) ortoimagen *pan-sharpened* de WV-2 y c) *nDSM*.

7.3. METODOLOGÍA.

7.3.1. Segmentación de la imagen.

La segmentación de la imagen es un paso crucial en el contexto de los procedimientos *OBIA* mediante el que se divide una imagen en regiones separadas y homogéneas (objetos). Existen multitud de algoritmos de segmentación de imágenes desarrollados para varias aplicaciones y en diferentes campos de análisis de imágenes. La mayoría de ellos dependen en gran medida de los parámetros de entrada especificados, lo que impide conocer, a priori, la bondad de los resultados alcanzables. Es importante subrayar que gran parte de los trabajos publicados dentro de la disciplina *OBIA* han sido realizados con el software *eCognition* (*Trimble, Sunnyvale, California, United States*). De hecho, alrededor del 50-55% de los artículos publicados relacionados con *OBIA* usan este software (Blaschke, 2010). Ese es el motivo de que *eCognition v. 8* fuese el software elegido para la realización de los ensayos propuestos en este Capítulo. Entre los métodos de segmentación que implementa *eCognition*, quizás el más sofisticado y usado en imágenes de alta resolución sea la segmentación multi-resolución, que es una técnica de fusión de regiones de abajo hacia arriba a partir de objetos semilla compuestos por un solo píxel (*Region Growing Algorithms*). En numerosos pasos iterativos, los objetos imagen (*Image Objects, IOs*) más pequeños son fusionados en objetos más grandes (Baatz y Schäpe, 2000). El algoritmo de segmentación multi-resolución, en un procedimiento de optimización que, para un determinado número de *IOs*, minimiza la heterogeneidad media y maximiza su respectiva homogeneidad. El resultado de este algoritmo de segmentación es controlado por tres términos principales, tales como: (i) el criterio de homogeneidad o el parámetro de escala, el cual determina la heterogeneidad máxima permitida de los objetos imagen resultantes, (ii) el peso del color y los criterios de forma en el proceso de segmentación, (iii) el peso de la compacidad y los criterios de suavizado (*i.e.* cuanto mayor sea el peso de la compacidad, los *IOs* serán más compactos). La determinación óptima de estos tres parámetros, algo abstractos por otra parte, no es ni mucho menos trivial. Normalmente es necesaria una validación de los posibles errores sistemáticos mediante una inspección visual de la calidad de los *IOs* de salida (*i.e.* ensayo y error) para establecer el valor

apropiado de dichos parámetros (Mathieu *et al.*, 2007; Tian y Chen, 2007). Por otra parte, los parámetros de configuración óptimos dependen de los objetos que queramos segmentar (*e.g.* Tian y Chen, 2007). Recientemente han surgido nuevas herramientas para una estimación rápida de los parámetros de escala de la segmentación multi-resolución (Drăguț *et al.*, 2010), así como para evaluar la precisión de la segmentación final (Marpu *et al.*, 2010).

Sin embargo, y aceptando que la segmentación de las imágenes de satélite VHR es un paso fundamental para obtener una clasificación final de gran precisión (Song *et al.*, 2005; Liu y Xia, 2010), tenemos que dejar claro que el objetivo de este trabajo estuvo exclusivamente dirigido a la comparación de la precisión en cuanto a la clasificación supervisada de usos del suelo en áreas urbanas a partir de ortoimágenes de GE-1 y WV-2. De este modo, y en nuestro caso particular, el proceso de segmentación solamente pretendía la obtención de *IOs* puros (*i.e.* grupos de píxeles que pertenecen a una misma clase) para posteriormente clasificarlos y estudiar la precisión de dicha clasificación *OBIA* comparándola con un mapa de referencia. Es importante destacar que finalmente hemos contado con dos mapas de referencia o *ground truth*, uno para cada sensor. En este sentido, se segmentaron 2,723 *IOs* para las ortoimágenes de GE-1 (Fig. VII.3a) que se correspondieron razonablemente bien con los límites de los objetos pertenecientes a cada clase en el área de estudio (principalmente edificios). De la misma forma, se segmentaron 2,720 *IOs* para la ortoimagen de WV-2 (Fig. VII.3b). En ambos estudios se realizó una segmentación multi-resolución a dos escalas diferentes y de forma jerarquizada (procedimiento multiescala *bottom-up*). Además, se le asignó un peso de 0.5 al criterio de compacidad y 0.3 al criterio de forma (*i.e.* peso del color = 0.7) en todas las segmentaciones llevadas a cabo.

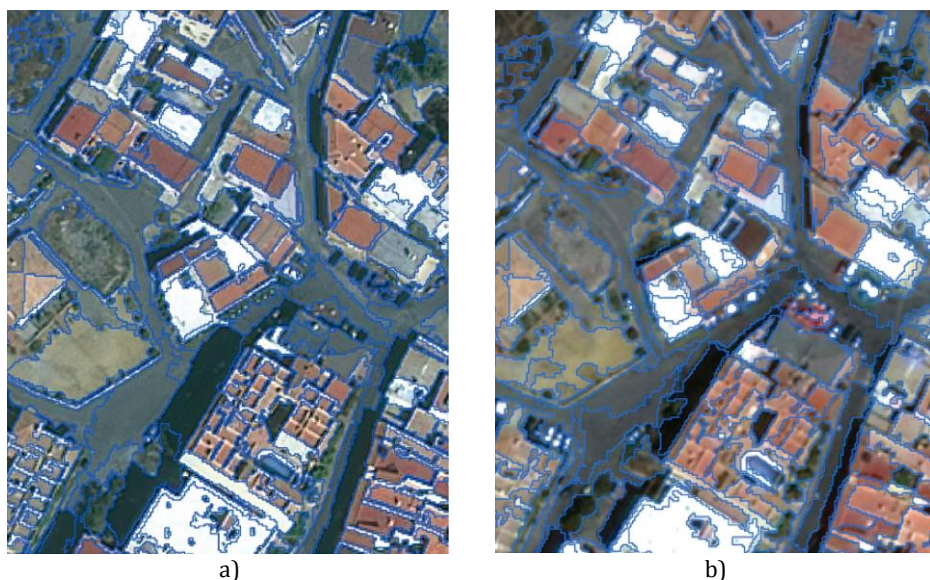


Fig. VII.3. Segmentación multi-resolución (110 m por 135 m): a) GE-1 y b) WV-2.

En el caso de la ortoimagen *pan-sharpened* de GE-1, el primer paso fue realizar una primera segmentación aplicando un valor de escala de 20 a nivel de píxel, aplicando en el segundo paso un valor de escala de 70 sobre los objetos más pequeños segmentados en la fase anterior. La segmentación fue siempre aplicada teniendo en cuenta el mismo peso para las cuatro bandas correspondientes a la ortoimagen *pan-sharpened*.

En el caso de WV-2, la primera segmentación a nivel de píxel fue llevada a cabo con una escala de 10.7, mientras la segunda segmentación empleó un valor de escala de 43. En este caso la segmentación multi-resolución se realizó teniendo en cuenta el mismo peso para las ocho bandas de la ortoimagen *pan-sharpened* de WV-2. Los *IOs* procedentes de las ortoimágenes de GE-1 y WV-2 se importaron en *ArcGis v. 10* como archivos vectoriales (.SHP) para llevar a cabo las siguientes fases de clasificación manual y selección de las áreas de entrenamiento.

7.3.2. Clasificación manual.

Con el objetivo de minimizar el impacto de la segmentación en la clasificación final, se produjeron dos mapas de referencia diferentes sobre la zona de trabajo (clasificación manual), uno para cada segmentación. El proceso de clasificación manual fue llevado a cabo en entorno *ArcGis v.10* mediante una cuidadosa

inspección visual de datos georreferenciados, incluyendo: las ortoimágenes *PAN* y *pan-sharpened* de GE-1 y WV-2, la ortoimagen aérea obtenida con la cámara DMC Z/I Imaging, y el *nDSM* obtenido a partir de datos *LiDAR*. Para ambas segmentaciones, cada *IO* fue clasificado visualmente y el mapa de referencia final fue validado por dos intérpretes. Para esta tarea se consideraron diez clases en ambos casos (Tabla VII.1). Cabe señalar que la evaluación de la precisión propuesta basada en dos mapas de referencia del terreno independientes, siempre comparando exactamente los mismo *IOs* segmentados, elimina los posibles errores de sobre-segmentación y sub-segmentación (*i.e.* píxeles adicionales y perdidos definidos por Marpu *et al.*, 2010).

Para la segmentación de GE-1, 1,894 *IOs* de los 2,723 que había inicialmente pudieron ser visualmente identificados como objetos puros y significativos (Tabla VII.1). Un sub-set de 945 *IOs* bien distribuidos sobre el área de trabajo fue seleccionado para llevar a cabo la fase de entrenamiento, mientras los 949 *IOs* restantes, también con una buena distribución en el área de trabajo, fueron usados para la validación o fase de evaluación de la precisión obtenida. Hay que destacar que, para cada clase, aproximadamente el 50% de los *IOs* fue incluido en el sub-set de entrenamiento mientras el 50% restante fue utilizado como sub-set de validación. En el caso de la segmentación de WV-2, 1,759 *IOs* de los 2,720 clasificados manualmente (Tabla VII.2) fueron divididos en sub-set de entrenamiento (876 *IOs*) y sub-set de validación (883 *IOs*). La superficie total ocupada por los *IOs* para cada clase y según sus respectivos mapas de referencia (*ground truth*), así como su media y desviación estándar (σ), son mostrados también en las Tablas VII.1 y VII.2.

Tabla VII.1. IOs de la segmentación de GE-1 clasificados manualmente de acuerdo con las clases consideradas.

Clases	No. IOs	Área (m ²)			IOs Validación	IOs Entrenam.
		Área Total	Media	σ		
Edificios Rojos	298	22217	74.55	51.62	149	149
Edificios Blancos	558	17034.25	30.53	37.57	279	279
Edificios grises	68	5279.5	77.64	57.11	34	34
Otros edificios	55	3086.25	56.11	34.04	28	27
Sombras	477	21600	45.28	63.59	239	238
Vegetación	194	17192.5	88.62	88.13	97	97
Suelo Desnudo	93	15464	166.28	126.84	47	46
Carreteras	72	15720.5	218.34	161.99	36	36
Calles	71	7317.75	103.07	109.06	36	35
Piscinas	8	342.25	42.78	10.2	4	4

Tabla VII.2. IOs de la segmentación de WV-2 clasificadas manualmente de acuerdo con las clases consideradas.

Clases	No. IOs	Área (m ²)			IOs Validación	IOs Entrenam.
		Área Total	Media	σ		
Edificios Rojos	315	24209.5	76.86	50.81	158	157
Edificios Blancos	315	10241.75	32.51	33.68	158	157
Edificios grises	88	6528	74.18	61.95	44	44
Otros edificios	78	5116.75	65.60	49.57	39	39
Sombras	431	14404.5	33.42	32.48	216	215
Vegetación	159	13289	83.58	73.73	80	79
Suelo Desnudo	147	18663.75	126.96	103.46	74	73
Carreteras	116	17489	150.77	96.21	58	58
Calles	97	8934.5	92.11	70.61	49	48
Piscinas	13	482.25	37.10	13.97	7	6

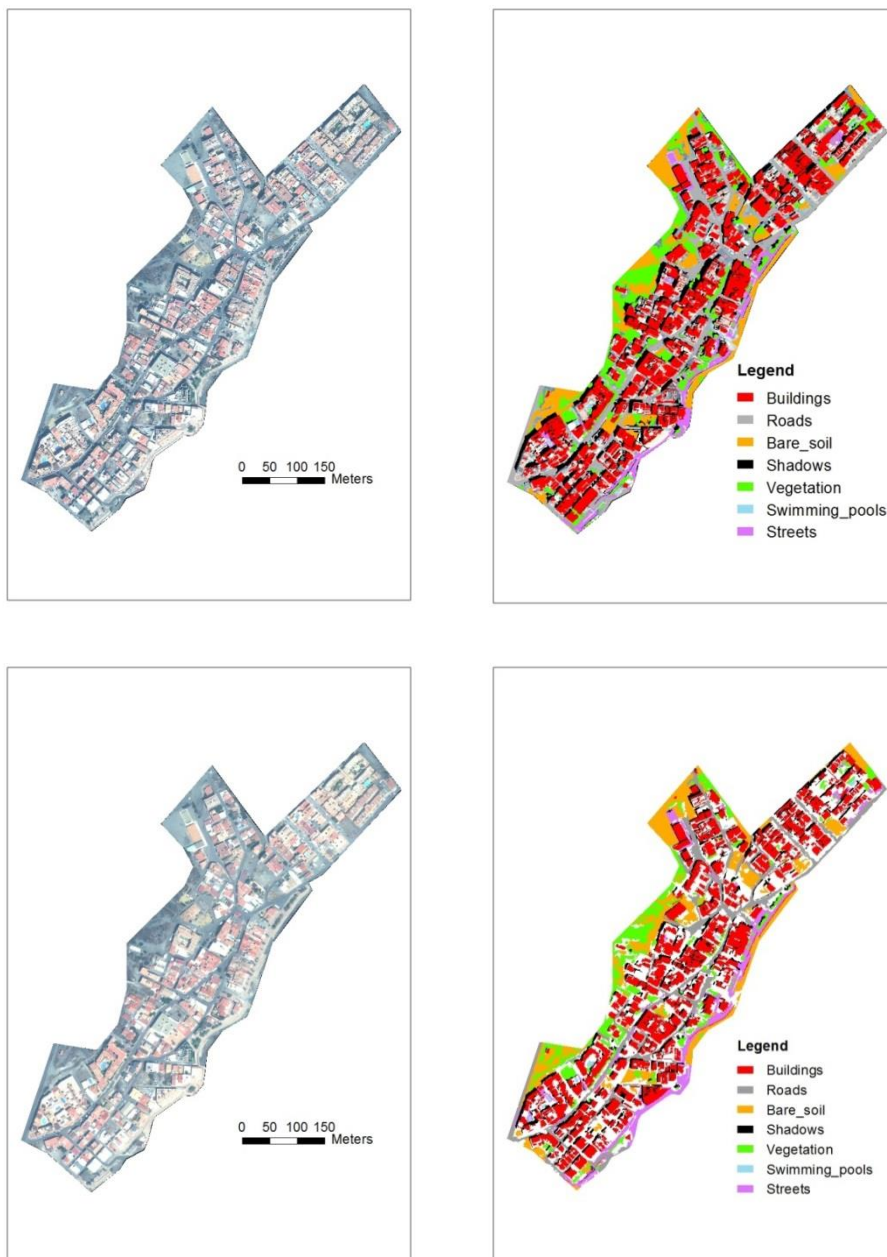


Fig. VII.4. Fila superior: ortoimagen *pan-sharpened* de GE-1 (izquierda) y clasificación manual de la segmentación de GE-1 (derecha). Fila inferior: ortoimagen *pan-sharpened* de WV-2 (izquierda) y clasificación manual de la segmentación de WV-2 (derecha).

Los mapas de referencia, generados manualmente a partir de los resultados de las segmentaciones previas, se muestran en la Figura VII.4, donde se presentan las cuatro clases relacionadas con edificios (*i.e.* Edificios Rojos, Edificios Blancos, Edificios grises y Otros edificios) agrupadas en una sola clase llamada Edificios. Aunque el número de *IOs* no clasificados (segmentos espectralmente mixtos que no pueden ser asignados a ninguna clase; píxeles blancos en la Fig. VII.4) en los mapas de referencia es similar para ambos casos, el área ocupada por esos *IOs* es mucho mayor en el caso del *ground truth* de WV-2. Este hecho apunta a problemas de sub-segmentación. Sin embargo, cabe señalar que los *IOs* utilizados, tanto en la fase de entrenamiento como en la fase de evaluación de la precisión, fueron siempre objetos significativos.

7.3.3. Áreas de entrenamiento.

El clasificador supervisado empleado en este estudio fue el ampliamente conocido *Nearest Neighbour* (*NN*), aunque trabajos comparativos han demostrado que la clasificación por métodos más sofisticados, como por ejemplo *Support Vector Machine* (*SVM*), pueden ser más precisos que clasificadores clásicos (Foody y Mathur, 2004; Melgani y Bruzzone, 2004). A pesar de que *SVM*, por lo general, resulta ser más estable trabajando con espacios de características de grandes dimensiones y necesita un pequeño número de muestras para el entrenamiento (*e.g.* Foody y Mathur, 2006; Chen y Ho, 2008), la precisión de la clasificación de un modelo *SVM* depende, en gran medida, de la selección de los parámetros del modelo (Chang y Lin, 2011). Desde nuestro punto de vista, esta necesaria parametrización del clasificador recomienda, teniendo en cuenta el objeto exclusivamente comparativo de nuestro análisis, el uso de un clasificador en el que no hay que definir ningún parámetro como es el caso de *NN*.

Para llevar a cabo la fase de entrenamiento del clasificador *NN* sobre las ortoimágenes de GE-1, se realizaron cuatro repeticiones que contenían el 5, 10, 15 y 20% de los *IOs* respectivamente (16 repeticiones en total) extraídas aleatoriamente del sub-set de entrenamiento compuesto por 945 *IOs*. El porcentaje de entrenamiento se intentó mantener constante para cada clase, de acuerdo con el número de *IOs* y el área media o tamaño de los mismos. Por ejemplo, para el test

de GE-1, los 298 *IOs* de la clase *Edificios Rojos* presentaron un área media de 75.55 m² por objeto. Por lo tanto, se intentó que, en cada repetición, las áreas de entrenamiento para la clase de *Edificios Rojos* tuvieran siempre un área media de alrededor de 74 m². De esta misma forma, otras 16 repeticiones relativas al conjunto de objetos de entrenamiento se seleccionaron a partir de los 876 *IOs* reservados para este fin en el caso de WV-2. En la Tabla VII.3 se muestra el número de *IOs* elegidos para entrenar el clasificador *NN* en ambos casos.

La selección de las áreas de entrenamiento se realizó en *ArcGis v.10* y se guardaron en archivos *GEOTIFF*. En este sentido se obtuvieron finalmente 32 archivos *GEOTIFF* (*i.e.* dos segmentaciones, cuatro tamaños de muestras de entrenamiento y cuatro repeticiones para cada set de entrenamiento). Estos archivos se importaron en *eCognition* como una máscara de prueba y área de entrenamiento (*Test and Training Area mask, TTA Mask*) y finalmente se convirtieron en muestras para llevar a cabo la fase de entrenamiento.

Tabal VII.3. Número de *IOs* usados para el entrenamiento del clasificador *NN* en cada imagen después de la segmentación y la clasificación manual con las clases consideradas.

Clases	Entrenamiento GE-1				Entrenamiento WV-2			
	5%	10%	15%	20%	5%	10%	15%	20%
Edificios Rojos	15	30	45	60	16	32	48	63
Edificios Blancos	28	56	84	112	16	32	48	63
Edificios grises	4	7	11	14	5	9	14	18
Otros edificios	3	6	11	15	4	8	12	16
Sombras	24	48	72	96	22	44	65	87
Vegetación	10	20	30	39	8	16	24	32
Suelo Desnudo	5	10	14	19	8	15	23	30
Carreteras	4	8	11	15	6	12	18	24
Calles	4	8	11	15	5	10	15	20
Piscinas	1	1	2	2	1	2	2	3

7.3.4. Extracción y selección del vector de características.

Las características (*features*) de los objetos usados para llevar a cabo la clasificación supervisada se muestran y describen en la Tabla VII.4. Un total de 23 y 31 características, agrupadas en cinco categorías, se probaron para GE-1 y WV-2 respectivamente. Una información más detallada de cada una de ellas se puede encontrar en el *Reference Book of Definiens eCognition Developer 8* (Definiens eCognition, 2009). La “Información Espectral Básica” estuvo constituida por los valores medios y desviaciones estándar de los números digitales de todos los píxeles que se encuentran dentro de un *IO* para cada banda y tipo de ortoimagen (*pan-sharpened* y *PAN*). Otras tres características (Índices de Diferencias Normalizado, *NDIs* (*Normalized Difference Index*), para las bandas *Blue*, *Green* y *Red*), extraídas a partir de la información espectral incluida en las ortoimágenes (ver Tabla VII.4), fueron agrupadas bajo la estrategia denominada “Índice de Banda”. En la categoría de “Textura”, sólo se consideraron cinco características de textura basadas en la matriz de co-ocurrencia de niveles de gris (*Gray-Level Co-occurrence Matrix*, *GLCM*) de entre los 14 propuestos originalmente por Haralick *et al.* (1973), debido a la fuerte correlación frecuentemente descrita entre muchos de ellos (*e.g.* Cossu, 1988; Baraldi y Pannigiani, 1995). Los indicadores de textura siempre fueron calculados sobre la imagen *PAN* y considerando todas las direcciones.

Las cinco características seleccionadas fueron contraste (*con*), entropía (*ent*), media (*mean*), desviación estándar (*stdv*) y correlación (*cor*). El mismo sub-set de características fue seleccionado por Stumpf y Kerle (2011) trabajando en un espacio de características similares para la obtención de mapas de deslizamientos de laderas. Bajo la categoría llamada “Forma y Geometría” se consideraron dos características geométricas basadas en la forma (Ajuste Rectangular e Índice de Forma) y otras dos características basadas en la configuración poligonal del objeto (Compacidad y Número de Bordes). Finalmente se añadió una característica relacionada con los datos de elevación del *nDSM*.

Tabla VII. 4. Características (*Features*) de cada objeto imagen (*IO*) usadas en la fase de clasificación. *NIR1* = Infrarrojo cercano 1; *NIR2* = Infrarrojo cercano 2.

	<i>Features</i> probadas	Aplicadas a	Descripción
Información básica espectral	<i>Coastal</i>	Solo WV2	Media y desviación estándar de la banda <i>Coastal</i> de la pan-sharpened
	<i>Blue</i>	Ambos	Media y desviación estándar de la banda <i>Blue</i> de la pan-sharpened
	<i>Green</i>	Ambos	Media y desviación estándar de la banda <i>Green</i> de la pan-sharpened
	<i>Yellow</i>	Solo WV2	Media y desviación estándar de la banda <i>Yellow</i> de la pan-sharpened
	<i>Red</i>	Ambos	Media y desviación estándar de la banda <i>Red</i> de la pan-sharpened
	<i>Red Edge</i>	Solo WV2	Media y desviación estándar de la banda <i>Red Edge</i> de la pan-sharpened
	<i>NIR1</i>	Ambos	Media y desviación estándar de la banda <i>NIR1</i> de la pan-sharpened
	<i>NIR2</i>	Solo WV2	Media y desviación estándar de la banda <i>NIR2</i> de la pan-sharpened
	<i>PAN</i>	Ambos	Media y desviación estándar de la banda <i>PAN</i>
Índices de bandas	<i>NDBI</i>	Ambos, NIR1 para WV2	Índice de Diferencia Normalizada para la banda <i>Blue</i> , (Mean NIR - Mean Blue)/(Mean NIR + Mean Blue)
	<i>NDGI</i>	Ambos, NIR1 para WV2	Índice de Diferencia Normalizada para la banda <i>Green</i> , (Mean NIR - Mean Green)/(Mean NIR + Mean Green)
	<i>NDVI</i>	Ambos NIR1 para WV2	Índice de Vegetación de Diferencia Normalizado, (Mean NIR - Mean Red)/(Mean NIR + Mean Red)
Textura	<i>GLMC_{con}</i>	Ambos	Contraste GLCM sobre ortoimagen PAN como suma de todas las direcciones
	<i>GLMC_{ent}</i>	Ambos	Entropía GLCM sobre ortoimagen PAN como suma de todas las direcciones
	<i>GLMC_{mean}</i>	Ambos	Media GLCM sobre ortoimagen PAN como suma de todas las direcciones
	<i>GLMC_{stdv}</i>	Ambos	Desviación estándar GLCM sobre ortoimagen PAN como suma de todas las direcciones
	<i>GLMC_{cor}</i>	Ambos	Correlación GLCM sobre ortoimagen PAN como suma de todas las direcciones
Forma y geometría	<i>Ajuste rectangular</i>	Ambos	Describe como de bien se ajusta un objeto a un rectángulo
	<i>Índice de forma</i>	Ambos	Perímetro de un IO dividido entre cuatro veces la raíz cuadrada de su área
	<i>Compacidad</i>	Ambos	El cociente entre el área de un polígono y el área de un círculo con el mismo perímetro
	<i>No. bordes</i>	Ambos	El número de bordes que forman el polígono
Datos de Elevación	<i>nDSM</i>	Ambos	Modelo Digital de Superficie Normalizado a partir de datos LiDAR

Los resultados de clasificación para las ortoimágenes de GE-1 y WV-2 fueron analizados en función de siete estrategias dependientes del vector de características empleado:

- (i) “*Básica 1*”: este set solo incluye Información Espectral Básica. Se consideraron 10 características para *IOs* de GE-1, comparando los valores de la media y la desviación estándar calculados para cada banda (*Blue, Green, Red, NIR* y *PAN*). Del mismo modo, para WV-2 se calcularon 18 características (*Coastal, Blue, Green, Yellow, Red, Red Edge, NIR1, NIR2* y *PAN*). Sólo para el caso de WV-2 se probó una estrategia denominada *Básica 2* (10 características), donde la información correspondiente a las nuevas bandas que presenta WV-2 (*i.e. Coastal, Yellow, Red Edge* y *NIR2*) no se tuvieron en cuenta.
- (ii) “*Elevación*”: esta estrategia está compuesta por la *Básica 1* más la característica de elevación media para cada *IO* obtenida a partir del correspondiente *nDSM* (11 y 19 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).
- (iii) “*NDIs*”: compuesta por la *Básica 1* más los Índices de Diferencia Normalizados (13 y 21 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).
- (iv) “*Elevación + NDIs*”: set *Básica 1* más *NDIs* y *nDSM* (14 y 22 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).
- (v) “*Textura*”: set *Básica 1* más características de textura (15 y 23 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).
- (vi) “*Geometría*”: set *Básica 1* más forma y características geométricas (14 y 22 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).
- (vii) “*Todas*”: todas las características presentadas en la Tabla VII. 4 (23 y 31 características para GE-1 y WV-2 respectivamente).

7.3.5. Clasificación y evaluación de la precisión.

Las siete estrategias mencionadas (ocho para el caso de la imagen de WV-2 si consideramos la estrategia *Básica 2*) fueron aplicadas mediante el clasificador *NN* para extraer las diferentes clases objetivo. Teniendo en cuenta que había 16 sets de muestras de entrenamiento, se llevaron a cabo 240 proyectos de clasificación

diferentes en *eCognition* (i.e. 112 y 128 para GE-1 y WV-2 respectivamente). En todos ellos se empleó una matriz de error basada en *IOs* para la evaluación de la precisión de la clasificación final. Para los proyectos de clasificación de GE-1, la precisión de la clasificación fue evaluada sobre un set de validación siempre compuesto por 949 *IOs* (Tabla VII.1), mientras que en el caso de WV-2 el set de validación está compuesto por 883 *IOs* (Tabla VII.2).

Hay que destacar que, antes de calcular los índices de precisión explicados más adelante, las cuatro clases relacionadas con edificios (i.e. *Rojos, Blancos, Grises y Otros Edificios*) se agruparon en una sola clase denominada *Edificios*. Esta clase es la más amplia en el área de trabajo, presentando un porcentaje sobre el área total en la clasificación manual de más del 38%, tanto para GE-1 como WV-2 (ver Tablas VII.1 y VII.2). Por otra parte, *Calles* y, especialmente, *Piscinas*, fueron las dos clases menos frecuentes en el área de trabajo.

La expresión de los errores de omisión y comisión, en términos porcentuales, suele denominarse precisión del productor (*producer's accuracy, PA*) y precisión del usuario (*user's accuracy, UA*). Estos estimadores, junto con la precisión global (*Overall Accuracy, OA*) y el índice Kappa, tanto global como para cada clase (*Edificios, Sombras, Vegetación, Suelo Desnudo, Carreteras, Calles y Piscinas*) (Congalton 1991; Congalton y Green, 2009), fueron los indicadores de precisión basados en la matriz de contingencia o de error determinados en este trabajo.

Los errores de comisión (*UA*) hacen referencia a cuando un objeto está en una clase incorrecta, mientras que los errores de omisión (*PA*) hacen referencia a cuando un segmento está clasificado incorrectamente en otra categoría y, por tanto, también se omite de la clase correcta. Por otra parte, la exactitud global de la clasificación sólo considera los aciertos situados en la diagonal de la matriz de confusión y descarta la información suministrada por los errores de comisión y omisión. Esta limitación suele soslayarse mediante el empleo de un estadístico multivariado discreto como el estimador de concordancia Kappa de Cohen (*KIA, Kappa Index of Agreement*). En efecto, en la clasificación de una serie de clases objetivo interesa, de alguna manera, comparar la clasificación obtenida frente a una de referencia; por ejemplo, aquella basada en el mero azar (Congalton *et al.*,

1983). El índice Kappa se construye de forma que i) sea un número único para toda la matriz, ii) sea mayor para una clasificación más exacta y menor para una inexacta, y iii) introduzca el azar como un proceso de referencia. En este sentido, el estimador *KIA* considera tanto la información sobre la precisión global de la clasificación como los errores de comisión y omisión, por lo que es un índice de calidad de la clasificación muy valorado en procedimientos de validación como el de este trabajo.

7.3.6. Análisis estadístico.

Con el objetivo de estudiar la influencia de los factores estudiados en la precisión de la clasificación final, *i.e.* diferentes estrategias ensayadas, tipo de sensor y tamaño de las muestras de entrenamiento, se llevaron a cabo diferentes análisis de la varianza (ANOVA), tanto incluyendo las tres fuentes de variación (modelo lineal general) como estudiando separadamente cada uno de ellos (ANOVA *one-way*), mediante un modelo factorial con cuatro repeticiones (Snedecor y Cochran, 1980). Las variables observadas fueron *OA*, *PA*, *UA* y el Índice *KIA* por clase y global (*KIA* y *KIA_{class}*). Cuando los resultados del análisis ANOVA resultaron ser significativos ($p < 0.05$), se llevó a cabo la separación de medias mediante el test de Duncan con un nivel de confianza del 95 %.

7.4. RESULTADOS.

7.4.1. Diferencias entre las imágenes examinadas.

En primer lugar, es importante señalar la clara diferencia visual que se puede apreciar entre las ortoimágenes *pan-sharpened* de GE-1 (Fig. VII.2a) y WV-2 (Fig. VII.2b). La imagen de GE-1 tiene un ángulo off-nadir mayor (20.6°) que la imagen correspondiente a WV-2 (10° off-nadir). Esta mayor inclinación en la adquisición de la imagen de GE-1 provocó un incremento de las fachadas de los edificios proyectados en la imagen (normalmente de color blanco). Como resultado, un mayor número de *IOs* fueron clasificados como *Edificios Blancos*. Además, el ángulo de elevación solar resultó ser muy diferente entre GE-1 y WV-2, tomando valores de 48° y 64° respectivamente. El menor ángulo de elevación solar de la imagen de GE-1 provocó un importante incremento de las sombras en la ortoimagen

correspondiente con respecto a las observadas en la ortoimagen de WV-2. El aspecto de la vegetación también fue diferente y, casualmente, el número de vehículos situados a lo largo de las calles resultó mayor en el caso de las imágenes de WV-2. Finalmente, la ortoimagen de WV-2 mostró un efecto borroso que se tradujo en un menor contraste que el presentado por la imagen de GE-1. En efecto, tal y como hemos visto en el Capítulo 3 de esta Tesis, se detectó una notable compresión de los histogramas para cada banda en las imágenes *PAN* y *MS* de WV-2, especialmente para las bandas *PAN* y *Blue*. Este comportamiento diferencial entre las imágenes de WV-2 y GE-1 ha sido descrito por Aguilar *et al.* (2013a) y por Agugiaro *et al.* (2012). Atendiendo a los resultados del análisis realizado a lo largo del Capítulo 3 de esta Tesis, las características radiométricas de ambos sensores podrían ser el principal factor responsable de la presencia del mencionado efecto borroso en la imagen de WV-2. En este sentido, es conveniente volver a recalcar la importancia de contrastar los resultados obtenidos en este trabajo con estudios futuros para verificar esta hipótesis.

7.4.2. Precisión de la clasificación global.

El primer examen global ANOVA se llevó a cabo teniendo en cuenta los efectos de los tres factores analizados sobre la precisión de la clasificación global, medida como *OA* y *KIA*. De este análisis se puede destacar que los valores *OA* y *KIA* mostraron un comportamiento similar.

En resumen, y como resultado del análisis ANOVA desarrollado, los tres factores principales evaluados resultaron afectar significativamente ($p < 0.05$) a la precisión de la clasificación supervisada, siendo el tipo de satélite la fuente de variación más importante, seguida por el vector de características y, finalmente, el porcentaje de *IOs* de entrenamiento respecto al total (valores del F-test decrecientes). La interacción entre el tipo de sensor y el conjunto de características resultó ser también significativa, aunque el correspondiente valor de F-test fue menor que el obtenido por los tres factores principales. Esto indicaría que el conjunto de características aplicadas para la clasificación produciría diferentes precisiones finales en función del satélite empleado.

Tabla VII.5. Comparación de los valores medios ANOVA de Precisión Global (OA) y Kappa (KIA) para los tres factores principales evaluados. Para cada factor estudiado, valores a lo largo de columnas seguidos de superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$.

Factores	Factores Desglosados	OA (%)	KIA
Vector de Características	Geometría	75.0 ^f	0.633 ^f
	Básica 1	76.8 ^e	0.663 ^e
	Textura	77.9 ^d	0.679 ^d
	NDIs	79.5 ^c	0.703 ^c
	Elevación	80.8 ^b	0.722 ^b
	Elevación+NDIs	82.9 ^a	0.753 ^a
	Todas	83.6 ^a	0.760 ^a
Entrenamiento	5%	77.9 ^d	0.677 ^d
	10%	78.8 ^c	0.693 ^c
	15%	80.4 ^b	0.714 ^b
	20%	81.0 ^a	0.724 ^a
Satélite	WV-2	75.7 ^b	0.659 ^b
	GE-1	83.4 ^a	0.743 ^a

La Tabla VII.5 muestra la comparación de los valores medios de *OA* y *KIA* en el primer test ANOVA global. Con respecto al set de *features* probado, hay que destacar que *Geometría* y *Textura* tuvieron muy poca influencia en los valores de *OA* y *KIA*, mientras que las características basadas en *nDSM* y *NDIs* añadieron una valiosa información a la estrategia *Básica 1*. Con respecto al tamaño de las muestras de entrenamiento, la Tabla VII.5 confirma que cuanto mayor es el número de *IOs* de entrenamiento mejores son los resultados de la clasificación. Finalmente, se observaron diferencias significativas entre la precisión de la clasificación global (*OA* y *KIA*) obtenida a partir de las ortoimágenes de GE-1 y WV-2. Los resultados en cuanto a la precisión global de la clasificación para cada satélite serán estudiados en profundidad en los siguientes apartados, donde nos centraremos en los vectores de características (set de *features*) y en el porcentaje de muestras de entrenamiento empleadas.

7.4.2.1. Vectores de características.

La Tabla VII.6 muestra la evaluación de la precisión de la clasificación independiente para cada sensor considerando sólo el factor *Vector de Características* (ANOVA unidireccional). En general, y para ambos satélites, se alcanzaron las mejores precisiones, medidas como *OA* y *KIA*, cuando se incluyó la característica *nDSM* (i.e. *Elevación*, *Elevación + NDIs*, y *Todas*). Otra similitud entre los resultados de ambos satélites fue que el set *Geometría* no funcionó bien en ningún caso. Por otra parte, y aunque teniendo en cuenta que todas las conclusiones serían sólo válidas para las condiciones especiales de cada imagen usada en este capítulo, se obtuvieron mayores valores *OA* y *KIA* para la imagen de GE-1. En comparación con la estrategia *Básica 1*, las características de *Textura* mejoraron significativamente los valores de *OA* y *KIA* en el caso de WV-2, mientras que no se detectaron diferencias significativas ($p < 0.05$) en el caso de GE-1.

Tabla VII.6. Comparación de los valores medios de la precisión global (*OA*) y Kappa (*KIA*) para los set de *features* o estrategias y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indican diferencias significativas a un nivel de significación de $p < 0.05$.

Estrategias	GE-1		WV2	
	OA (%)	KIA	OA (%)	KIA
Básica 2	-	-	71.3 ^d	0.598 ^d
Geometría	78.3 ^d	0.665 ^d	71.7 ^d	0.601 ^d
Básica 1	81.5 ^c	0.717 ^c	72.1 ^d	0.609 ^d
Textura	81.0 ^c	0.707 ^c	74.9 ^c	0.652 ^c
NDIs	84.9 ^b	0.769 ^b	74.1 ^c	0.638 ^c
Elevación	84.3 ^b	0.761 ^b	77.4 ^b	0.683 ^b
Elevación+NDIs	87.2 ^a	0.806 ^a	78.6 ^b	0.701 ^b
Todas	86.4 ^a	0.791 ^a	80.7 ^a	0.729 ^a

Centrándonos en GE-1, los vectores de características que ofrecieron mejores resultados ($p < 0.05$) fueron *Todas* y *Elevación + NDIs*, alcanzando un valor de *OA* cercano al 87% (i.e. ambos valores van seguidos por la letra "a" que no se repite en ningún otro valor de la misma columna). Sin embargo, y ahora fijándonos en el

caso de WV-2, el mejor resultado estadísticamente significativo ($p < 0.05$) se alcanzó mediante el conjunto de características *Todas*, obteniéndose valores de OA de alrededor del 80%.

Cabe destacar que, bajo nuestras condiciones experimentales, la estrategia llamado *Básica 2*, donde se consideraron solamente las cuatro bandas *MS* tradicionales incluidas en WV-2 (*i.e.* *Red, Green, Blue, Nir-1*), generó los mismos resultados de precisión que la estrategia *Básica 1* (*i.e.* sin diferencias estadísticas). Esto indicaría que la inclusión de las nuevas bandas ofrecidas por WV-2, en relación con las tradicionales *R, G, B* y *Nir* ofrecidas por los demás satélites *VHR*, no ofrece mejoras aparentes para la clasificación de usos del suelo en áreas urbanas.

7.4.2.2 Porcentaje de entrenamiento.

En este apartado se estudia la influencia del tamaño de las muestras de entrenamiento sobre la precisión de la clasificación obtenida para cada satélite. La Tabla VII.7 muestra la comparación de los resultados medios del análisis ANOVA unidireccional llevado a cabo para la precisión global de la clasificación (*OA* y *KIA*). La regla de “*cuanto más grande mejor*” también es válida en este caso, ya que *OA* y *KIA* siempre mejoraron cuanto mayor era el tamaño de la muestra empleada como entrenamiento.

Sin embargo, y teniendo en cuenta criterios estadísticos y de eficiencia, la opción más interesante en el caso de GE-1 sería una muestra de entrenamiento de aproximadamente el 10% de los *IOs* totales (los resultados no son estadísticamente diferentes de los obtenidos con un 15% o 20% de entrenamiento). En el caso de WV-2 la mejor opción sería un porcentaje de entrenamiento del 15%. Este hecho podría estar relacionado con el diferente número de bandas disponibles para cada sensor. En otras palabras, es necesario un mayor número de muestras de entrenamiento para un mayor número de bandas (Piper, 1992; Mather, 2004). Como podremos ver más adelante, el tamaño de entrenamiento óptimo depende mucho de la clase estudiada.

Tabla VII.7. Comparación de los valores medios de la precisión global (OA) y Kappa (KIA) en función del porcentaje de muestras de entrenamiento y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$.

Tamaño de Entrenamiento (%)	GE-1		WV-2	
	OA (%)	KIA	OA (%)	KIA
5	81.7 ^b	0.719 ^b	73.6 ^b	0.627 ^b
10	83.1 ^{ab}	0.741 ^{ab}	74.0 ^b	0.637 ^b
15	84.1 ^a	0.756 ^a	76.2 ^a	0.665 ^a
20	84.7 ^a	0.765 ^a	76.7 ^a	0.675 ^a

7.4.3. Edificios.

La clase *Edificios* es generalmente la más importante en entornos urbanos. En nuestro caso representa más del 38% del área clasificada manualmente. Según se muestra en la Tabla VII.8, la característica más relevante para la clasificación de edificios de GE-1 y WV-2 resultó ser el *nDSM* proveniente de los datos *LiDAR*. Este hecho ya ha sido referido por varios autores como Awrangjeb *et al.* (2010), Turker y San (2010), Hermosilla *et al.* (2011) o Longbotham *et al.* (2012). Si prestamos atención a la imagen de GE-1, las estrategias que obtuvieron mejores resultados fueron *Elevación + NDIs* y *Todas*, alcanzando valores de *PA* y *UA* en torno al 95%. Por otra parte, las mejores estrategias para la clasificación de la imagen WV-2 fueron *Elevación*, *Elevación + NDIs* y *Todas*, alcanzando valores de *PA* y *OA* próximos al 91%.

En el caso de la clase *Edificios*, la influencia del tamaño de entrenamiento no afectó significativamente a los índices de precisión de la clasificación (*PA*, *UA* y *KIA_{Edificios}*), aunque se observó una ligera tendencia hacia una mejora de los resultados cuando aumentó el porcentaje de las muestras de entrenamiento (datos no presentados). Es importante destacar que sólo el 5% de porcentaje de entrenamiento para *Edificios* ya incluye más de 40 *IOs*, tanto para WV-2 como para GE-1.

Tabla VII.8. Comparación de los valores medios para la clase *Edificios* de *Producer's Accuracy (PA)*, *User's Accuracy (UA)* y *Kappa (KIA_{Edificios})* para cada set de *features* y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$.

Estrategias	GE-1			WV2		
	PA (%)	UA (%)	KIA _{Edificios}	PA (%)	UA (%)	KIA _{Edificios}
Básica 2	-	-	-	85.5 ^b	83.5 ^d	0.731 ^b
Geometría	89.4 ^d	88.2 ^d	0.777 ^d	84.7 ^b	83.6 ^d	0.720 ^b
Básica 1	89.1 ^d	89.7 ^c	0.777 ^d	83.9 ^b	84.5 ^{cd}	0.705 ^b
Textura	91.0 ^c	89.6 ^c	0.811 ^c	85.0 ^b	85.7 ^b	0.734 ^b
NDIs	91.4 ^c	91.0 ^b	0.822 ^c	85.0 ^b	85.4 ^{bc}	0.728 ^b
Elevación	94.0 ^b	94.6 ^a	0.877 ^b	91.1 ^a	91.7 ^a	0.839 ^a
Elevación + NDIs	95.3 ^a	94.9 ^a	0.903 ^a	90.8 ^a	91.2 ^a	0.834 ^a
Todas	95.8 ^a	94.9 ^a	0.911 ^a	92.1 ^a	91.6 ^a	0.856 ^a

7.4.4. Sombras.

La clasificación de la clase *Sombras* resulta extremadamente difícil debido a que las sombras varían espectralmente dependiendo del objeto que las provoca. Del mismo modo, las características espectrales de la clase *Sombras* pueden ser similares a las de otros objetos como el agua (Sawaya *et al.*, 2003) y techos de edificios oscuros o grises (Bhaskaran *et al.*, 2010). Además, las sombras son particularmente importantes en imágenes de alta resolución, especialmente en entornos urbanos, donde la elevación varía radicalmente en distancias muy cortas (Dare, 2005; Yuan, 2008). Por tanto, la introducción de la clase *Sombras* se hace necesaria para impedir que píxeles sombreados en áreas urbanas sean clasificados como agua o techos oscuros (Shackelford y Davis, 2003). La Tabla VII.9 muestra que la estrategia que incluye los descriptores de textura (*Textura GLMC*) obtuvo los mejores resultados en la clasificación de sombras mediante *NN*, tanto para WV-2 como para GE-1. Los descriptores de textura son un método potencialmente potente para detectar sombras ya que son altamente distintivos, no dependen de colores y son robustos en cuanto a cambios de iluminación. De esta manera, Su *et al.* (2008) mejoraron la clasificación de sombras en zonas urbanas con características texturales basadas en *GLMC* como bandas de información adicional,

aunque es conocido que las *features* basadas en *GLMC* requieren un mayor esfuerzo computacional.

Resumiendo, los mejores resultados en términos de *PA*, *UA* y *KIA_{Sombras}* se alcanzaron mediante las estrategias *Textura* o *Todas*, llegando a alcanzar una precisión de alrededor del 90% (*PA* y *UA*) para GE-1 y valores ligeramente inferiores para WV-2. En este caso, los peores resultados fueron obtenidos para WV-2 cuando se empleó la estrategia *Básica 2*.

Tabla VII.9. Comparación de los valores medios para la clase *Sombras* de *Producer's Accuracy (PA)*, *User's Accuracy (UA)* y *Kappa (KIA_{Sombras})* para cada set de *features* y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices diferentes indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$.

Estrategias	GE-1			WV-2		
	PA (%)	UA (%)	KIA _{Sombras}	PA (%)	UA (%)	KIA _{Sombras}
Básica 2	-	-	-	71.6 ^c	79.7 ^e	0.636 ^c
Geometría	92.7 ^a	88.9 ^{ab}	0.901 ^a	84.2 ^b	81.8 ^{cde}	0.779 ^b
Básica 1	88.6 ^c	86.4 ^c	0.846 ^c	85.1 ^b	80.9 ^{de}	0.799 ^b
Textura	89.9 ^{bc}	90.4 ^a	0.865 ^{bc}	83.7 ^b	83.0 ^{cd}	0.783 ^b
NDIs	90.3 ^{bc}	86.4 ^c	0.869 ^{bc}	84.0 ^b	82.9 ^{cd}	0.788 ^b
Elevación	88.7 ^c	89.1 ^{ab}	0.850 ^c	83.4 ^b	83.5 ^b	0.780 ^b
Elevación + NDIs	92.7 ^a	88.9 ^{ab}	0.901 ^a	89.5 ^b	85.6 ^{ab}	0.857 ^a
Todas	91.1 ^{ab}	88.7 ^b	0.881 ^{ab}	89.7 ^a	87.0 ^a	0.863 ^a

De la misma manera que para *Edificios*, la precisión de la clasificación en *Sombras* no dependió del tamaño de entrenamiento utilizado (datos no presentados). Hay que tener en cuenta que en el caso de la clase *Sombras*, el 5% de las muestras de entrenamiento supuso 24 y 22 *IOs* para GE-1 y WV2 respectivamente. Lu *et al.* (2010) emplearon al menos 15 parcelas muestrales para cada clase de entrenamiento trabajando con imágenes QuickBird.

7.4.5. Vegetación.

Con respecto a la clase denominada *Vegetación* (Tabla VII.10), los resultados globales obtenidos para GE-1 y WV-2 fueron muy heterogéneos. Sin embargo, y centrándonos principalmente en el índice $KIA_{Vegetación}$, los conjuntos de características que presentaron mejores resultados fueron los que contenían el *feature NDIs*. Cabe destacar que uno de los tres índices incluidos en el conjunto *NDIs* es el ampliamente conocido índice de vegetación de diferencia normalizada (*normalized difference vegetation Index, NDVI*). De hecho, Vinciková *et al.* (2010) reportaron que el *NDVI* es uno de los índices de vegetación más usados comúnmente en aplicaciones de teledetección. Por otra parte, Zerbe y Liew (2004) señalaron que la diferencia normalizada del índice de banda azul (*NDBI*) podría ayudar a distinguir entre distintos tipos de vegetación. Autores como Haala y Brenner (1999) demostraron que el uso de datos *LiDAR* mejora la detección de árboles en áreas urbanas, además de la de edificios. Basándonos en los datos anteriores, el vector de características *Elevación + NDIs* podría considerarse como la mejor opción para la clasificación de la clase *Vegetación*.

Tabla VII. 10. Comparación de los valores medios para la clase *Vegetación* de *Producer's Accuracy (PA)*, *User's Accuracy (UA)* y *Kappa ($KIA_{Vegetación}$)* para cada set de *features* y sensor evaluados. Los valores en la misma columna seguidos por superíndices distintos indica diferencias significativas a un nivel de significación $p < 0.05$.

Estrategias	GE-1			WV2		
	PA (%)	UA (%)	$KIA_{Vegetación}$	PA (%)	UA (%)	$KIA_{Vegetación}$
Básica 2	-	-	-	68.8 ^{abc}	68.6 ^b	0.658 ^{ab}
Geometría	71.2 ^c	83.8 ^b	0.685 ^c	64.1 ^{bc}	69.5 ^b	0.615 ^{bc}
Básica 1	54.4 ^e	63.1 ^e	0.501 ^e	54.2 ^d	63.8 ^c	0.504 ^d
Textura	63.3 ^d	71.4 ^d	0.596 ^d	63.4 ^c	71.3 ^{ab}	0.588 ^c
NDIs	72.3 ^c	79.6 ^c	0.696 ^c	66.4 ^{abc}	69.4 ^b	0.633 ^{abc}
Elevación	86.1 ^a	90.1 ^a	0.846 ^a	69.7 ^{abc}	70.9 ^{ab}	0.668 ^{ab}
Elevación + NDIs	86.7 ^a	88.8 ^a	0.853 ^a	72.0 ^a	71.7 ^{ab}	0.693 ^a
Todas	79.6 ^b	86.1 ^{ab}	0.776 ^b	70.5 ^{ab}	75.7 ^a	0.678 ^{ab}

En el caso de la clase *Vegetación*, al contrario que las clases *Edificios* y *Sombras*, la precisión de la clasificación ($KIA_{Vegetación}$) dependió significativamente del porcentaje de muestras de entrenamiento utilizado (datos no presentados). El tamaño de entrenamiento más eficiente, en términos estadísticos, fue muy similar al mostrado en la Tabla VII.7 para los valores de KIA . Esto significa que el porcentaje óptimo de entrenamiento sería de un 10 % para las imágenes de GE-1 (20 *IOs* de entrenamiento) y un 15% para WV-2 (24 *IOs* de entrenamiento).

7.4.6. Carreteras, Suelo Desnudo y Calles.

Los resultados para las tres clases restantes (*Carreteras*, *Suelo Desnudo* y *Calles*) se resumen en la Tabla VII.11 mediante los valores KIA obtenidos para cada clase. La clase *Suelo Desnudo* alcanzó valores de precisión muy pobres, con los mejores valores de PA y UA para GE-1 y WV-2 variando desde un 45.5% hasta un 53.3% respectivamente. Esto podría ser debido a la alta heterogeneidad de esta clase, que incluye suelos agrícolas, carreteras no asfaltadas, solares e incluso playas. Lo mismo puede ser aplicado a la clase *Calles*, que agrupa aceras, calles de hormigón o pistas deportivas. Se detectaron errores de clasificación entre los *Edificios* y *Calles* debido a las similitudes espectrales relacionadas con los materiales que cubren estas superficies. Sin embargo, muchos de estos errores fueron corregidos cuando se incluyó el $nDSM$ en el vector de características del proyecto de clasificación (Tabla VII.11). En cuanto a la clase *Calles*, los mejores valores de PA y UA ($PA = 59.9\%$ y $UA = 65.2\%$ para GE-1, $PA = 50\%$ y $UA = 50.7\%$ para WV-2) se lograron siempre cuando se empleó el set *Elevación + NDIs*.

Con respecto a la clase *Carreteras* (Tabla VII.11), se logró la máxima precisión en la clasificación de la imagen GE-1 cuando se usó la estrategia *NDIs*. Cabe señalar que esta estrategia incluye el índice $NDBI$, que ha sido señalado por Dinis *et al.* (2010) como un *feature* adecuado para discriminar entre suelo desnudo y carreteras en una ortoimagen de QuickBird. Por otra parte, el set de *features* llamado *Todas y*, sorprendentemente, la estrategia *Básica 2*, alcanzaron los mejores resultados de precisión en el caso de la imagen de WV-2. Los valores de PA y UA para GE-1 y WV-2 variaron entre el 52.6% y el 62.6%.

Tabla VII. 11. Comparación de los valores medios del *Kappa* por clase para las clases *Carreteras*, *Suelo Desnudo* y *Calles* en función del vector de características y sensor utilizados.

Estrategias	GE-1			WV2		
	KIACarreteras	KIASuelo	KIACalles	KIACarreteras	KIASuelo	KIACalles
Básica 2	-	-	-	0.560 ^a	0.209 ^d	0.293 ^{bc}
Geometría	0.368 ^d	0.366 ^{bc}	0.315 ^{cd}	0.422 ^{de}	0.279 ^c	0.288 ^{bc}
Básica 1	0.350 ^d	0.339 ^{bc}	0.209 ^e	0.397 ^e	0.290 ^c	0.244 ^c
Textura	0.353 ^d	0.305 ^c	0.249 ^{de}	0.453 ^{cde}	0.330 ^{bc}	0.321 ^b
NDIs	0.358 ^d	0.407 ^{ab}	0.588 ^a	0.452 ^{cde}	0.347 ^b	0.469 ^a
Elevación	0.550 ^a	0.453 ^a	0.372 ^{bc}	0.483 ^{bcd}	0.287 ^c	0.324 ^b
Elevación + NDIs	0.488 ^b	0.473 ^a	0.637 ^a	0.519 ^{bc}	0.371 ^{ab}	0.481 ^a
Todas	0.428 ^c	0.468 ^a	0.444 ^b	0.541 ^{ab}	0.407 ^a	0.438 ^a

Desde un punto de vista estadístico, nuestros resultados indican que el tamaño de entrenamiento más eficiente en el caso de WV-2 sería de alrededor de un 10% (*i.e.* 15 *IOs* correspondiente a *Suelo Desnudo* y 10 *IOs* para *Calles*). En el caso de GE-1, los mejores resultados de precisión fueron alcanzados usando 10 *IOs* de *Suelo Desnudo* (un 10 % del porcentaje de entrenamiento) y 15 *IOs* de *Calles* (un 20% del porcentaje de entrenamiento). En el caso de la clase *Carreteras* sería recomendable el empleo de un porcentaje de entrenamiento de un 10%, lo que significa 8 y 12 *IOs* en el caso de GE-1 y WV-2 respectivamente.

7.5. DISCUSIÓN.

Teniendo en cuenta las diferencias mencionadas entre las imágenes evaluadas en este Capítulo (*e.g.* diferencias entre fecha de adquisición, ángulo off-nadir, elevación solar) y la típica heterogeneidad espectral dentro de las clases objetivo en áreas urbanas, especialmente en imágenes de satélite *VHR*, la mejor precisión de la clasificación global alcanzada a partir de las ortoimágenes *PAN* y *pan-sharpened* (cuatro bandas) de GE-1, en comparación con los resultados obtenidos a partir de las ortoimágenes *PAN* y *pan-sharpened* (ocho bandas) de WV-2, no deben ser tomados como un resultado concluyente. En efecto, la constatación de

diferencias radiométricas entre ambas imágenes habilita la continuación de esta línea de trabajo con el fin de investigar si el efecto borroso detectado en el caso de la imagen de WV-2 realmente podría afectar a los resultados de precisión de la clasificación final. En este sentido, hay algunas otras causas que podrían explicar los resultados obtenidos y también deberían ser evaluadas a través de futuros trabajos. Entre otras, podrían destacarse las siguientes hipótesis:

- (i) Los diferentes ángulos off-nadir y elevaciones del sol entre las imágenes originales de WV-2 y GE-1 utilizadas en este Capítulo podrían causar diferencias importantes en cuanto al aspecto de cada una de las imágenes, principalmente en áreas cubiertas por las clases *Sombras y Edificios Blancos* (presencia del efecto fachada debido a los ángulos off-nadir elevados). Para evitar este efecto no deseado, que podría enmascarar de alguna manera los resultados comparativos de la precisión final, debería llevarse a cabo una nueva evaluación con dos imágenes de GE-1 y WV-2 con ángulos off-nadir y elevación solar similares.
- (ii) La segmentación multi-resolución fue llevada a cabo para obtener, aproximadamente, el mismo número de *IOs* para las ortoimágenes de WV-2 y GE-1. De esta manera, es muy probable que los resultados de segmentación no fuesen los óptimos en ambos casos. En este sentido, un error de sub-segmentación podría adulterar los resultados de la precisión de la clasificación final (Liu y Xia, 2010). Hay que tener en cuenta que la segmentación obtenida para WV-2 ha tenido que ajustarse, de alguna manera, con el objetivo de obtener aproximadamente el mismo número de *IOs* para cada imagen evaluada. En este sentido, la inclusión de capas temáticas de edificios y/o *nDSM* en la segmentación podría ayudar a lograr una mejor correspondencia entre las clases consideradas y los *IOs* extraídos para hacerlos espectralmente más puros. Sin embargo, es necesario recordar que el objetivo de este capítulo no estaba dirigido a la comparación de los mejores resultados posibles en un proceso *OBIA* (obviamente deberíamos contar con una segmentación óptima para producir los mejores resultados en cuanto a la cartografía final

obtenida a partir de técnicas *OBIA*), sino a comparar exclusivamente la precisión de la clasificación con respecto a las ortoimágenes *pan-sharpened VHR* de GE-1 y WV-2. Esto se ha realizado mediante la clasificación manual de dos mapas de referencia diferentes basados en *IOs*, cada uno extraído a partir de la segmentación previa de cada una de las imágenes de satélite.

- (iii) Los algoritmos de clasificación supervisada empleados en la clasificación basada en objetos, como es el caso de *NN*, no funcionan bien en un espacio multidimensional de *features* debido a problemas relacionados con la correlación de dichas (la conocida “maldición de dimensionalidad”). Recordemos que en la estrategia *Básica 1* de WV-2 se utilizaron 16 *features*, mientras que en el caso de GE-1 sólo se emplearon 8 *features* para la misma estrategia. Sin embargo, y teniendo en cuenta que no se encontraron diferencias significativas entre los resultados alcanzados para WV-2 de acuerdo con las estrategias *Básica 1* y *Básica 2* (Tabla VII.6), esta hipótesis podría considerarse como una hipótesis claramente débil. En futuros trabajos proponemos aplicar algoritmos de clasificación basados en *SVM* que han mostrado un buen rendimiento para el tratamiento de un gran número de *features* (Melgani y Bruzzone, 2004).

7.6. CONCLUSIONES.

El estudio de la precisión global de la clasificación de usos del suelo en áreas urbanas a partir de ortoimágenes *pan-sharpened* de GE-1 y WV-2 mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) en relación al sensor empleado. Las precisiones globales alcanzadas por GE-1 (cuatro bandas *MS*) fueron siempre mejores que las obtenidas por WV-2 (ocho bandas *MS*) para cada conjunto de *features* ensayado. Desglosando los resultados por clases, la precisión de la clasificación de GE-1 mejoró significativamente la precisión obtenida por WV-2 en los casos de las clases *Edificios*, *Sombras*, *Vegetación* y *Suelo Desnudo*. Sin embargo, y principalmente debido a las diferencias encontradas entre las imágenes de partida usadas para este estudio, estos resultados deberían ser contrastados mediante trabajos futuros. De hecho, las hipótesis relacionadas con los posibles efectos perturbadores debido

a la diferencia de ángulos off-nadir y elevación solar entre las imágenes originales utilizadas en este trabajo, los probables problemas de sub-segmentación, la excesiva dimensión de algunos de los vectores de características empleados y su difícil manejo mediante el clasificador *NN*, y las diferencias observadas entre la distribución radiométrica y el aspecto visual de las imágenes *PAN* y *MS* de ambos sensores (el efecto borroso en el caso de las imágenes de *WV-2*), ya han sido planteadas en el apartado anterior.

Con respecto al rendimiento de los diferentes conjuntos de características ensayados para llevar a cabo la clasificación, en el caso de las ortoimágenes de *GE-1* la mejor precisión global se obtuvo cuando se usó el set de *features Elevación + NDIs* (87.2%), mientras que en el caso de *WV-2* las mejores precisiones globales fue obtenidas mediante el uso de la estrategia *Todas* (80.7%)

Cabe destacar que la estrategia denominada *Todas* incluye los cinco índices de textura basados en *GLCM*, lo que requiere un mayor tiempo de computación para su ejecución. Por otra parte, las *features* relacionadas con índices de forma y geometría (estrategia *Geometría*) no contribuyeron a mejorar la clasificación alcanzada por el set básico de *features* espectrales (*Básica 1*). Cabe la hipótesis de que estos resultados de clasificación podrían mejorarse a partir de una optimización de las segmentaciones iniciales, es decir, definiendo mejor la geometría de los *IOs*. En el caso particular de *WV-2*, no se encontraron diferencias significativas entre los resultados obtenidos a partir de la estrategia *Básica 1* (ocho bandas *MS*) y la estrategia *Básica 2* (usando sólo las cuatro bandas *MS* equivalentes a *GE-1*).

En general, la característica más valiosa para la clasificación de edificios fue *nDSM*, como ya han demostrado muchos autores trabajando con diferentes fuentes de imágenes como *IKONOS*, *WV-2* o imágenes aéreas digitales. La inclusión en la estrategia *NDIs* de los índices *NDVI* y *NDBI* mejoró significativamente la clasificación de las clases *Vegetación* y *Carreteras*. Del mismo modo, los descriptores de textura añadieron una valiosa información para la correcta clasificación de la clase *Sombras*.

Finalmente, los resultados de la precisión de la clasificación también se vieron significativamente afectados por el número de *IOs* empleados en el entrenamiento del clasificador. Las clases principales (*Edificios*, *Sombras* y *Vegetación*) necesitaron alrededor de 20 *IOs* de entrenamiento para poder alcanzar los mejores resultados, mientras que para las clases *Carreteras*, *Suelo Desnudo* y *Calles* fueron suficientes entre 8 y 15 *IOs*. Hay que señalar que el área media de los *IOs* de las últimas tres clases era mayor que la de los tres primeros (*i.e.* mayor área promedio implica que cada *IO* se compone de más píxeles). En definitiva, y teniendo en cuenta la eficiencia del procedimiento, 20 *IOs* de entrenamiento serían suficientes para alcanzar buenas precisiones mediante una clasificación supervisada *NN* basada en objetos.

7.7. BIBLIOGRAFÍA.

Addink, E. A., De Jong, S. M., Pebesma, E. J., 2007. The Importance of Scale in Object-Based Mapping of Vegetation Parameters with Hyperspectral Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 73: 905–12.

Aguiaro, G., Poli, D., Remondino, F., 2012. Testfield Trento: Geometric Evaluation of Very High Resolution Satellite Imagery. In *Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* (Vol. XXXIX-B8), XXIIISPRS Congress, August 25–September 1, Melbourne, Australia.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013a. Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21(2013): 427-435.

Aguilar, M.A., Saldaña, M.M., Aguilar, F.J., 2013b. GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments. *International Journal of Remote Sensing*, 34(7): 2583-2606.

Albrecht, F., Lang, S., Höbling, D., 2010. Spatial Accuracy Assessment of Object Boundaries for Object-Based Image Analysis. In *Proceeding of the International*

Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. XXXVIII-4/C7), Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA 2010), June 29–July 2, Ghent, Belgium.

Awrangjeb, M., Ravanbakhsh, M., Fraser, C.S., 2010. Automatic Detection of Residential Buildings Using LIDAR Data and Multispectral Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65: 457–67.

Baatz, M. y Schäpe, M., 2000. Multiresolution Segmentation – An Optimization Approach for High Quality Multi-Scale Image Segmentation. In *Angewandte Geographische Informations-Verarbeitung XII*, edited by Strobl, J., Blaschke, T., and Griesebner, G., 12–23. Karlsruhe: Wichmann Verlag.

Baraldi, A. y Pannigiani, F., 1995. An Investigation of the Textural Characteristics Associated with Gray Level Cooccurrence Matrix Statistical Parameters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 33: 293–304.

Bhaskaran, S., Paramananda, S., Ramnarayan, M., 2010. Per-Pixel and Object-Oriented Classification Methods for Mapping Urban Features Using Ikonos Satellite Data. *Applied Geography*, 30: 650–65.

Blaschke, T., 2010. Object Based Image Analysis for Remote Sensing. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 65: 2–16.

Carleer, A.P. y Wolff, E., 2006. Urban Land Cover Multi-Level Region-Based Classification of VHR Data by Selecting Relevant Features. *International Journal of Remote Sensing*, 27: 1–51035.

Chang, C.C. y Lin, C.J., 2011. LIBSVM: A Library for Support Vector Machines. *ACM Transactions on Intelligent Systems and Technology*, 2: 1–27.

Chen, C.H. y Ho, P.G.P., 2008. Statistical Pattern Recognition in Remote Sensing. *Pattern Recognition*, 41: 2731–41.

Congalton, R.G., Oderwald, R.G., Mead, R.A., 1983. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 49: 1671–1678.

Congalton, R.G., 1991. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment*, 37: 35–46.

Congalton, R.G. y Green, K., 2009. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data. *Principles and Practices*. 2nd ed. Boca Raton, FL: CRS Press/Taylor and Francis.

Cossu, R., 1988. Segmentation by Means of Textural Analysis. *Pixel*, 1: 21–4.

Dare, P.M., 2005. Shadow Analysis in High-Resolution Satellite Imagery of Urban Areas. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 71: 169–77.

Definiens eCognition. 2009. *Definiens eCognition Developer 8 Reference Book*. München: DefiniensAG.

Dinis, J., Navarro, A., Soares, F., Santos, T., Freire, S., Fonseca, A., Afonso, N., Tenedório, J., 2010. Hierarchical Object-Based Classification of Dense Urban Areas by Integrating High Spatial Resolution Satellite Images and LiDAR Elevation Data. In *Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol.XXXVIII-4/C7)*, Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA 2010), June 29–July 2, Ghent, Belgium.

Drăguț, L., Tiede, D., Levick, S.R., 2010. ESP: A Tool to Estimate Scale Parameter for Multiresolution Image Segmentation of Remotely Sensed Data. *International Journal of Geographical Information Science*, 24: 859–71.

Foody, G.M., 1999. The Significance of Border Training Patterns in Classification by a Feedforward Neural Network Using Backpropagation Learning. *International Journal of Remote Sensing*, 20: 3549–62.

Foody, G.M. y Mathur, A., 2004. A Relative Evaluation of Multiclass Image Classification by Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1335–43.

Foody, G. M. y Mathur, A., 2006. The Use of Small Training Sets Containing Mixed Pixels for Accurate Hard Image Classification: Training on Mixed Spectral Responses for Classification by a SVM. *Remote Sensing of Environment*, 103: 179–89.

Grigillo, D. y Kosmatin Fras, M., 2011, Classification Based Building Detection from GeoEye- 1 Images. In Joint Urban Remote Sensing Event (JURSE 2011), April 11–13, Munich, Germany, edited by Stilla, U., Gamba, P., Juergens, C., Maktav, D.

Haala, N. y Brenner, C., 1999. Extraction of Buildings and Trees in Urban Environments. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54: 130–7.

Haralick, R.M., Shanmugam, K., Dinstein, I.H., 1973. Textural Features for Image Classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3: 610–21.

Hermosilla, T., Ruiz, L.A., Recio, J.A., Estornell, J., 2011. Evaluation of Automatic Building Detection Approaches Combining High Resolution Images and LiDAR Data. *Remote Sensing*, 3: 1188–210.

Hussain, E., Ural, S., Kim, K., Fu, C., Shan, J., 2011. Building Extraction and Rubble Mapping for City Port-Au-Prince Post-2010 Earthquake with GeoEye-1 Imagery and Lidar Data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 77: 1011–23.

Im, J., Jensen, J.R., Tullis, J.A., 2008. Object-Based Change Detection Using Correlation Image Analysis and Image Segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 399–423.

Lang, S., Albrecht, F., Kienberger, S., Tiede, D., 2010. Object Validity for Operational Tasks in a Policy Context. *Journal of Spatial Science*, 55: 9–22.

Liu, D. y Xia, F., 2010. Assessing Object-Based Classification: Advantages and Limitations. *Remote Sensing Letters*, 1: 187–94.

Longbotham, N., Chaapel, C., Bleiler, L., Padwick, C., Emery, W.J., Pacifici, F., 2012. Very High Resolution Multiangle Urban Classification Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50: 1155–70.

Lu, D., Hetrick, S., Moran, E., 2010. Land Cover Classification in a Complex Urban-Rural Landscape with QuickBird Imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 76: 1159–68.

Marchisio, G., Pacifici, F., Padwick, C., 2010. On the Relative Predictive Value of the New Spectral Bands in the WorldView-2 Sensor. *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*. IEEE International, July, Honolulu, HI, 2723–6.

Marpu, P. R., Neubert, M., Herold, H., Niemeyer, I., 2010. Enhanced Evaluation of Image Segmentation Results. *Journal of Spatial Science*, 55: 55–68.

Marshall, V., Lewis, M., Ostendorf, B., 2012. Do Additional Bands (Coastal, Nir-2, Red-Edge and Yellow) in WorldView-2 Multispectral Imagery Improve Discrimination of an Invasive Tussock, Buffel Grass (*Cenchrus ciliaris*)? In *Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (Vol. XXXIX-B8)*, XXII ISPRS Congress, August 25–September 1, Melbourne, Australia.

Mather, P. M., 2004. *Computer Processing of Remotely-Sensed Images*. 3rd ed. Chichester: Wiley.

Mathieu, R., Aryal, J., Chong, A. K., 2007. Object-Based Classification of Ikonos Imagery for Mapping Large-Scale Vegetation Communities in Urban Areas. *Sensors*, 7: 2860–80.

Melgani, F. y Bruzzone, L., 2004. Classification of Hyperspectral Remote Sensing Images with Support Vector Machines. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42: 1778–90.

Myint, S. W., Gober, P., Brazel, A., Grossman-Clarke, S., Weng, Q., 2011. Per-Pixel vs. Object-Based Classification of Urban Land Cover Extraction Using High Spatial Resolution Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 115: 1145–61.

Piper, J., 1992. Variability and Bias in Experimentally Measured Classifier Error Rates. *Pattern Recognition Letters*, 13: 685–92.

Platt, R. V. y Rapoza, L., 2008. An Evaluation of an Object-Oriented Paradigm for Land Use/Land Cover Classification. *The Professional Geographer*, 60: 87–100.

Pu, R., Landry, S., Yu, Q., 2011. Object-Based Urban Detailed Land Cover Classification with High Spatial Resolution IKONOS Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 32: 3285–308.

Sawaya, K., Olmanson, L., Holden, G., Sieracki, J., Heinert, N., Bauer, M., 2003. Extending Satellite Remote Sensing to Local Scales: Land and Water Resource Management Using High Resolution Imagery. *Remote Sensing of Environment*, 88: 143–55.

Shackelford, A.K. y Davis, C.H., 2003. A Combined Fuzzy Pixel-Based and Object-Based Approach for Classification of High-Resolution Multispectral Data over Urban Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 2167–89.

Snedecor, G.W. y Cochran, W.G., 1980. *Statistical Methods*. 7th ed. Ames, IA: Iowa State University Press.

Song, M., Civco, D., Hurd, J., 2005. A Competitive Pixel-Object Approach for Land Cover Classification. *International Journal of Remote Sensing*, 26: 4981–97.

Stumpf, A. y Kerle, N., 2011. Object-Oriented Mapping of Landslides Using Random Forests. *Remote Sensing of Environment*, 115: 2564–77.

Su, W., Li, J., Chen, Y., Liu, Z., Zhang, J., Low, T. M., Inbaraj, S., Siti, A. M. H., 2008. Textural and Local Spatial Statistics for the Object-Oriented Classification of Urban Areas Using High Resolution Imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 3105–17.

Tasdemir, K. y Reis, S., 2011. Land Cover Identification for Finding Hazelnut Fields Using WorldView-2 Imagery. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, IEEE International, July, Vancouver, BC, 158–61.

Tian, J. y Chen, D. M., 2007. Optimization in Multi-Scale Segmentation of High-Resolution Satellite Images for Artificial Feature Recognition. *International Journal of Remote Sensing*, 28: 4625–44.

Treitz, P. y Howarth, P. J., 2000. High Spatial Resolution Remote Sensing Data for Forest Ecosystem Classification: An Examination of Spatial Scale. *Remote Sensing of Environment*, 72: 268–89.

Tsai, F. y Philpot, W. D., 2002. A Derivative-Aided Hyperspectral Image Analysis System for Land Cover Classification. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40: 416–25.

Turker, M. y San, K., 2010. Building Detection from Pan-Sharpended Ikonos Imagery Through Support Vector Machines Classification. *Proceeding of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science* (Vol. XXXVIII), Part 8, Kyoto, Japan, 841–6.

Vinciková, H., Hais, M., Brom, J., Procházka, J., Pecharová, E., 2010. Use of Remote Sensing Methods in Studying Agricultural Landscapes – A Review. *Journal of Landscape Studies*, 3: 53–63.

Yuan, F., 2008. Land-Cover Change and Environmental Impact Analysis in the Greater Mankato Area of Minnesota Using Remote Sensing and GIS Modeling. *International Journal of Remote Sensing*, 29: 1169–84.

Zerbe, L. M. y Liew, S. C., 2004. Reevaluating the Traditional Maximum NDVI Compositing Methodology: The Normalized Difference Blue Index. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 2004 IEEE International, September 20–24, Anchorage, Alaska, USA, 2401–4.

Zhou, X., Jancsó, T., Chen, C., y Vero^oné, M.W., 2012. Urban Land Cover Mapping Based on Object Oriented Classification Using WorldView 2 Satellite Remote Sensing Images. *International Scientific Conference on Sustainable Development and Ecological Footprint*, March 26–27, Sopron, Hungary, 1–10.

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES GENERALES.

8.1. CONCLUSIONES GENERALES.

Este apartado está dedicado a presentar las conclusiones generales derivadas del trabajo de investigación realizado, así como las líneas de investigación futuras que se pueden plantear a partir del mismo. Como apuntaremos más adelante, algunas de ellas están siendo abordadas en este momento por nuestro Grupo de Investigación y otras se plantearán en futuros Proyectos de Investigación. Hasta el momento, y en cada uno de los diferentes capítulos desarrollados a lo largo de esta Tesis, se han presentado las conclusiones más relevantes de acuerdo con los objetivos descritos en el Capítulo 2. A continuación se presentan las conclusiones generales que intentan destacar los resultados más importantes y recapitular sobre el conocimiento adquirido con motivo de la finalización de esta Tesis. No es necesario indicar que, en el ámbito de la investigación, las conclusiones siempre han de entenderse como un punto y seguido, nunca como un punto y final.

Uno de los puntos fuertes de este trabajo radica en que a lo largo del mismo se han testado, de forma exhaustiva y exactamente en las mismas condiciones operacionales, las capacidades para la generación de diferentes productos georreferenciados a partir de imágenes comerciales de los dos satélites *VHR* más innovadores que actualmente orbitan sobre la superficie terrestre (GeoEye-1 y WorldView-2). El hecho de que todos los ensayos hayan sido llevados a cabo sobre la misma área de estudio, usando los mismos datos auxiliares (*i.e.* *GCPs* y *DEMs*) y mediante un diseño experimental riguroso, cosa que no es demasiado habitual en este campo, hace que los resultados derivados de este trabajo sean perfectamente comparables. En este sentido, se debe subrayar el esfuerzo realizado para implementar un soporte estadístico apropiado que sustente la fiabilidad de los resultados y conclusiones obtenidas. Hablando de fiabilidad, o de su equivalente anglosajón *Reliability*, todas las estimaciones relativas a la precisión de los

diferentes productos generados (*i.e.* ortoimágenes, *DSMs* y mapas de usos de suelo) han sido realizadas sobre una información de referencia o *Ground Truth* con un importante número de observaciones, lo que ha permitido llevar a cabo repeticiones experimentales mediante muestreo aleatorio para dotar de significación estadística (normalmente $p < 0.05$) a los resultados obtenidos. Por otra parte, el uso de poblaciones de residuos de tamaño elevado contribuyó a disminuir enormemente la incertidumbre inherente a este tipo de estimaciones y, por tanto, robustecer las conclusiones obtenidas.

Dicho esto, sin duda el resultado más interesante, por su novedad y por su repercusión directa en la generación de algunos de los productos derivados que se suelen obtener a partir de imágenes de satélite *VHR*, fue la constatación de diferencias radiométricas entra las imágenes de los dos satélites estudiados. El estudio radiométrico llevado a cabo sobre imágenes Geo de GeoEye-1 (GE-1) y ORS2A de WorldView-2 (WV-2) demostró una mayor compresión de los histogramas, tanto en modo *PAN* como en *MS*, para las imágenes procedentes de WV-2. Esta mayor compresión de los valores digitales de las imágenes de WV-2 se manifestó en una visualización menos nítida de las mismas (*i.e.* imágenes más borrosas) que las imágenes procedentes de GE-1. Este hecho, que no ha sido reportado hasta el momento por ningún otro investigador, ha probado tener una influencia muy importante a la hora de la extracción de *DSMs* y la clasificación automática de usos de suelo como se comentará posteriormente. Aunque estas diferencias radiométricas podrían ser debidas únicamente a las condiciones atmosféricas existentes en el momento de la adquisición de cada una de las imágenes empleadas, nos inclinamos a pensar que la principal causa de estos resultados son las características propias de cada sensor. Esta es una línea de investigación muy interesante que ya ha sido planteada a la comunidad científica de la disciplina *Remote Sensing* mediante la publicación de varios trabajos internacionales de impacto.

En lo referente a los productos georreferenciados que pueden ser obtenidos a partir de imágenes de satélites *VHR*, sin duda las ortoimágenes podrían ser catalogadas como el producto estrella. Numerosas recomendaciones en cuanto a la producción de ortoimágenes de calidad a partir de imágenes *VHR* han sido ya

presentadas en capítulos anteriores en base a los trabajos realizados sobre el apartado de orientación de sensor y el proceso de ortorrectificación. En este apartado, y a modo de síntesis, nos gustaría destacar que el modelo de sensor que presentó los mejores resultados de precisión para imágenes *PAN* y *MS*, tanto en el caso de GE-1 como de WV-2, fue el basado en funciones racionales refinadas mediante una simple traslación en el espacio imagen (modelo *RPC0*). Hay que tener en cuenta que recientemente han aparecido nuevos métodos de triangulación de imágenes de satélites *VHR* (*e.g.* modelo físico *SISAR* desarrollado por el Área de Geodesia y Geomática de la Universidad de Roma, o el modelo híbrido propuesto por Toutin) que obviamente no han podido ser testados a lo largo de esta Tesis. Sin embargo, la simplicidad del modelo *RPC0* y los consistentes y precisos resultados publicados nos hacen señalarlo como el método de orientación del sensor de referencia, recomendándose su uso a partir de la disponibilidad de al menos 4 (preferiblemente 7) *GCPs*. Un resultado muy interesante fue la comprobación de que las precisiones obtenidas en la orientación del sensor para las imágenes *PAN* ORS2A de WV-2 fueron significativamente mejores que las obtenidas a partir de las imágenes *PAN* Básicas de WV-2. Sin embargo, para las imágenes *MS* de WV-2, donde el *GSD* se eleva a 2 m y el error de marcado de puntos en el espacio imagen es muy importante, el formato de las mismas no influyó en la precisión final obtenida.

Los resultados obtenidos en el proceso de ortorrectificación a partir de imágenes *PAN*, tanto en formato Geo de GE-1 como ORS2A de WV-2 (extrapolables al caso de ortoimágenes *pan-sharpened*), demostraron que se pueden obtener ortofotos con precisión planimétrica sub-píxel mediante imágenes de satélite con ángulos off-nadir inferiores a 20° siempre que empleemos un *DEM* de alta precisión (*e.g.* *DEM LiDAR*). Los valores de $RMSE_{2D}$ se incrementaron entre 0.1 y 0.2 m cuando fue empleado un *DEM* menos preciso (*e.g.* *DEM* de la Junta de Andalucía). Los $RMSE_{2D}$ de las ortoimágenes resultaron excesivos cuando se usaron imágenes con ángulos off-nadir mayores de 20° y el *DEM* menos preciso. Es importante reseñar que estos resultados fueron obtenidos en un área costera muy reducida y con un relieve muy suave. Probablemente la influencia del *DEM* y del ángulo off-nadir hubiese sido más importante en zonas con un relieve más abrupto y en una

zona más extensa. En el caso de imágenes *MS*, el alto error en el marcado de los *GCPs* e *ICPs* en el espacio imagen, propiciado por un elevado tamaño de píxel (*GSD* de 2 m), hizo que los efectos de fuentes de variación o factores como el ángulo off-nadir o la precisión del *DEM* empleado no afectaran significativamente ($p < 0.05$) a los valores de precisión planimétrica obtenidos. Tanto para el modo *PAN* como *MS*, las ortofotos generadas a partir del producto Geo de GE-1 resultaron, ligera pero significativamente, más precisas que las obtenidas a partir de imágenes de WV-2. Además, las características radiométricas comentadas anteriormente hicieron que las ortofotos generadas a partir de WV-2 resultasen menos nítidas que las generadas a partir de GE-1, especialmente en el caso de las ortoimágenes *PAN*.

A lo largo de esta Tesis, la capacidad de extracción de *DSMs* a partir de estéreo pares formados por dos imágenes *PAN* de satélites *VHR* (*along-track*) ha quedado demostrada. Como aspecto más novedoso, se ha investigado con éxito la posibilidad de generar *DSMs* a partir de estéreo pares mixtos, formados por imágenes tomadas desde distintas órbitas, en distintos días e incluso, por distintos sensores. En este caso, la diferencia temporal entre la adquisición de la imágenes que conforman dichos estéreo pares fue el factor más influyente en la calidad de los *DSMs* derivados, siendo la completitud en zonas rurales y agrícolas, el aspecto más negativamente afectado por esta causa. La precisión vertical del *DSM* aumentó a medida que se incrementó el ángulo de convergencia o la relación B/H. Sin embargo, ángulos de convergencia mayores de 31° provocaron una bajada drástica de la completitud en áreas urbanas, mientras ángulos de convergencia inferiores a 18° provocaron una debilidad de la geometría del estéreo par que hizo que el ajuste de bloque se resintiese, mostrando un incremento de los errores sistemáticos y disminución de las precisiones verticales obtenidas. En cualquier caso, y cuando el objetivo es obtener un *DSM* lo más preciso posible, se recomienda el empleo de estéreo pares puros de imágenes de satélite *VHR* tomados *ad hoc*, a lo largo de la misma órbita, en el mismo momento y, por supuesto, por el mismo sensor. Aunque las diferencias encontradas entre los *DSMs* extraídos a partir de estéreo pares puros de GE-1 y WV-2 fueron pequeñas, es importante destacar que, mientras las mejores precisiones verticales se obtuvieron a partir del estéreo par puro de GE-1, los mejores ratios de completitud fueron generados por el estéreo par puro de WV-2. Sin duda, la menor nitidez de las imágenes *PAN* de WV-2 contribuyó a aumentar

el ratio de éxito (coeficiente de correlación mayor de 0.5) del proceso de correlación automático realizado en *OrthoEngine* mediante un algoritmo basado en la búsqueda de áreas homólogas (*area-based image matching*), a costa de obtener puntos con una menor precisión vertical. De todas formas, y aunque llegaron a lograrse precisiones verticales sub-píxel en los *DSMs* generados a partir tanto de imágenes de GE-1 como de WV-2, la calidad obtenida en zonas urbanas resulta todavía manifiestamente mejorable. De hecho, los mayores esfuerzos de investigación en este aspecto se están centrando en encontrar nuevos algoritmos de correlación (*e.g. Semiglobal Matching*) o en la mejora en la visualización de ejes de edificios mediante filtros de imagen previos al proceso de *matching* (*e.g.* la nueva versión de *OrthoEngine*, incluida en Geomatica 2013, implementa un filtro de Wallis para ese fin).

En el último apartado de esta Tesis se comparó la capacidad de ambos sensores para producir mapas de usos del suelo mediante clasificación supervisada basada en técnicas *OBIA* (análisis de imagen basada en objetos), empleando como fuente de información básica tanto ortoimágenes *pan-sharpened* como *PAN* de los dos satélites *VHR* testados. Pese a que la riqueza espectral de WV-2 (8 bandas) era superior a la de GE-1 (4 bandas), la precisión de la clasificación realizada a partir de ortoimágenes de GE-1 resultó ser significativamente mejor en áreas urbanas que la obtenida en el caso de WV-2. Estos resultados, en principio inesperados, pudieron estar relacionados con (i) las diferencias radiométricas y el aspecto visual de las ortoimágenes empleadas para este estudio, (ii) la notable diferencia entre los ángulos off-nadir y de elevación solar de las imágenes utilizadas, (iii) posibles problemas de sub-segmentación y/o, (iii) a la excesiva dimensión de algunos de los vectores de características empleados y su consabido difícil manejo por parte del clasificador *Nearest Neighbor*. Después de los últimos trabajos realizados por nuestro Grupo, aún a falta de confirmar y publicar, todo apunta a que, de nuevo, las diferencias radiométricas encontradas entre las imágenes de GE-1 y WV-2, que se plasman en unas diferencias importantes en la nitidez o contraste de las mismas, podrían ser la causa principal de estos resultados.

Finalmente, y en cuanto a las futuras líneas de investigación a abordar por los investigadores que trabajamos en el campo de las imágenes ópticas comerciales de satélites *VHR*, podríamos destacar las siguientes:

- Trabajos relativos a la mejora de la precisión de la fase de triangulación, no solo mediante la creación de nuevos modelos de sensor, sino a través de la mejora potencial de la marcación de puntos en el espacio imagen mediante un pre-marcado de los puntos de control y comprobación en campo anterior a la adquisición de la imagen. Esto sería especialmente interesante en el caso de imágenes *MS*.
- En el apartado de extracción de *DSMs*, sin duda las líneas anteriormente apuntadas sobre la aplicación de nuevos algoritmos de correlación y aplicación de filtros previos a los procesos de *matching* podrían incidir en una generación de modelos de elevaciones más completos y precisos, especialmente en zonas con pendientes muy cambiantes y en áreas urbanas.
- En el caso de la producción de mapas temáticos mediante la aplicación de la clasificación supervisada *OBIA*, sería interesante comparar la capacidad de ortoimágenes *pan-sharpened*, *PAN* y *MS* de *GE-1* y *WV-2* para extraer mapas de usos de suelo en zonas diferentes a las urbanas (*e.g.* zonas rurales, invernaderos, zonas impermeables, *etc.*), usando nuevos clasificadores (*e.g.* *Support Vector Machine*, *SVM*) y partiendo de una segmentación óptima. Estos nuevos trabajos podrían reforzar la hipótesis de la gran influencia sobre los procesos de clasificación que parece tener el mayor agrupamiento del histograma de valores digitales en el caso de imágenes de *WV-2*.
- Por otra parte, el área mediterránea acoge una de las mayores concentraciones de cultivos protegidos del mundo, con más de 400.000 ha, siendo la segunda zona mundial en importancia tras el área asiática. Este sistema productivo está teniendo un gran desarrollo también en el norte de África, donde cuentan con más de 10.000 ha, principalmente dedicadas al cultivo de tomate. En este sentido, la mayor apertura del mercado de la Unión Europea a las importaciones de Marruecos, propiciada por el nuevo acuerdo agrícola junto con el mal funcionamiento

de los controles en frontera, están afectando de manera importante a la competitividad del tomate producido en España. De hecho, existen sospechas de fraude por parte de los productores marroquíes en el sistema de cuotas y de precios de entrada, por lo que se exige a la Comisión Europea mejores sistemas de control que eviten este tipo de actuaciones fraudulentas. Según lo expuesto anteriormente y teniendo presentes los resultados de esta Tesis, sería interesante desarrollar una metodología remota que automatice, manteniendo un alto nivel de precisión, la extracción de la información espacial relativa a invernaderos, llegando a la posibilidad de detectar incluso el cultivo que albergan en su interior. La propuesta sería emplear las ortoimágenes y los *DSMs* extraídos a partir de estéreo pares de imágenes de satélite *VHR* como fuente de información a analizar mediante técnicas *OBIA* para la clasificación remota de invernaderos y de los diferentes cultivos bajo plástico.

MERITOS RELACIONADOS CON EL TEMA DE LA TESIS

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS INTERNACIONALES.

- **Título:** Geopositioning Accuracy Assessment of GeoEye-1 Panchromatic and Multispectral Imagery
Revista: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing
Año: 2012
Volumen: 78
Número: 3
Página inicial: 247
Página final: 257
Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Aguilar Torres, Fernando José; Saldaña Díaz, María Del Mar; Fernández Luque, Ismael.

- **Título:** GeoEye-1 and WorldView-2 pan-sharpened imagery for object-based classification in urban environments
Revista: International Journal of Remote Sensing
Año: 2013
Volumen: 34
Número: 7
Página inicial: 2583
Página final: 2606
Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Saldaña Díaz, María Del Mar; Aguilar Torres, Fernando José.

- **Título:** Assessing geometric accuracy of the orthorectification process from GeoEye-1 and WorldView-2 panchromatic images
Revista: International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation (SCI)
Año: 2013

Volumen: 21

Página inicial: 427

Página final: 435

Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Saldaña Díaz, María Del Mar;
Aguilar Torres, Fernando José.

- **Título:** Generation and Quality Assessment of Stereo-Extracted DSM from GeoEye-1 and WorldView-2 Imagery.

Revista: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.

Año: 2013. *In press*

Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Saldaña Díaz, María Del Mar;
Aguilar Torres, Fernando José

APORTACIONES A CONGRESOS.

- **Título de la aportación:** Optimizing object-based classification in urban environments using very high resolution Geoeeye-1 imagery

Nombre del congreso: XXII International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress

Tipo de evento: Comunicación en congreso

Ámbito: Internacional

Año: 2012 - 2012

Lugar: MELBOURNE (AUSTRALIA)

Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Vicente, Rubén; Aguilar Torres, Fernando José; Fernández, Antonio; Saldaña Díaz, María Del Mar

- **Título de la aportación:** DSM extraction and evaluation from Geoeeye-1 stereo imagery

Nombre del congreso: XXII International Society of Photogrammetry and Remote Sensing Congress

Tipo de evento: Comunicación en congreso

Ámbito: Internacional

Año: 2012 - 2012

Lugar: MELBOURNE (AUSTRALIA)

Autores: Saldaña Díaz, María Del Mar; Aguilar Torres, Manuel Ángel;
Aguilar Torres, Fernando José; Fernández Luque, Ismael

- **Título de la aportación:** Geometric processing of GeoEye-1 satellite imagery for coastal mapping applications

Nombre del congreso: IMPROVE 2011

Tipo de evento: Ponencia en Congreso

Ámbito: Internacional

Año: 2011

Lugar: SAN SERVULO(VENECIA)

Autores: Aguilar Torres, Manuel Ángel; Aguilar Torres, Fernando José;
Fernández Álvarez, Antonio; Fernández Luque, Ismael; Saldaña Díaz, María
Del Mar; García Lorca, Andrés Miguel; Marques Negreiros, Joao G.; Viciano
Martínez-Lange, Alfonso; González, Elena

PREMIOS Y RECONOCIMIENTOS

- **Título:** Premio al Trabajo Fin de Máster titulado "Generación de datos georreferenciados de muy alta resolución a partir de imágenes de GeoEye-1"

Fecha concesión: 23/09/2011

Entidad: UNIVERSIDAD DE ALMERÍA

Cantidad concedida: 500 (publicación)

Rol: Concesión

Ámbito: Autonómica

GLOSARIO

Banda espectral o canal espectral: Cada uno de los intervalos de longitudes de onda que es capaz de detectar un sensor.

Banda sintética: Banda espectral obtenida por medio del procesado de otras, normalmente con el fin de mejorar la representación visual de una imagen que carece, originalmente, de una banda espectral determinada.

Binario: Sistema de representación numérica con dos elementos, el 0 y el 1.

Bit: Unidad básica de información digital, puede tomar valor 0 o 1.

Bundle: Hace referencia a un paquete de dos imágenes de una misma zona, una multiespectral y otra pancromática, adquiridas simultáneamente por el mismo satélite y que se suministran de forma conjunta. Este tipo de producto es muy habitual en satélites de alta resolución que llevan sensores multiespectrales y pancromáticos como GeoEye-1, QUICKBIRD, KOMPSAT, WorldView-2, etc.

Cobertura nubosa: Se refiere a la proporción de la imagen que está ocupada por nubes. En los casos en que las nubes no son compactas y dejan entrever parte del terreno, este porcentaje no es sencillo de calcular.

Constelación: Grupo de satélites que operan de forma conjunta y coordinada. Por ejemplo, RAPIDEYE.

Corrección geométrica: Corrección de las distorsiones que se producen durante el proceso de adquisición de una imagen debidas a la rotación y curvatura de la Tierra, al ángulo de visión o a variaciones de la posición del satélite.

Corrección radiométrica: Toda modificación que altere los valores originales registrados por el sensor, con el fin de corregir los posibles efectos que producen en la imagen la atmósfera, la geometría de observación o las características físicas del propio sensor.

Datum: Conjunto de parámetros y puntos de control usados para definir con precisión la forma tridimensional de la Tierra. Cada datum se define en función de un elipsoide y por un punto en el que el elipsoide y la Tierra son tangentes.

Efemérides: Conjunto de parámetros numéricos que describen las posiciones precisas de los satélites en función del tiempo. Las mismas pueden ser transmitidas o precisas.

- Efemérides transmitidas (Broadcast Ephemeris): cada satélite transmite sus propias efemérides extrapoladas, la que repite cada 30 segundos.
- Efemérides precisas: se calculan en base a observaciones realizadas por redes de rastreo de los satélites GPS y está disponibles unos días después de la toma de datos.

Error Medio Cuadrático: Medida de dispersión de una serie de mediciones que permite valorar la amplitud de la serie con respecto a su centro geométrico. Se define como la raíz cuadrada de la composición cuadrática de la suma de los residuos partida por el número de casos menos uno, y su concepto está ligado íntimamente al de desviación típica. El error medio cuadrático es esencial en cartografía y *GIS*, puesto que nos permite valorar la bondad de multitud de ajustes; a menor error medio cuadrático, mayor precisión de los ajustes.

Escala: Relación entre las dimensiones de las entidades de un mapa y los mismos objetos geográficos que se representan en la Tierra, normalmente expresada como una fracción o una proporción.

Escena: Imagen que capta un sensor de un satélite de forma regular, con un ancho y largo determinados.

Espectro electromagnético: Es el intervalo total de longitudes de onda o frecuencias de radiación electromagnética. Abarca desde los rayos cósmicos a las ondas de radio.

Firma espectral: Curva que representa la variación de la reflectancia de un objeto en función de la longitud de onda.

Frecuencia: Número de oscilaciones por unidad de tiempo de una onda electromagnética. Es inversamente proporcional a la longitud de onda.

Georreferenciación: Es el posicionamiento en el que se define la localización de un objeto espacial en un sistema de coordenadas y datum determinado. Este proceso es utilizado frecuentemente en los sistemas de información geográfica

Grado o nivel de procesado: Cantidad de procesamiento que se aplica a una imagen desde el momento de su captura hasta que la visualizamos en nuestro ordenador. Puesto que las imágenes de todos los sensores remotos requieren un procesado similar antes de que se puedan utilizar, las empresas de distribución han establecido un conjunto de niveles de procesamiento que describen los tipos de tratamiento realizados antes de ser entregadas.

Imagen de archivo: Imagen captada por un sensor remoto en un tiempo pasado. La frontera temporal para considerar una imagen como de archivo es variable, pero suele ser de unos pocos meses. Una imagen de archivo posee un precio menor que una imagen de nueva adquisición o reciente.

Imagen estéreo o estereoscópica: Se refiere a dos imágenes de la misma área tomadas con ángulos de visión diferentes que permiten una reconstrucción tridimensional de la escena observada.

Imagen fusionada (*Pan-Sharpened*): Imagen producto de la fusión de una imagen pancromática y su equivalente multispectral por medio de una serie de algoritmos matemáticos. La imagen resultante tiene la resolución espacial de la pancromática y las bandas espectrales de la MS.

Imagen hiperespectral: Imagen captada mediante un sensor que mide la energía simultáneamente en muchas bandas espectrales, normalmente más de cien.

Imagen multispectral (*MS*): Imagen captada mediante un sensor que mide la energía simultáneamente en dos o más bandas espectrales.

Imagen pancromática (*PAN*): Imagen captada mediante un sensor que mide la energía en una amplia zona del espectro electromagnético, abarcando usualmente la parte del visible y en algunos casos también la del infrarrojo próximo.

Influencia atmosférica: Efecto que producen los gases y partículas de la atmósfera sobre la radiación que alcanza el sensor de un satélite.

Longitud de onda: Distancia entre dos máximos sucesivos de una onda electromagnética. Se suele expresar en nanómetros (nm) o micrómetros (μm).

Nadir: Punto sobre la superficie terrestre definido por la vertical de paso de un satélite.

Nivel de Confianza: Estimación estadística de un error tiene un nivel de confianza asociado con él que indica la probabilidad de que el valor verdadero (desconocido) se encuentre dentro de un rango generado al restar y sumar el error estimado al valor medido. Por ejemplo si una medida de 100,00m tiene un error estándar de 0,01m se puede asegurar con un nivel de confianza del 68% que el valor correcto se encuentra entre 99,99 y 100,01. Igualmente, con un nivel de confianza del 95 %, que el mismo es mayor o igual que 99,98 y menor o igual que 100,02.

Nivel Digital (ND): En inglés *DN (Digital Number)*, es el valor numérico asociado a cada píxel de una imagen. Cuando un sensor registra una imagen, este valor es proporcional a la cantidad de energía electromagnética que detecta.

Metadatos: Documentos que almacenan información descriptiva adicional sobre la información geográfica. Suelen incluir la fuente de los datos, su fecha de creación, formato, proyección, escala, resolución, etc.

Modelo de elevación del terreno: Conjunto de datos que representan puntos sobre la superficie del terreno cuya ubicación geográfica está definida por coordenadas "x" e "y" a las que se les agrega un valor de "z" que corresponde a la elevación.

Off-Nadir: Término que hace referencia a la capacidad de visión oblicua de un sensor más allá de la vertical de paso de un satélite.

Órbita: Trayectoria que describe un satélite en el espacio alrededor de la Tierra.

Órbita cuasi-polar: Órbita que pasa próxima a los polos permitiendo al satélite cubrir, con sus sensores, la mayor parte de la superficie terrestre.

Órbita geoestacionaria: Órbita alrededor de la Tierra donde el satélite se desplaza de oeste a este a una altura aproximada de 36.000 km y a la misma velocidad angular que la rotación de la Tierra, por lo que siempre permanece en la misma posición relativa respecto a esta.

Ortorrectificación: Proceso computacional por el que se eliminan las distorsiones de las imágenes, principalmente debidas al relieve, otorgándole las mismas cualidades que un mapa.

Periodo de revisita: Intervalo de tiempo mínimo que tarda un sensor a bordo de un satélite en adquirir dos imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie terrestre.

Píxel: Cada uno de los elementos que componen una imagen, dispuestos matricialmente en filas y columnas.

Prioridad de pedido: Opción al solicitar una imagen de satélite que permite que un pedido sea atendido antes que otros con los que pueda entrar en competencia.

Puntos de control: Puntos del terreno de coordenadas conocidas que pueden ser localizados en una imagen y que por lo tanto se pueden utilizar como apoyo en los procesos de georreferenciación y ortorrectificación de una imagen.

Quicklook: Versión simplificada a menor resolución de una imagen cuya finalidad es permitir una visualización rápida de la misma. En archivos de imágenes satelitales suelen estar disponibles para que el usuario se pueda hacer una idea del producto antes de adquirirlo.

Radiación electromagnética: Energía que se propaga en el espacio a la velocidad de la luz como una combinación de campos eléctrico y magnético.

Rango Dinámico: Descripción de una variedad de intensidad de señales o de valores en un archivo de datos. En una imagen el rango dinámico se especifica en función de los valores posibles mínimo y máximo de los píxeles.

Ráster: Formato de representación de datos espaciales ordenados según una estructura matricial de celdas o píxeles, donde cada uno de ellos viene representado por sus coordenadas horizontal (x) y vertical (y).

Reflectancia: Relación entre la cantidad de radiación reflejada por una superficie y la que incide sobre ella. Suele expresarse en % o con valores entre 0 y 1.

Resolución espacial: Es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene determinada por el tamaño que representa un píxel en la superficie terrestre.

Resolución espectral: Define el número y anchura de las bandas espectrales que puede discriminar un sensor.

Resolución radiométrica: Hace referencia a la cantidad mínima de energía que es capaz de detectar un sensor para variar el valor de un píxel en un nivel digital.

Resolución temporal: (ver periodo de revisita).

RPC (*Rational Polynomial Coefficient*): Es un modelo matemático que relaciona cada píxel de la imagen con las coordenadas sobre el terreno, basándose principalmente en la posición y ángulo de visión del satélite. Se suministra conjuntamente con las imágenes y junto a un modelo de elevación del terreno puede ser usado para ortorrectificar las imágenes de satélite.

Satélite de teledetección: Plataforma espacial en órbita alrededor de la Tierra que lleva a bordo sensores para su observación.

Satélite heliosíncrono: Aquel que describe una órbita que siempre pasa sobre el mismo punto de la superficie terrestre a la misma hora solar local.

Sensor: Instrumento que detecta radiación electromagnética y es capaz de convertirla en valores digitales para formar normalmente una imagen.

Shape: Formato vectorial de almacenamiento y representación de datos espaciales donde se guarda la localización de los elementos representados y los atributos asociados a ellos. Es un formato muy común desarrollado por la compañía ESRI.

Ventana de adquisición: Se refiere al marco temporal en el que la empresa suministradora se compromete a adquirir la imagen de satélite encargada



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA