

UNIVERSIDAD DE SALAMANCA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CARTOGRÁFICA Y DEL TERRENO



TESIS DOCTORAL

**ESTUDIO Y ANÁLISIS GEOMÉTRICO DE LA CÁMARA BARREDORA
ADS40 EN LOS PROCESOS FOTOGRAMÉTRICOS**

SARA GONZÁLEZ LÓPEZ

Ávila, 2012.

AGRADECIMIENTOS

...Y conseguí llegar a la meta, la meta de un largo y duro camino que tiene como recompensa la presente Tesis Doctoral.

Camino de subidas y bajadas, más abrupto o más llano, camino que no he recorrido sola, por lo que debo mi agradecimiento a la multitud de personas que me han acompañado y ayudado a superarlo. Y como la gratitud en silencio no sirve a nadie, dedico esta página para dar las gracias a mi familia y a Juanjo, a mis amigos y, como no, a mi director y codirector de Tesis.

Gracias a Diego y a Javier, ya que sin su ayuda, sus consejos y ánimos no habría sido posible terminar esta Tesis Doctoral. Por ello, considero esta Tesis tan mía como suya ya que han sido dos pilares imprescindibles en el desarrollo de la misma.

Gracias a mi padre y a mi madre, que de forma incondicional, han entendido mis malos momentos acompañándome día a día.

Gracias a mis amigos, a aquellos que no me han abandonado en los días nublados y han entendido lo que conllevaba este gran esfuerzo. Entre ellos, mención especial a mis compañeros y amigos del “aula del master” por su ayuda y por dejarse los ojos midiendo puntos, y a los técnicos de informática, en especial a Peri, por sus consejos y por sus gratas conversaciones durante los descansos.

Gracias a mis bailarinas, incluidas mis hermanas, que alegraron mis tardes y me empujaron a continuar por el camino.

A mi hermano, por sus charlas de fines de semana y por su humor continuo.

Y a ti Juanjo, que desde el principio hasta el día de hoy sigues dándome ánimo brindándome tu ayuda y tu tiempo.

Por ello... Gracias a todos.

RESUMEN

La reciente incorporación de los **sensores de barrido de gran formato** junto con su creciente uso en los proyectos fotogramétricos, debido al su elevado número de aplicaciones, ha fomentado el interés de la comunidad científica internacional por lograr un conocimiento profundo de este tipo de sensores.

Las herramientas de los software fotogramétricos clásicos, utilizadas para las cámaras matriciales, deben adaptarse a la nueva y totalmente diferente filosofía de las cámaras de barrido, las cuales heredan el planteamiento de los sensores de barrido de teledetección con lo que este tipo de sensores supone una convergencia entre las disciplinas de teledetección y fotogrametría.

Con el objetivo de contribuir al progreso de esta línea, esta Tesis recoge el funcionamiento de este tipo de sensores desde su calibración en laboratorio hasta la necesidad de autocalibración, así como los sistemas de coordenadas y modelos matemáticos inherentes a su funcionamiento, concretando en el funcionamiento de la segunda generación de Leica Geosystems, **ADS40 SH52**.

Por otro lado se presentan los resultados obtenidos en el **análisis geométrico** de dicha cámara para diagnosticar su rendimiento en entornos reales, resultados provenientes de los procesos de aerotriangulación y autocalibración.

Este análisis empírico se ha basado en el diseño de un campo de pruebas sobre la ciudad de Ávila, España, realizando dos vuelos a distinta altura y estableciendo una amplia red de puntos de apoyo y chequeo distribuidos homogéneamente sobre la superficie de vuelo. Estos puntos fueron medidos mediante técnicas topográficas para determinar la exactitud y fiabilidad de la cámara tras la aerotriangulación, resuelta a través de varios modelos matemáticos, y tras la autocalibración, utilizando los parámetros internos de la cámara: focal, punto principal, punto de mejor simetría y parámetros de distorsión radial.

A través de estos test empíricos se aporta coherencia y estabilidad a la metodología establecida para actuar con este tipo de cámaras a fin de obtener mejoras en los tiempos y costes de producción, obteniendo la máxima precisión, tanto interna como externa, en el ajuste de haces.

ABSTRACT

The recent development of the **large format pushbroom sensors** and its increasing role in the photogrammetric projects has opened a whole range of new applications and therefore, has fostered the international community concern to achieve a sound knowledge of these devices.

The classic software tools, implemented for the frame cameras, need to be adapted to the new and different pushbroom approach, largely inherited from the remote sensing community. Consequently, a convergence between both disciplines is growing.

With the aim of contributing to the progress of this trend, this document analyzes the working principles of these sensors, from the classical laboratory calibration approach up to the need of calibration in situ. To do so, the coordinate systems and the mathematical models are revised and specially, the second generation from Leica Geosystems, **ADS40 SH52** is thoroughly explored.

Besides this, the results from several procedures of **aerial triangulation and self calibration** to test the performance of these cameras in real environments are presented.

This empirical analysis has relied on the design and development of a field test, close to the city of Avila, with a large and evenly distributed network of control and check points and on the execution of a two height flight with a cross strip configuration. The points were measured by means of geodetic techniques and have provided the necessary framework to assess the accuracy and reliability of several ways of computing the bundle adjustment.

Aerial Triangulation was performed through a variety of functional models and the interior parameters – focal length, principal point, point of best symmetry and radial distortion parameters – were added to the best results achieved.

By means of these empirical tests a coherent and stable insight of the pros and cons of the processing methodology concerning this type of sensors is acquired and thus, the understanding of the most profitable combination of performance and accuracy is improved

INDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN	1
1.1. Evolución de la fotogrametría digital.....	1
1.1.1. Clasificación de las cámaras digitales.....	2
1.1.2. Sensores lineales de barrido	5
1.1.3. Aplicaciones del sensor barredor ADS40	7
1.2. Objetivos	9
1.3. Originalidad, coherencia y relevancia científica.....	10
1.4. Estructura de la tesis doctoral	11

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE.....	15
2.1. Acercamiento de calibración.....	15
2.1.1. Calibración de la cámara de barrido ADS40.....	22
2.2. Acercamientos a los diferentes test empíricos de aerotriangulación	27
2.2.1. ADS40 SH40. Primera generación	28
2.2.3. ADS40 SH81/82. Tercera generación.....	48
2.3. Acercamientos a los diferentes test empíricos de auto-calibración	50
2.3.1. ADS40 SH40. Primera generación	50
2.3.2. ADS40 SH51/52. Segunda generación	55
2.4. Síntesis de las precisiones externas obtenidas en los test empíricos.....	58

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CÁMARA DE BARRIDO ADS40/ADS80.....63

3.1.	Introducción	63
3.2.	Caracterización de los sensores aéreos de barrido. Sensores ADS40/80... ..	67
3.3.	Especificaciones del sistema óptico	73
3.4.	Especificaciones de la geometría lineal del sensor	77
3.5.	Especificaciones de la resolución.....	81
3.5.1.	Resolución espacial	81
3.5.2.	Resolución radiométrica.....	83
3.5.3.	Resolución espectral.....	84
3.6.	Estabilización de la plataforma	86
3.7.	Calibración geométrica de los parámetros de la cámara barredora.....	87
3.7.1.	Parámetros relativos al sistema óptico	89
3.7.2.	Parámetros relativos a la línea ccd	91
3.8.	Modelo matemático del sensor lineal.....	94
3.8.1.	Modelo funcional	94
3.8.2.	Modelo estocástico	99

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA PARA LA ORIENTACIÓN Y AUTOCALIBRACIÓN DE LA CÁMARA DE BARRIDO ADS40/80.....105

4.1.	Proyecto de vuelo. Especificaciones técnicas	105
4.1.1.	Especificaciones del sistema de referencia	106
4.1.2.	Especificaciones del vuelo fotogramétrico	108

4.1.3.	Especificaciones de la toma de datos gnss/imu.....	111
4.1.4.	Parámetros de captura del sensor	113
4.2.	Apoyo y chequeo topográfico	114
4.2.1.	Distribución y características de los puntos topográficos	114
4.2.2.	Observación de los puntos topográficos	115
4.3.	Sistemas de coordenadas. Transformaciones entre sistemas	119
4.3.1.	Sistema de coordenadas imagen	119
4.3.2.	Sistema de fotocoordenadas.....	120
4.3.3.	Sistema de coordenadas objeto	122
4.3.4.	Transformaciones entre sistemas	123
4.3.4.1.	Transformación de las coordenadas píxel a las fotocoordenadas. ...	123
4.3.4.2.	Transformación de fotocoordenadas a coordenadas píxel.	124
4.3.4.3.	Transformación de fotocoordenadas a coordenadas objeto.	126
4.3.4.4.	Transformación de coordenadas objeto a fotocoordenadas.	128
4.3.5.1.	Transformación de coordenadas píxel a coordenadas objeto.....	130
4.3.5.2.	Transformación de coordenadas objeto a coordenadas imagen.....	133
4.4.	Calibración/autocalibración del sensor lineal	137
4.4.1.	Especificaciones técnicas del vuelo de autocalibración.....	139
4.4.2.	Modelo matemático.....	142
4.5.	Orientación directa (GNSS/IMU)	145
4.6.	Pre-procesamiento.....	148
4.6.1.	Formación de la imagen L0.....	149
4.6.2.	Formación de la imagen L1.....	151
4.7.	Aerotriangulación. Ajuste de haces.....	154
4.8.	Mediciones automáticas y manuales	156
4.8.1.	Mediciones automáticas	156
4.8.2.	Mediciones manuales	159

4.9.	Control de calidad	160
4.9.1.	Control de calidad interno. Precisión interna	160
4.9.2.	Control de calidad externo. Precisión externa.....	163

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONTROL DE CALIDAD.....167

5.1.	Vuelo a dos alturas ADS40 SH52. Prescripciones técnicas.....	169
5.2.	Observación en campo: apoyo y chequeo topográfico.....	171
5.3.	Calibración inicial del sensor o calibración del fabricante	173
5.3.1.	Plano focal ADS40 SH52.....	173
5.3.2.	Desalineamiento angular imu/cámara. Boresight.....	175
5.3.3.	Excentricidad espacial gnss/cámara. Lever-arm	176
5.4.	Software y parámetros de entrada en los procesos de aerotriangulación y autocalibración	177
5.5.	Aerotriangulación de la cámara ADS40 SH52	178
5.5.1.	Aerotriangulación del vuelo bajo: GSD 10 cm	179
5.5.2.	Aerotriangulación del vuelo alto: GSD 25 cm.....	195
5.5.3.	Aerotriangulación del vuelo combinado: GSD 10 cm+GSD 25 cm	205
5.6.	Autocalibración de la cámara ADS40 SH52.....	212
5.6.1.	Autocalibración del vuelo bajo: GSD 10 cm	212
5.6.2.	Autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm	214
5.6.3.	Autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm .	216
5.7.	Análisis de los parámetros internos del sensor ADS40 SH52	217
5.7.1.	Parámetros internos. Autocalibración del vuelo bajo: GSD 10 cm..	219
5.7.2.	Parámetros internos. Autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm ..	222

5.7.3.	Parámetros internos. Autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm.....	225
5.8.	Síntesis de los resultados experimentales y del control de calidad.....	229

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS	233
6.1. Conclusiones	233
6.1.1. Aportaciones de la tesis doctoral	233
6.1.2. Conclusiones de la tesis doctoral	234
6.2. Perspectivas futuras.....	239
BIBLIOGRAFÍA.....	243
ANEXOS.....	257
ACRÓNIMOS	261

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1. Clasificación de las cámaras fotogramétricas digitales matriciales (Petrie, 2006)	4
Tabla 1.2. Clasificación de las cámaras fotogramétricas digitales de barrido (Petrie, 2006).	5
Tabla 2.1. Características del diseño de algunos sensores digitales (Cramer, 2004). 19	
Tabla 2.2. Participantes en la segunda fase del proyecto Digital Camera Calibration & Validation (Cramer, 2007).	28
Tabla 2.3. Configuración de los vuelos ADS40 sobre Vaihingen/Enz (Cramer, 2006).	29
Tabla 2.4. Síntesis de los resultados obtenidos para la ADS40 de la primera generación sobre el campo de pruebas de Vaihingen/Enz.	31
Tabla 2.5. Parámetros de las unidades inerciales APPLANIX POS/AV-510 y AEROcontrol-IIId (Scholten et al., 2003).	34
Tabla 2.6. Síntesis de los resultados obtenidos para la ADS40 de la primera generación en Cramer (2006).	35
Tabla 2.7. Resultados experimentales en Casella et al., (2007a).	37
Tabla 2.8. Resultados más favorables obtenidos para la ADS40 de la primera generación por Casella et al., (2007a).	37
Tabla 2.9. Síntesis de los resultados experimentales en Kocaman et al., (2008).	39
Tabla 2.10. Síntesis de los resultados experimentales para la primera generación de la ADS40.	42
Tabla 2.11. Resultados experimentales ADS40 SH5x en WenYuan et al., (2008). ..	45
Tabla 2.12. Sistemas de sensores volados durante el proyecto DGPF (Haala et al., 2010).	46
Tabla 2.13. Síntesis de los resultados experimentales para la segunda generación de la ADS40.	48
Tabla 2.14. Precisión teórica para la ADS80 (Leica Geosystems, 2008a).	48
Tabla 2.15. Resultados experimentales para la ADS80 (Schreiber, 2008).	49

Tabla 2.16. Resultados experimentales para la ADS80 en AT utilizando 20 PCh (Berggren, 2010).	49
Tabla 2.17. Resultados experimentales por el IFP para la ADS40 SH41 (Cramer, 2009).....	51
Tabla 2.18. Resultados experimentales en Casella et al., (2007a).	53
Tabla 2.19. Resultados experimentales en Casella y Franzini (2008)..	54
Tabla 2.20. Resultados experimentales en Xinru et al., (2010).	57
Tabla 2.21. Síntesis de las precisiones externas de las cámaras barredoras de Leica en los procesos de aerotriangulación.	59
Tabla 2.22. Síntesis de los resultados experimentales para la autocalibración de la primera y segunda generación de la ADS40.	60
Tabla 3.1. Tipos de sensores lineales según plataforma.	64
Tabla 3.2. Características técnicas del sensor ADS40 SH40.	71
Tabla 3.3. Longitudes de onda para el cabezal de la ADS40 de la primera generación.	85
Tabla 3.4. Rango de bandas espectrales para la ADS40/80, SH5x/SH9x.....	85
Tabla 4.1. Parámetros del sensor ADS40 SH52 y del sensor ADS80 SH82	113
Tabla 5.1. Fotocoordenadas teóricas del sensor nadiral de la ADS40 SH52 y sus discrepancias con respecto a sus valores calibrados.	174
Tabla 5.2. Discrepancias entre las fotocoordenadas teóricas y calibradas de la ADS40 SH52.....	175
Tabla 5.3. Desalineamiento IMU/Cámara con fecha del 27/04/2010. Donde ω , φ y χ son las rotaciones con respecto a X, Y y Z del sistema de coordenadas del IMU y $d\omega$, $d\varphi$ y $d\chi$ las desviaciones asociadas a cada uno de los valores angulares. Unidades en radianes.....	176
Tabla 5.4. Desalineamiento IMU/Cámara con fecha del 05/11/2009.....	176
Tabla 5.5. Distintas aerotriangulaciones realizadas con la ADS40 SH52 sobre los vuelos realizados en Ávila en Abril del 2010.	179
Tabla 5.6. Resultados obtenidos para el vuelo bajo con GSD de 10 cm tras la aerotriangulación.....	180

Tabla 5.7. Composición cuadrática de los discrepancias obtenidos en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Basic en el vuelo bajo.....	184
Tabla 5.8. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo y apoyo en los casos resueltos como el modelo matemático Datum en el vuelo bajo..	186
Tabla 5.9. Parámetros de traslación del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo.....	187
Tabla 5.10. Parámetros de escala del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo.....	187
Tabla 5.11. Parámetros de rotación del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo.....	188
Tabla 5.12. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo y apoyo en los casos resueltos con el modelo matemático Drift en el vuelo bajo.	190
Tabla 5.13. Errores medios cuadráticos de las discrepancias de los puntos fijos obtenidas para el vuelo bajo con GSD de 10 cm tras la aerotriangulación.....	193
Tabla 5.14. Resultados obtenidos para el vuelo alto con GSD de 25 cm tras la aerotriangulación.....	196
Tabla 5.15. Composición cuadrática de los discrepancias obtenidos en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Basic en el vuelo alto.....	199
Tabla 5.16. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos con el modelo matemático Datum en el vuelo alto.....	199
Tabla 5.17. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Drift en el vuelo alto.....	201
Tabla 5.18. Resultados de la aerotriangulación obtenidos para el vuelo combinado a dos alturas con GSD de 10+25 cm.....	205
Tabla 5.19. Errores medios cuadráticos (RMSE) para las discrepancias de las coordenadas X, Y, Z de los puntos de chequeo de las configuraciones C9, C8, C14 y C15 del vuelo combinado (GSD 10 cm + GSD 25 cm).....	208

Tabla 5.20. Errores medios cuadráticos (RMSE) para las discrepancias de las coordenadas X, Y, Z de los puntos de chequeo de las configuraciones C9, C8, C14 y C15 de todos los vuelos.....	211
Tabla 5.21. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo bajo: GSD 10cm.	213
Tabla 5.22. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo bajo: GSD 10 cm.	214
Tabla 5.23. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm.	214
Tabla 5.24. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm.	215
Tabla 5.25. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm.	216
Tabla 5.26. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm.	217
Tabla 5.27. Resumen de las distintas autocalibraciones realizadas para el análisis de los parámetros internos del sensor ADS40 SH52.	218
Tabla 5.28. Valores para la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo bajo.....	220
Tabla 5.29. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo bajo.	220
Tabla 5.30. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo bajo.	221
Tabla 5.31. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de la autocalibración. Caso resuelto con 8 puntos de apoyo, bloqueando λ y Z0 para el vuelo bajo.	222
Tabla 5.32. Valores para la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo alto.	222
Tabla 5.33. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo alto.	223
Tabla 5.34. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo alto.	224

Tabla 5.35. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de ser autocalibradas. Caso resuelto con 8 puntos de apoyo, bloqueando λ y Z_0 para el vuelo alto.....	224
Tabla 5.36. Valores para la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo combinado.....	225
Tabla 5.37. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo combinado.....	225
Tabla 5.38. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (xp, yp) en la autocalibración del vuelo en cruz combinado.....	226
Tabla 5.39. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de ser autocalibradas. Caso resuelto con el modelo Basic para el vuelo combinado.....	227
Tabla 5.40. Síntesis de los resultados experimentales en los vuelos realizados sobre Ávila.....	229
Tabla 6.1. Síntesis de las precisiones externas en procesos de aerotriangulación y autocalibración para las cámaras de barrido de Leica Geosystems hasta la fecha (2012) y los valores promedios obtenidos en el estudio experimental de esta Tesis Doctoral (ADS40_Ávila).....	236

INDICE DE FIGURAS

Fig. 3.1. Principio de adquisición de imágenes de la ADS40/80.....	70
Fig. 3.2. Sensores aéreos de Leica Geosystems (Arthur R., 2010).....	72
Fig. 3.3. Esquema de funcionamiento del objetivo telecéntrico y del convencional (Delgado J., s.a.).....	74
Fig. 3.4. Dispositivo tricroide con descomposición de la luz visible en los canales RGB.	74
Fig. 3.5. Cabezal del sensor ADS40/ADS80 (Delgado J., s.a.).....	75
Fig. 3.6. Aplicación del staggering en las líneas CCD (Schreiber, 2010).....	78
Fig. 3.7. A la izquierda esquema representativo de la adquisición de las imágenes ADS40 (Casella et al., 2007b). A la derecha, configuración del plano focal en la ADS40, primera generación.....	79
Fig. 3.8. Configuración de los planos focales en la ADS40, segunda generación.....	80
Fig. 3.9. Configuración de los planos focales en la ADS80, tercera generación.....	80
Fig. 3.10. Proyección en el terreno del tamaño del píxel y de la línea CCD para la cámara ADS40/80	82
Fig. 3.11. Respuesta espectral para la ADS40/80, SH5x/SH9x (Arthur, 2010).	86
Fig. 3.12. Rotaciones de la plataforma sobre los tres ejes cartesianos.....	86
Fig. 3.13. Efecto en las imágenes ocasionado por las rotaciones de la cámara durante el vuelo (Titarov, 2007).....	87
Fig. 3.14. Efectos de un cambio sistemático en la focal (f). H : altura de vuelo, (x_p, y_p) : punto principal.	90
Fig. 3.15. Efectos de rotación (izquierda), de escala (centro) y de curvatura (derecha) sobre un CCD lineal.	91
Fig. 3.16. Fotocoordenadas aproximadas de los tres CCDs pancromáticos sobre el plano focal.....	93
Fig. 3.17. Efecto de curvatura sobre un CCD lineal.	94
Fig. 3.18. A la izquierda definición de base corta y base larga. A la derecha reproyección de un punto para cada uno de los tres sensores pancromáticos.....	95

Fig. 3.19. Punto objeto re proyectado entre dos puntos fijos (orientation fixes).	96
Fig. 3.20. Interpolación lineal entre dos puntos fijos (K y K+1).	96
Fig. 4.1. Definición del sistema geodésico de referencia ETRS89.	107
Fig. 4.2. Longitud del recubrimiento longitudinal para imágenes de barrido, ADS40/ADS80.	110
Fig. 4.3. Cálculo del recubrimiento transversal.	110
Fig. 4.4. Imprecisiones asociadas al cómputo de la trayectoria GNSS.	112
Fig. 4.5. Ejemplo de tarjetas de puntería usadas en vuelos fotogramétricos sin detalles fácilmente identificables sobre el terreno.	115
Fig. 4.6. Sistema de coordenadas imagen para la ADS40/80.	120
Fig. 4.7. Sistema de fotocoordenadas, focal o de calibración. Coordenadas aproximadas para los CCD pancromáticos de la ADS40/80.	121
Fig. 4.8. Definición del sistema de coordenadas objeto LSR de una imagen de barrido de la ADS40.	122
Fig. 4.9. Figura esquemática de las transformaciones entre sistemas de coordenadas.	123
Fig. 4.10. Figura esquemática de la transformación entre el sistema imagen y el sistema de fotocoordenadas de la ADS40/80.	124
Fig. 4.11. Figura esquemática de la transformación entre el sistema de fotocoordenadas y el sistema imagen de la ADS40/80.	125
Fig. 4.12. Rotaciones entre los ejes de los sistemas de fotocoordenadas y el sistema objeto de la ADS40/80.	126
Fig. 4.13. Figura esquemática de la transformación entre fotocoordenadas y coordenadas objeto.	128
Fig. 4.14. Figura esquemática de las aplicaciones de las transformaciones entre sistemas de coordenadas.	130
Fig. 4.15. Proyección de la huella de la imagen sobre el MDT.	131
Fig. 4.16. Determinación de un punto sobre el rayo proyectivo.	132
Fig. 4.17. Resección espacial de un punto sobre el MDT.	133

Fig. 4.18. Calculo de posibles puntos imagen q a través de los rayos proyectivos de Q' y los parámetros de orientación para cada línea de escaneo dentro de la ventana imagen.....	136
Fig. 4.19. Calculo de posibles puntos objeto Q' a través de los rayos proyectivos de los puntos imagen q y los parámetros de orientación para cada línea de escaneo dentro de la ventana imagen.....	137
Fig. 4.20. Esquema del triple sensor: ADS40/80 + GNSS/IMU.....	137
Fig. 4.21. Vuelos en cruz para la autocalibración del sensor ADS40/80.....	140
Fig. 4.22. Representación de las correcciones debido a la rotación y desplazamiento de los CCDs lineales sobre el plano focal.....	144
Fig. 4.23. A la derecha imagen de la L1. A la izquierda la misma imagen sobre la L0 (Tempelmann et al., 2000).	150
Fig. 4.24. Esquema de la generación de imágenes L1 del sensor ADS40/80.....	151
Fig. 4.25. Orientación Relativa por el Método de la Base Fija para imágenes aéreas lineales de barrido.	152
Fig. 4.26. Remuestreo epipolar de imágenes aéreas lineales de barrido sobre el plano de la L1.....	153
Fig. 4.27. Epipolarización de imágenes aéreas lineales de barrido para la correspondencia de puntos homólogos.	158
Fig. 5.1. Aeronave de Stereocarto para la adquisición del las imagenes ADS40 SH52 (Stereocarto, 2010a).	169
Fig. 5.2. Vuelos ADS40 SH52.....	170
Fig. 5.3. Ilustración de algunas estaciones de referencia utilizadas (Stereocarto, 2010b).	171
Fig. 5.4. Distribución de los puntos de apoyo y chequeo para los vuelos ADS40 SH52.....	172
Fig. 5.5. Distribución de los 8 puntos de apoyo utilizados para el vuelo bajo, GSD de 10 cm.....	172
Fig. 5.6. Distribución de los 24 puntos de apoyo utilizados para el vuelo alto, GSD de 25 cm.....	173

Fig. 5.7. Discrepancias entre la posición teórica de cada uno de los píxeles con la posición registrada en el fichero de calibración de la ADS40 SH52.	174
Fig. 5.8. Distribución de los puntos de paso en el vuelo bajo, vuelo con GSD de 10 cm. Escala 1:5000.	181
Fig. 5.9. Calidad altimétrica. A la izquierda se muestra la interpretación clásica; a la derecha, adaptada para un sensor barredor, ADS40.....	182
Fig. 5.10. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricas (RMSEXY) de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm.	183
Fig. 5.11. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Basic.	184
Fig. 5.12. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Basic.....	185
Fig. 5.13. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum sin desalineamiento IMU/Cámara.	188
Fig. 5.14. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum con desalineamiento IMU/Cámara.	189
Fig. 5.15. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum.....	190
Fig. 5.16. A la izquierda vectores de errores de las discrepancias planimétricas (RMSEXY) de los puntos de chequeo. A la derecha, representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) de dicho chequeo en las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Drift.....	191
Fig. 5.17. A la izquierda vectores de errores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo sin introducir el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara aplicando el modelo Drift con 4 puntos de apoyo. A la derecha, mismo caso introduciendo el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara..	192

Fig. 5.18. Representación de los vectores de discrepancias planimétricas de los puntos fijos (fixes) del vuelo con GSD de 10 cm sobre la ciudad de Ávila correspondientes a las configuraciones C10, sin Drift (izquierda) y C16, con Drift (derecha).....	193
Fig. 5.19. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas (RMSEZ) de las aerotriangulaciones del vuelo bajo con GSD de 10 cm.	194
Fig. 5.20. Distribución de los puntos de paso en el vuelo alto, vuelo con GSD de 25 cm.....	197
Fig. 5.21. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricos (RMSEXY) de las aerotriangulaciones del vuelo alto con GSD de 25 cm.	198
Fig. 5.22. A la izquierda vectores de discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo. A la derecha, representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 25 cm utilizando el modelo Basic.	199
Fig. 5.23. A la izquierda, vectores de discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo bajo utilizando el modelo Datum.	200
Fig. 5.24. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 25 cm utilizando el modelo Datum.	201
Fig. 5.25. Representación de los vectores de residuos planimétricos de los puntos fijos (fixes) del vuelo alto con GSD de 25 cm sobre la ciudad de Ávila después de aerotriangular con el modelo Basic (izquierda) y modelo Drift (derecha).	202
Fig. 5.26. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas (RMSEZ) de las aerotriangulaciones del vuelo alto con GSD de 25 cm.	203
Fig. 5.27. Distribución de los puntos de paso en el vuelo combinado, vuelo con GSD de 10 cm + 25 cm.	206
Fig. 5.28. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricas (RMSEXY) de las aerotriangulaciones del vuelo combinado a dos alturas con GSD 10 cm + GSD 25 cm.	207

Fig. 5.29. A la izquierda, vectores de error de los errores medios cuadráticos planimétricos de las discrepancias de los puntos de chequeo para la configuración C15 del vuelo combinado a dos alturas. A la derecha, resultados de la configuración C17.	209
Fig. 5.30. Representación de los vectores de los residuos planimétricos del los puntos fijos (fixes) del vuelo combinado a dos alturas sobre la ciudad de Ávila después de aetrotriangular. A la izquierda la configuración C11 y a la derecha la configuración C17.	210
Fig. 5.31. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas (RMSEZ) de las aerotriangulaciones del vuelo combinado a dos alturas: GSD 10 cm + GSD 25 cm.	210
Fig. 5.32. Diferencias entre las fotocoordenadas del CCD pancromático hacia atrás (PANB14), antes y después de la autocalibración sobre el vuelo a dos alturas.	228

1 CAPÍTULO I - INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. EVOLUCIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL

La fotogrametría es habitualmente definida como el arte, ciencia y tecnología que nos permite obtener información cuantitativa fidedigna a partir de fotografías aéreas que deben cumplir con unos requisitos prefijados (Kraus, 1993). Esta información es obtenida mediante procesos de registro, medida e interpretación de las imágenes fotográficas.

Desde sus orígenes hasta la actualidad la fotogrametría ha ido de la mano de la tecnología, pasando de la fotogrametría analítica a la digital, para terminar en lo que actualmente conocemos como la era de las cámaras digitales de gran formato. Podemos remontar los orígenes de esta era al año 2000, con la entrada en escena de las cámaras de Leica Geosystems y de Intergraph/ZI. Estas cámaras fueron las primeras en poder competir con las imágenes analógicas de gran formato. Sin embargo no es hasta el año 2004 cuando se produce un salto cualitativo en la aceptación de las nuevas cámaras cuya comercialización se dispara a partir de ese año (Cramer, 2005).

Con esta nueva etapa desaparece la imagen analógica, se obtiene mayor resolución radiométrica y espectral manteniéndose niveles equivalentes en la resolución geométrica. Aparecen nuevos conceptos de cámaras y con ello nuevos conceptos de calibración, aparece el sensor múltiple y la posibilidad de automatización y de cartografía en tiempo real. Con todas estas mejoras los métodos y algoritmos de procesamiento de imágenes aéreas abren un amplio campo de investigación para los científicos debido a su relativamente nueva

geometría y al uso de los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) junto con las Unidades de Medida Inercial (IMU), GNSS/IMU, para la georreferenciación directa y rectificación de la imagen (Haala et al., 1998; Cramer et al., 2000; Mostafa et al., 2000; Tempelman et al., 2000).

Los sistemas inerciales, desarrollados durante los años cuarenta y siguientes, permitieron controlar mejor la navegación fotogramétrica pero nunca llegaron a representar más que unos datos adicionales que incorporar en el procedimiento de aerotriangulación. Esencialmente, el proceso de deriva acumulativa que afecta a estos dispositivos impide alcanzar el nivel de precisión exigible fotogramétricamente. El GNSS desarrollado a lo largo de los noventa permitió vislumbrar la posibilidad de obtener datos en vuelo que pudieran determinar la posición y la orientación de la cámara en el momento del disparo. Sin embargo, la baja frecuencia del sensor (en torno a 1 Hz) así como los errores de modelización atmosférica y de multipath unido a configuraciones deficientes de la constelación satelitaria o problemas de pérdida de la señal (sobre todo en los giros del avión entre pasada y pasada) hicieron que esta cuestión no pudiera ir más allá de una reducción del número de puntos de apoyo necesarios para acometer el proceso de aerotriangulación (Arias, 2008).

Sin embargo, desde finales de los noventa se viene desarrollando con eficacia la posibilidad de emplear conjuntamente ambos sensores de manera que se contrarresten recíprocamente sus limitaciones. Así, podemos decir que el sensor integrado GNSS/IMU permite acometer bajo ciertas condiciones la Orientación Externa Directa, poniendo en entredicho, no sólo el empleo de puntos de apoyo sino el propio proceso de aerotriangulación.

1.1.1. CLASIFICACIÓN DE LAS CÁMARAS DIGITALES

Hoy en día conviven en el mercado dos familias diferentes de sensores fotogramétricos digitales: sensores matriciales, inspirados en las cámaras analógicas, y sensores de barrido, implementados con una nueva y diferente

filosofía que hereda el planteamiento de los sensores de barrido de teledetección.

- Sensores matriciales (*frame sensor*): Cámaras cuyo sensor de captura de la imagen es cuadrado o rectangular, es decir basadas en un sensor matricial consistente, en su mayoría, en un Dispositivo de Carga Acoplada (CCD, *Charge-Coupled Device*) con un determinado número de píxeles en dirección horizontal y con el mismo o distinto número de píxeles en dirección vertical. Dentro de este tipo de sensores puede darse el caso de que para cada disparo se capture un conjunto de imágenes que posteriormente son fusionadas para generar una única imagen digital de alta resolución (múltiples cámaras). En este tipo de cámaras (Hinz et al., 2000), el sensor está formado por cuatro cámaras multiespectrales y, al menos, cuatro cámaras pancromáticas, siendo la resolución de la imagen pancromática superior a la de las imágenes multiespectrales (Gómez et al., 2010). A partir de todas estas imágenes se genera una imagen virtual con geometría cónica similar a la capturada por una cámara analógica.
- Sensores de barrido (*pushbroom sensor*): A diferencia de los sensores matriciales, los sensores de barrido realizan una captura continua de la información. Las imágenes proporcionadas por estos sensores consisten en líneas escaneadas de forma independiente en diferentes instantes de tiempo y almacenados una al lado de otra de manera que cada línea tiene sus propios parámetros de orientación externa haciéndose indispensable la medición directa de la misma. Derenyi (1970) fue el primero en señalar que se podría recoger tres o más líneas de escaneo de forma simultánea para obtener así una fuerte solución geométrica de la trayectoria de vuelo. Inicialmente este tipo de sensores se utilizaban únicamente en sistemas satelitales, hoy en día han tomado un importante lugar en aplicaciones fotogramétricas aéreas.

En relación a la clasificación de las cámaras matriciales, el tamaño del sensor es el factor más importante ya que por sí solo puede controlar la adecuación, disponibilidad y utilización de las cámaras matriciales para la fotogrametría aérea.

Por lo tanto una primera clasificación dentro de las cámaras matriciales (Tabla 1.1) es la siguiente (Petrie, 2006):

Clasificación de las cámaras matriciales	
Pequeño formato	Sistemas de cámaras simples
	Sistemas de múltiples cámaras
Medio formato	Cámaras de película modificadas
	Múltiples cámaras
Gran formato	Cámaras simples
	Múltiples cámaras

Tabla 1.1. Clasificación de las cámaras fotogramétricas digitales matriciales (Petrie, 2006)

- Cámaras de pequeño formato (*small-format cameras*): formatos hasta 16 megapíxeles.
- Cámaras de formato medio (*medium-format cameras*): formatos desde 16 megapíxeles hasta 50 megapíxeles.
- Cámaras de gran formato (*large-format cameras*): de 50 megapíxeles o superior.

Dentro de cada una de estas tres principales categorías de cámaras matriciales (Tabla 1.1), se pueden distinguir dos subcategorías: sistema de una cámara y sistemas con múltiples cámaras, tal y como se citó anteriormente. Otra distinción adicional puede hacerse entre cámaras que producen imágenes monocromáticas y cámaras que producen imágenes de color y/o falso color.

De entre las cámaras matriciales destacaremos la Ultracam de Vexcel y la cámara *Digital Mapping Camera* (DMC) de Intergraph/ZI, ya que son las cámaras matriciales, ambas de gran formato y con múltiples cámaras, más utilizadas por los usuarios civiles para propósitos cartográficos (Cramer, 2005).

Dentro de los sensores de barrido (*pushbroom sensor*) se distinguen tres grandes grupos (Tabla 1.2): monocromáticos, multiespectrales o de color y trilineales, los cuales serán explicados con más detenimiento en el capítulo III de esta Tesis Doctoral. Debido a que la *Airborne Digital Sensor* (ADS40/80) se incluye entre

las cámaras de barrido trilineales, se centra la introducción en este tipo de sensores.

Clasificación de las cámaras de barrido	
Cámaras de barrido	Monocromáticas
	Multiespectrales o de color
	Trilineales

Tabla 1.2. Clasificación de las cámaras fotogramétricas digitales de barrido (Petrie, 2006).

1.1.2. SENSORES LINEALES DE BARRIDO

En el capítulo II de esta Tesis Doctoral se hace un breve recorrido en la historia de la fabricación de este tipo de sensores, desde los primeros sensores lineales con capacidad estereoscópica montados sobre plataforma espacial hasta el más novedoso de los sistemas, la cámara barredora aerotransportada de Leica Geosystems, ADS80. Si bien, en este apartado se realiza una breve reseña de los principales sensores lineales aerotransportados comenzando con el primer sensor lineal comercial de gran formato que no es otro que la cámara ADS40.

La cámara ADS40 va montada sobre una aeronave y es desarrollada por *LH Systems* y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en 1998 (Sandau et al., 2000). Si bien, las primeras aplicaciones aéreas con sensores lineales comienzan con la Wide Angle Airborne Camera WAAC (Boerner et al., 1997), con la Digital Photogrammetric Assembly DPA (Haala et al., 1998) y con la High Resolution Stereo Camera HRSC (Wewel et al., 1999).

Posterior a la ADS40 y en el año 2000, Starlabo Corporation, desarrolla junto con el Instituto de Ciencia Industrial de la Universidad de Tokio un sistema aéreo “Three-Line-Scanner” (TLS) montado sobre helicóptero, llamado STARIMAGER (Murai y Matsumoto, 2000).

Desde este momento hasta la actualidad, han sido varios los fabricantes que se han atrevido a desarrollar cámaras lineales, tanto de medio como de gran formato. En 2004, aparece un nuevo escáner digital fotogramétrico de medio formato, el 3-DAS-1, basado en el trabajo realizado en colaboración entre

Roman&Associates y Geosystems. El 3-DAS-1 registra tres canales RGB de forma simultánea y su aplicación más relevante es la producción de ortoimágenes (Wehrli et al., 2004).

En el 2006, y en la misma colaboración entre Roman&Associates y Geosystems, se introduce una cámara oblicua lineal de medio formato denominada 3-OC. Esta cámara, junto con la 3-DAS-1, utiliza un sistema óptico para cada una de las vistas, hacia atrás, nadir y hacia delante, pero rígidamente unidos entre sí. Esto hizo necesario desarrollar un modelo fotogramétrico para tres cámaras diferentes, pero que se mueven juntas a lo largo de la trayectoria de vuelo.

Siguiendo a la 3-OC, el JAS 150 (*Jena Airborne Scanner*) es introducido en Mayo del 2006 por Jena-Optronik, en Alemania (Petrie, 2006). Cuenta con nueve CCDs, cada uno de ellos con 12000 píxeles, cuatro bandas multispectrales y cinco líneas para la captura de datos pancromáticos, una con orientación nadiral y las otras cuatro en diferentes ángulos.

A finales del 2006 Leica Geosystems anuncia la segunda generación de la cámara de barrido ADS40. Se introducen dos sensores nuevos, SH51/52, ambos físicamente más pequeños que el original sensor SH40 (primera generación). Otro cambio importante en el sensor ADS40 es el cambio de los componentes GNSS/IMU de Applanix POS/AV a un sistema propio, IPAS10 (Tempelmann y Hinsken, 2007).

Leica Geosystems además de establecer las normas con su inicial ADS40, continúa elevando el listón y en el 2008, aparece la nueva Leica ADS80, un sensor superior a cualquiera de los otros sensores aéreos de gran formato disponibles en la actualidad. La ADS80 dispone de dos nuevos sensores SH81/82 capaces de adquirir con la misma resolución datos pancromáticos, en color y en infrarrojo, obteniendo mejores resultados, mayor productividad y menores costes, Junto con el sensor se desarrolla un nuevo flujo de trabajo, Leica XPro, solución más productiva a la generación de la imagen digital. Esta nueva generación es

anunciada en el XXI Congreso de la Sociedad Internacional de la Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) de Pekín por la ya mencionada Leica Geosystems (Wagner, 2008).

1.1.3. APLICACIONES DEL SENSOR BARREDOR ADS40

Actualmente, los datos adquiridos mediante el sensor ADS40 son empleados tanto para aplicaciones cartográficas tradicionales como son la generación de Modelos Digitales del Terreno (MDT) o la obtención de ortofotografías (Fricker et al., 2002), como para aplicaciones que hasta hace no mucho estaban reservadas exclusivamente a imágenes satelitales como puede ser el cálculo del índice de vegetación, la clasificación de usos del suelo, etc. (Pérez et al., 2008). Esta versatilidad se debe a tres aspectos básicos de los sensores lineales. Por un lado, el sistema de captura de las imágenes “three-line-scanners” emplea tres sensores lineales de barrido con diferente orientación, de modo que se capturan imágenes hacia delante (forward), en el nadir (nadir) y hacia atrás (backward) al mismo tiempo. Por otro lado, gracias a la calibración radiométrica del sensor, es posible transformar los valores digitales en valores de radiancia y reflectancia. Y por último, las bandas espectrales en las que se captura la información están perfectamente delimitadas y no presentan solape entre ellas (Arthur, 2010).

Así podemos mencionar entre otras aplicaciones a Ozawa et al., (2004) quienes estudian el efecto de las masas de aire en áreas urbanas de Japón (*heat-island*) analizadas hasta el momento con la información registrada desde sensores situados en NOAA, Landsat o Spot. Los autores emplean valores de reflectancia calculados a partir de las bandas RGB y NIR del sensor ADS40 y lo comparan con la temperatura superficial de los objetos obtenida por el sensor hiperespectral TABI-320 (*Thermal Airborne Broadband Image*).

Bühler et al., (2007) presentan en su estudio diferentes aplicaciones en agricultura para el sensor ADS40. En dicho estudio se indica que dichas aplicaciones no serían posibles con imágenes de satélites y pueden realizarse con

la ADS40 gracias a la alta resolución espacial de sus imágenes. Algunas de las aplicaciones que citan son entre otras detectar cambios a pequeña escala en los índices de vegetación y diferenciar niveles de actividad dentro de un mismo cultivo.

Emmolo et al., (2008) aplican metodologías de clasificación mediante la segmentación a través de la lógica difusa a ortoimágenes generadas a partir de imágenes capturadas por diferentes sensores: imágenes obtenidas por cámaras analógicas; imágenes Quickbird; y, por último, imágenes ADS40. Los algoritmos empleados para la segmentación y la jerarquía de clases han sido diferentes para cada imagen con objeto de adaptarlos a su resolución espacial. Para analizar los resultados obtenidos en cada una de las clasificaciones los autores han empleado matrices de confusión. Siendo la clasificación realizada a partir de imágenes ADS40 la que ofrece los mejores resultados.

Gómez et al., (2010) presentan las ventajas de la utilización de la ADS40/80 en aplicaciones ambientales, en particular presentan diferentes metodologías para la detección de especies invasoras vegetales a partir de imágenes aéreas adquiridas mediante el sensor lineal ADS40, ya que la clasificación de las ortoimágenes puede ayudar a minimizar la necesidad de las inspecciones en campo, en las labores de localización de especies vegetales invasoras, identificando en gabinete las zonas a las que se han de enviar a los equipos de trabajo y optimizando de este modo los recursos disponibles.

Dada esta serie de aplicaciones y ventajas de la ADS40, se centra la presente Tesis Doctoral en el estudio de un método de trabajo para conseguir el mayor rendimiento de dicha cámara y en el estudio del análisis geométrico en los procesos fotogramétricos. A continuación se pasará a describir el marco y los objetivos perseguidos en este estudio.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo general de la presente Tesis Doctoral es el estudio y análisis geométrico de la cámara barredora de Leica Geosystems, ADS40, en los procesos fotogramétricos, en especial en los procesos de aerotriangulación y autocalibración, generando un método óptimo de procesamiento y actuación para conseguir explotar al máximo sus prestaciones, desde la planificación del propio vuelo hasta el control de los resultados obtenidos en los procesos de aerotriangulación y autocalibración. Es decir, con esta Tesis Doctoral se pretende diagnosticar y validar el comportamiento geométrico de la cámara barredora ADS40 de cara a la óptima obtención de orientaciones y de productos cartográficos derivados (MDT y ortofoto), dado que en la actualidad estos productos representan una gran utilidad, no sólo a nivel nacional sino también a nivel internacional. Cada vez es mayor el incremento de la demanda de productos cartográficos, y es la calidad y el tratamiento de los datos lo que determinará, en mayor medida, la precisión y exactitud de los resultados.

Podríamos por tanto enunciar como **objetivo general** de esta Tesis Doctoral el siguiente: analizar empíricamente el rendimiento geométrico de la cámara barredora ADS40.

Este objetivo general puede concretarse en los siguientes **objetivos específicos**:

- Calibración geométrica del sensor. Calibración de los parámetros geométricos de la cámara.
- Comparación de los rendimientos y precisiones de los diversos métodos fotogramétricos considerando determinando el mejor protocolo de actuación.

Los resultados y análisis derivados de estos objetivos se derivan del interés del *European Spatial Data Research* (EuroSDR) en mejorar los métodos de procesamiento de datos aerotransportados.

1.3. ORIGINALIDAD, COHERENCIA Y RELEVANCIA CIENTÍFICA

La reciente incorporación del sensor ADS40 en grandes proyectos fotogramétricos como el Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) en España ha motivado, en los diferentes agentes que intervienen, el interés en profundizar en el conocimiento de su funcionamiento.

La ADS40 supone una convergencia entre las disciplinas de teledetección y fotogrametría ya que desde el punto de vista radiométrico, la ADS40 es un sensor multiespectral calibrado que permite transformar en magnitudes físicas los valores de los niveles digitales y desde el punto de vista geométrico, la imagen se captura por un sistema de barrido más próximo a la forma de captura en teledetección. Debido a esto aumenta el número de aplicaciones para este tipo de sensor y con ello, el interés por su funcionamiento.

La mayoría de los software fotogramétricos, algunos muy recientemente, incorporan el manejo de vuelos realizados con este sensor, si bien no todos permiten resolver la aerotriangulación, y muchos menos permiten procesos de autocalibración.

En esta Tesis Doctoral se presenta una descripción de los modelos matemáticos del sensor empleados para acometer los procesos de aerotriangulación y autocalibración estableciendo una metodología de actuación a fin de obtener una mejora en los tiempos y costes de producción. Se avanzará en la autocalibración como técnica alternativa en la mejora de resultados, analizando los parámetros geométricos internos de la cámara barredora, hasta ahora opacos al operario.

En base a esta metodología se determinará el grado de precisión interna y precisión externa (exactitud) obtenido en función de los datos de entrada, lo que permitirá en trabajos posteriores elegir los datos de entrada óptimos en función de la precisión exigida.

1.4. ESTRUCTURA DE LA TESIS DOCTORAL

Esta Tesis Doctoral consta de seis capítulos. Después de esta introducción, el capítulo II se centra en el estado del arte tanto científico como tecnológico. En el estado del arte científico se realizará un acercamiento a la calibración, en concreto a la calibración del sensor lineal barredor de Leica, ADS40/80, y un acercamiento a los diferentes test empíricos de aerotriangulación y autocalibración realizados con datos de las distintas generaciones de la ADS40/80. En el estado del arte tecnológico, se reseñará la evolución de los distintos sensores de barrido mencionados en esta introducción, desde los satélites, sensores montados en plataforma espacial, hasta las cámaras aéreas que heredan el principio de estos sensores.

El capítulo III centra la atención en la caracterización de las cámaras ADS40 y ADS80. Se explicará el principio de operación de las cámaras aéreas de barrido y se enumerarán los aspectos más generales de este tipo de cámaras: las especificaciones ópticas y las especificaciones de la geometría lineal del sensor tanto para la ADS40 como para la ADS80, así como la resolución geométrica, radiométrica y espectral. A continuación se explicarán brevemente los errores sistemáticos de la cámara, errores que a su vez pueden ser clasificados como errores correspondientes a las líneas CCD y como errores correspondientes a las distorsiones del objetivo.

Dado que el modelo matemático para procesar este tipo de imágenes es la condición de colinealidad adaptada a las circunstancias del carácter lineal de la información, se dedicará un apartado dentro del capítulo III para la explicación del modelo funcional y estocástico de la ADS40.

Los capítulos IV y V constituyen el núcleo central de la Tesis Doctoral. En el capítulo IV se determinan las condiciones técnicas mínimas que debe regir cualquier proyecto fotogramétrico llevado a cabo con la cámara de barrido ADS40. Del mismo modo, se definen los métodos y técnicas a utilizar

(Orientación Directa, aerotriangulación y autocalibración) con el fin de obtener las precisiones (precisión interna y externa) requeridas en dichos proyectos fotogramétricos. Previamente, se describen en detalle los tres sistemas cartesianos que intervienen en el procesamiento de las imágenes de la ADS40, así como las transformaciones entre los mismos.

En el capítulo V se dan a conocer los resultados experimentales y el análisis de calidad sobre los dos vuelos realizados para los distintos tests empíricos del estudio dando coherencia y estabilidad al método seguido para la aerotriangulación y autocalibración. Como se cita en dicho capítulo se realizan dos vuelos a distinta altura sobre la ciudad de Ávila con el sensor barredor ADS40 SH52.

Por último, en el capítulo VI se resumen los logros alcanzados y se enumeran las conclusiones y perspectivas futuras derivadas del desarrollo de la Tesis Doctoral.

2 CAPÍTULO II - ESTADO DEL ARTE

CAPÍTULO II

ESTADO DEL ARTE

2.1. ACERCAMIENTO DE CALIBRACIÓN

Según el vocabulario internacional de términos metrológicos (VIM) “la calibración es el conjunto de operaciones que establecen, en condiciones especificadas, la relación entre los valores de una magnitud indicados por un instrumento de medida o un sistema de medida, o los valores representados por una medida materializada o por un material de referencia, y los valores correspondientes de esa magnitud realizados por patrones.

Esta definición de calibración lleva asociada las siguientes notas:

- El resultado de una calibración permite atribuir a las indicaciones los valores correspondientes del mensurando o bien determinar las correcciones a aplicar a las indicaciones.
- Una calibración puede también servir para determinar otras propiedades metrológicas tales como los efectos de las magnitudes de influencia.
- Los resultados de una calibración pueden consignarse en un documento, a veces, certificado de calibración o informe de calibración.”

Desde el punto de vista fotogramétrico, se definía calibración como el proceso en el que se tratan de determinar los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de la distorsión radial y tangencial) de la toma de las fotografías además del poder separador del objetivo.

La necesidad de calibrar la cámara es un requerimiento fundamental en el campo de procesamiento de datos fotogramétricos y debe realizarse bajo unas condiciones estrictamente controladas en laboratorios (multi-colimadores y goniómetros) o fuera de laboratorios (sistemas estelares, sistemas de polígonos de prueba y calibración in situ).

Pero antes de profundizar en la calibración y en sus métodos, citaremos brevemente los aspectos generales de la calibración tradicional de cámaras que son mencionados en el Manual de Fotogrametría (Slama, 1980):

- “La calibración de una cámara es el proceso mediante el cual sus aspectos geométricos son determinados.
- Se calibra para que la fotografía obtenida con la cámara pueda ser utilizada para la generación de cartografía.
- Es posible calibrar cualquier cámara, pero las cámaras utilizadas para obtener datos geométricos están especialmente diseñadas para generar datos mucho más precisos.
- La calibración asume que lo que está calibrado se mantiene estable entre calibraciones.
- Los valores de calibración y sus precisiones son reportados en un certificado de calibración de la cámara con tablas y gráficos.”

Desde el punto de vista de la fotogrametría clásica, los métodos de calibración en laboratorio son la metodología más habitual usada para los sensores aéreos. Los resultados obtenidos de la calibración en estos laboratorios son documentados en los bien conocidos certificados de calibración cuya verificación y validación, debe ser repetida en un cierto intervalo de tiempo, típicamente dos años. El instrumental usado en estas instalaciones, multi-colimadores o goniómetros, permiten determinar a través de las discrepancias entre las coordenadas o ángulos

medidos y su valor a priori, los parámetros de la distorsión de las lentes. Por otro lado, el valor de la focal y las coordenadas del punto principal son elegidos de tal manera que se minimice dicha distorsión y que se obtenga un patrón de distorsión simétrico (Cramer, 2004).

Pero esta metodología ha ido cambiando a medida que cada uno de los proveedores de las diferentes cámaras aéreas ha desarrollado su propio enfoque de calibración, esforzándose en reducir al mínimo la necesidad de un laboratorio de calibración e implementando métodos con los que determinar los parámetros del sistema al mismo tiempo que se lleva a cabo el proyecto fotogramétrico, es decir a través de métodos de calibración in situ.

Por ejemplo, la cámara DMC de ZI (Zeiss/Intergraph) y la cámara ADS40/80 de Leica Geosystems conllevan una parte de laboratorio y otra de calibración in situ. La calibración in situ está basada en un proceso de aerotriangulación por lo que se realiza bajo las mismas circunstancias ambientales que el proyecto fotogramétrico. Sin embargo, estos métodos, a diferencia de los tradicionales laboratorios de calibración, aún no están certificados oficialmente a través de instituciones de metrología independientes, por lo menos desde el punto de vista europeo (Cramer et al., 2010).

Las cámaras UltracamD y UltracamX de Vexcel también emplean, además del procedimiento de laboratorio, un sistema de calibración in situ. En este caso el laboratorio de calibración consiste en un sistema de polígonos de prueba en el que se fotografía una serie de puntos de control cuya posición ha sido determinada previamente por procedimientos topográficos de alta precisión ($\pm 50 \mu\text{m}$ en X , Y y Z), y la calibración in situ está basada, al igual que en los casos anteriores, en un proceso de aerotriangulación.

La calibración in situ basada en procesos de aerotriangulación va ganando terreno en la validación y certificado de calibración de los nuevos sensores y se suele llevar a cabo en campos de prueba diseñados según las características de cada

sensor. En algunos casos, este tipo de calibración puede realizarse sobre cualquier área, pero el vuelo ha de realizarse siguiendo un patrón determinado (Fuchs y Adigüzel, 2010; Ladstädter et al., 2010). Es decir, estos métodos son desarrollados de manera personalizada por los fabricantes del sistema y no es hasta el 2010 cuando el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) publica las primeras directrices para el diseño geométrico de los campos de pruebas (USGS, 2010).

Por tanto, y según señala la normativa alemana “DIN 18740 Parte 4- productos fotogramétricos: Requisitos de cámaras aéreas digitales y fotografías aéreas digitales” (DIN 18740-4, 2007) aún se solicita el certificado de calibración, pero a diferencia de lo que ocurría en la fotogrametría clásica donde este certificado debía ser proporcionado por un instituto de metrología, hoy en día puede ser proporcionado a través del fabricante siempre con una validez de dos años. Además, la validez de esta calibración puede ser realizada en campos de prueba señalizados siempre y cuando se realice con periodos inferiores a un año.

La Organización Internacional de Normalización (ISO) y el Comité Técnico (TC) 211 están actualmente trabajando en el desarrollo de la nueva especificación técnica ISO/TC 19159 llamada “Calibración y validación de los sensores remotos de imágenes y datos de teledetección” que más tarde se convertirá en un estándar ISO (Kresse, 2010).

Aunque la mayoría de estas definiciones y métodos de calibración son generalmente válidos para todos los tipos de cámaras, se deben de precisar algunos detalles para los nuevos sensores digitales. La capacidad multiespectral es una de las mayores mejoras de estos sensores, por tanto la calibración no debería restringirse únicamente a los aspectos geométricos sino también a la parte radiométrica (Cramer, 2004). Además, y debido a la gran variedad de cámaras digitales existentes hoy día en el mercado (Tabla 2.1), hay diferentes enfoques de calibración, los cuales han sido definidos individualmente para cada tipo de

cámara. Por otro lado, la integración de sensores para la determinación directa de la trayectoria de la cámara como puede ser el GNSS o la integración del GNSS/IMU, hace que la calibración pase a ser un proceso más complejo en tanto y cuanto participan más sensores.

Sensor	Geometría		Cabeza del sensor		Formato de la imagen		Grabación imágenes		GNSS/IMU	
	Lineal	Matricial	Simple	Múltiple	Grande	Medio	Sincrónico	Sintópico	Opcional	Obligatorio
ADS40	✓		✓		✓		✓			✓
DMC		✓		✓	✓		✓		✓	
Ultracam		✓		✓	✓			✓	✓	
DSS		✓	✓			✓	✓		✓	
DIMAC		✓	✓	✓		✓	✓		✓	
HRSC-Ax	✓		✓		✓		✓			✓
3-DAS-1	✓			✓	✓		✓			✓
Starimager	✓		✓		✓		✓			✓

Tabla 2.1. Características del diseño de algunos sensores digitales (Cramer, 2004).

Toda esta situación actual queda definida en el marco de la iniciativa del European Spatial Data Research (EuroSDR), en el proyecto *Digital Camera Calibration & Validation* (Cramer, 2009).

EuroSDR es una organización de usuarios Europeos fundada en 1953 (anteriormente la *European Organisation for Experimental Photogrammetric Research*, OEEPE). Hoy en día 18 países europeos son miembros oficiales de la organización, donde se representa cada estado miembro por dos delegados: uno de la Agencia Nacional de Cartografía y el segundo representante de alguna institución o compañía de investigación. Heipke y Mooney (2009) definen al EuroSDR como una organización de investigación al servicio de las necesidades de información geoespacial europea.

Actualmente (2012) el trabajo de investigación del EuroSDR se lleva a cabo en cinco comisiones que hacen frente a:

- Sensores, adquisición de datos primarios y georreferenciación: incluye la orientación y calibración de sensores, la precisión y fiabilidad de su

orientación, georreferenciación y calibración.

- Análisis de imagen y extracción de información: incluye la información sobre el contenido multi-espectral, multi-sensor, multi-resolución y multi-temporal de las imágenes. Estudia los métodos y algoritmos para la adquisición automática de datos geoespaciales y la descripción de la calidad de los datos.
- Sistemas de producción y procesos: evalúa y prueba soluciones para la integración de los procesos de suministro de datos, estudia su rendimiento (tiempo, coste y flexibilidad) y alienta al sector a contribuir a las actividades EuroSDR y apoya a la estandarización del intercambio de datos tanto geométricos como semánticos.
- Especificaciones de datos: evalúa, documenta y difunde los métodos y mecanismos para las bases de datos, su mantenimiento e integración y vinculación de distintos tipos de datos. Estudia las nuevas aplicaciones como la realidad virtual.
- Servicios de red: aporta los métodos y mecanismos para la vinculación, acceso y entrega de datos y de sus metadatos. Aplicaciones para la visualización de la geoinformación.

En el verano del 2003 el Comité Directivo del EuroSDR establece una red central de trabajo de algunos investigadores clave en el campo de la calibración de la cámara digital para iniciar el proyecto anteriormente citado, *Digital Camera Calibration & Validation*. En una reunión inicial en la semana fotogramétrica en el año 2003, todos los grandes productores de cámaras digitales aéreas muestran su voluntad de apoyar esta iniciativa. Por tanto, se aprueba el proyecto de manera oficial durante la reunión del Comité Directivo del EuroSDR del 15-17 de octubre del 2003, en Munich, Alemania. A la vez que se escribe el proyecto, comienza a ejecutarse la primera fase, donde 35 expertos se unen al mismo. El objetivo es doble:

- Recopilar todo el material sobre calibración de cámaras digitales aéreas para compilar un extenso informe que describa la práctica y los métodos (1ª fase).
- Realizar pruebas empíricas cuyo objetivo es el desarrollo de procedimientos comúnmente aceptados para la calibración de las cámaras aéreas, basadas en la experiencia y consejos de expertos (2ª fase).

Aunque el proyecto es oficialmente terminado en mayo del 2007 no es hasta el 2009 cuando Cramer presenta un informe en el que se recogen todos los resultados de los test empíricos y resúmenes de las principales conclusiones haciendo especial hincapié en los aspectos geométricos. Todos los estudios se desarrollan alrededor de los tres principales sensores aéreos: ADS40 de Leica Geosystems, DMC de ZI (Zeiss/Intergraph) y UltraCam-D (UCD) de Vexcel. Los resultados empíricos muestran la importancia de la autocalibración, de la que se hablará más adelante, durante el procesamiento de los datos para obtener la máxima precisión geométrica.

Finalizado el proyecto *Digital Camera Calibration & Validation*, la organización EuroSDR aborda tres nuevos proyectos: el primero centrado en la certificación a nivel europeo de cámaras digitales aerotransportadas, conocido como *EuroDAD*², el segundo en los aspectos radiométricos de cámaras digitales aéreas, *Radiometric Aspect of Digital Photogrammetric*, y el tercero se centra en los sistemas de medio formato, *Medium Format Digital Camera*.

Estos tres proyectos surgen como una continuación necesaria del proyecto *Digital Camera Calibration & Validation*, y están interrelacionados, aunque sean proyectos diferentes y tengan grupos de trabajo distintos. Los principales resultados de estos proyectos se citan en Cramer (2008).

Podríamos por tanto redefinir la calibración como el proceso que permite estimar los parámetros geométricos, radiométricos y espectrales que definen las condiciones de formación de la imagen digital cubriendo todo el sistema de

sensores. Este conjunto de parámetros debe ser documentado por un certificado de fabricante y validado al menos una vez al año, mediante procedimientos de calibración in situ.

Así pues, deberíamos abordar el estado del arte de la calibración desde el punto de vista geométrico, desde el punto de vista radiométrico y desde el punto de vista espectral para cada uno de los nuevos sensores digitales. Pero dado que esta Tesis Doctoral se centra en el análisis geométrico del sensor ADS40 se abordará el estado del arte únicamente de esta cuestión.

2.1.1. CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA DE BARRIDO ADS40

Tal y como se citó anteriormente, la cámara ADS40 de Leica Geosystems emplea, además del procedimiento de laboratorio, un sistema de calibración in situ basado en un proceso de aerotriangulación.

Dado que la resolución espacial indica la capacidad del sistema para captar los pequeños objetos que se encuentran en la imagen, se ha de tener en cuenta los movimientos y vibraciones del sensor, el desenfoque de la parte óptica del mismo, y la atmósfera, ya que pueden ser causas del empeoramiento de esta resolución (Honkavaara, 2008). La norma ISO 12233 define una serie de parámetros que determinan esta resolución espacial: el poder de resolución (RP), el límite de resolución, la frecuencia de respuesta espacial, la función de transferencia de modulación (MTF) y la función de transferencia óptica (OTF).

Para nuestro sensor de estudio, ADS40, la resolución espacial se obtiene mediante la función de transferencia de modulación, que es determinada simultáneamente al proceso de calibración geométrica para varios ángulos del campo de visión de las lentes tanto en la dirección del vuelo como perpendicular a esta (Pacey et al., 1999; Schuster y Braunecker, 2000).

La calibración geométrica consiste en determinar la posición de cada uno de los píxeles de los CCD lineales del plano focal. Tal y como se explicará más adelante, en el capítulo III de esta Tesis Doctoral, el plano focal de la ADS40 consiste en una agrupación de varios CCD lineales, cada uno de ellos formando un ángulo de inclinación distinto con la lente y con diferente sensibilidad multispectral, formados por 12000 píxeles cuyo tamaño es de $6.5 \times 6.5 \mu\text{m}^2$.

La calibración geométrica además de llevar asociada una parte de laboratorio, conlleva un proceso de calibración in situ basada en un proceso de aerotriangulación (Honkavaara, 2008).

A continuación se explicará el procedimiento seguido para la calibración geométrica del sensor en los laboratorios de calibración.

El laboratorio de calibración para la ADS40 está basado en un goniómetro vertical codificado (CVG) de la casa SwissOptic (Leica Geosystems). Su metodología es similar al aplicado para la calibración de los sensores en satélites (Beisl, 2006). Todos los detalles de las instalaciones de calibración pueden consultarse en Pacey et al., (1999).

El goniómetro vertical codificado se desarrolló a partir de la modificación del goniómetro vertical electrónico (EVG), reemplazando el fotomultiplicador por una cámara matricial digital y la placa de vidrio de referencia (con sus marcas conocidas con una alta precisión) por una placa con códigos de cristal especial. Estos códigos se localizan tanto en las dos diagonales de la placa como en las direcciones horizontales y verticales, con una separación entre ellos de 10 mm.

El método de calibración consiste en iluminar el espacio objeto desde el espacio imagen, los rayos de luz atraviesan la lente del sensor y emergen en el espacio objeto afectados de la correspondiente distorsión. En el espacio objeto se emplea el goniómetro alineado con la cámara para ir midiendo todos los ángulos de los rayos correspondientes a los códigos de la placa de cristal pudiendo de esta

manera contrastar estas medidas reales con las teóricas. Con las correspondientes medidas angulares al objeto, obtenemos la focal calibrada y una función de distorsión. Si bien para la calibración de la ADS40 se deben tener en cuenta una serie de modificaciones (Cramer, 2004).

Como describe Pacey et al., (1999), se calibra primero por separado el objetivo del cono y el plano focal CCD. Después, ambos componentes se ensamblan y se calibran con el CVG. Ya que los CCD están fijos en el plano focal, la placa de vidrio de referencia no puede ser utilizada, por tanto, se debe proyectar una diana codificada en dirección contraria a la línea CCD. Para permitir las mediciones en la dirección nadir, se monta un espejo escáner adicional sobre la parte superior del brazo del goniómetro. Por último, y tal y como describen Schuster y Braunecker (2000), es suficiente con medir los píxeles cada 2-5 grados dentro del campo de vista ya que los valores intermedios pueden ser interpolados numéricamente.

En cuanto al proceso de calibración in situ basado en un proceso de aerotriangulación, en adelante autocalibración (Cramer, 2004), todo el sistema de sensores que intervienen junto con la ADS40 en el proyecto fotogramétrico es calibrado. En este contexto, la Unidad de Medida Inercial (IMU) ha de ser mencionada ya que es esencial para el proceso operacional de los datos de cámaras barredoras lineales. La obligatoria determinación de la orientación relativa entre el cuerpo del IMU y el de la ADS40 sólo puede ser calculada a través de la autocalibración, lo cual es una ventaja en comparación al método de calibración en laboratorio. Todo el procedimiento relativo a la autocalibración se cita en detalle en el capítulo IV de esta Tesis Doctoral, si bien reseñaremos a continuación y brevemente este procedimiento.

La autocalibración está basada en la orientación de los puntos fijos propuesta por Hofmann y Müller (1988), que es usada en el ajuste del bloque en el que, además de los parámetros de la orientación externa, se determinan los parámetros de la

orientación interna. El modelo matemático para procesar este tipo de imágenes es la condición de colinealidad adaptada a las circunstancias del carácter lineal de la información.

Con el fin de realizar una autocalibración global del sistema, lo suficientemente buena, se requiere un patrón especial de vuelo. Debido a la fuerte correlación entre algunos de los parámetros de calibración y los elementos de la orientación externa, el diseño de vuelo debe constar de dos líneas en forma de cruz, cada una de ellas voladas en las dos direcciones. Este esquema, en principio, es suficiente para estimar todos los parámetros (incluso sin puntos de apoyo) excepto la focal. Para estimar este parámetro se necesita conocer un factor de escala que puede ser determinado a través de puntos de apoyo o realizando otro vuelo con la misma configuración pero a diferente altura. Esta última configuración es el modelo recomendado por Cramer (2004) ya que ambos bloques quedan conectados a través de puntos de paso y esta geometría resultante es mucho más fuerte, con lo que se obtienen estimaciones muy fiables de los parámetros de calibración.

Los parámetros de calibración son obtenidos tras una serie de iteraciones en el ajuste del bloque. Debe mencionarse la necesidad de disponer de los parámetros obtenidos en el laboratorio de calibración como aproximaciones iniciales para poder proceder a la primera iteración. Por tanto, y para este tipo de cámara, el laboratorio de calibración sigue siendo necesario.

Como laboratorios de calibración para la ADS40 podemos mencionar el ubicado en el DLR, *Institute of Space Sensor Technology*, Berlín, Alemania, donde originalmente se realizaban calibraciones de sensores espaciales (Schuster, 1994). Por otro lado podemos nombrar las instalaciones de calibración de LH Systems, Suiza, ya que desarrollaron nuevos instrumentos con la fabricación de las partes principales óptico-mecánicas de la ADS40 para testear las lentes durante el proceso de fabricación y para realizar la calibración final del cabezal de la cámara. Todos los detalles de las instalaciones de calibración están dados en

Pacey et al., (1999).

En ambos laboratorios de calibración, DLR y LH Systems, se realizan las medidas oportunas sobre la ADS40 de la primera generación. Se miden y comparan los resultados de calibración geométrica para la línea nadir de la ADS40 (Schuster y Braunecker, 2000). Las pequeñas diferencias obtenidas en los dos laboratorios (menores a un píxel para toda la línea CCD) indican el alto grado de precisión y la alta fiabilidad de ambos dispositivos.

En cuanto a la calibración radiométrica se ha de tener en cuenta que esta juega un papel cada vez mayor en las imágenes. La calibración radiométrica permite realizar la transformación de los niveles digitales captados por el sensor a valores absolutos de radiancia o reflectancia lo que mejorará el uso de sus datos físicos en aplicaciones de carácter temático propias de la teledetección.

Existen tres tipos de calibración radiométrica: en laboratorio, a bordo de satélite o avión y mediante campañas de medidas en campo también denominado calibración vicaria (Honkavaara, 2008). Para la ADS40 la calibración radiométrica se puede llevar a cabo en laboratorio o en campo. La calibración en laboratorio se realiza mediante una esfera integradora y considera un modelo radiométrico lineal (Beisl et al., 2006; Beisl et al., 2008) mientras que el método vicario puede estar basado a su vez en reflectancias (Hernández et al., 2012) o en radiancias (Beisl et al., 2008).

Para llevar a cabo la calibración vicaria se emplean un espectroradiómetro y un equipo GNSS con el fin de obtener la firma espectral de las superficies de interés y su correspondiente ubicación espacial de forma simultánea al vuelo fotogramétrico. Las superficies de interés pueden ser lonas de calibración o zonas naturales y/o artificiales lo suficientemente homogéneas. Estas medidas radiométricas en campo son comparadas con los niveles digitales obtenidos por la cámara fotogramétrica.

La calibración espectral es necesaria desde el punto de vista radiométrico ya que el conocimiento de la respuesta espectral del sistema permite un cálculo más preciso de los coeficientes de calibración radiométricos y un chequeo de la integridad del sistema. Es decir, para calcular la cantidad de luz necesaria que debe llegar a la línea CCD del sensor en las medidas de calibración radiométrica se debe conocer de antemano la función de respuesta espectral (Beisl, 2006; Fricker, 2007).

Los resultados de la calibración son documentados en su certificado (Anexo I), el cual recoge: los test de los componentes individuales del sistema, la representación del vuelo de calibración con sus puntos de paso, los ángulos de desalineamiento entre IMU-cámara y los resultados de la calibración geométrica (coordenadas x/y de cada uno de los píxeles de todos los sensores).

2.2. ACERCAMIENTOS A LOS DIFERENTES TEST EMPÍRICOS DE AEROTRIANGULACIÓN

La necesidad de análisis empíricos de aerotriangulaciones para los sensores digitales aéreos se hace obligatoria con el fin de diagnosticar y validar su comportamiento para su aplicación en proyectos fotogramétricos (Cramer, 2006). Debido a esto y a proyectos como el anteriormente citado *Digital Camera Calibration & Validation*, la Comunidad Científica realiza varias pruebas empíricas para los sensores lineales de Leica. Sin embargo, Kocaman et al., (2008) considera que no hay suficientes trabajos adecuados y disponibles a nivel mundial para poder sacar conclusiones de valor general y hace mención a la necesidad de más pruebas empíricas y trabajos de investigación para este tipo de cámaras.

A continuación realizaremos un recorrido a través de las distintas generaciones de estos sensores mostrando los resultados obtenidos en los diferentes test empíricos de las aerotriangulaciones.

2.2.1. ADS40 SH40. PRIMERA GENERACIÓN

En la primera generación de la ADS40 las pruebas empíricas desarrolladas por la Comunidad Científica se reducen en comparación a las obtenidas para otros tipos de sensores aéreos digitales, ya que son muy pocos los que tienen el software y el conocimiento necesario para trabajar con este tipo de imágenes.

Muchos de los participantes de la primera fase del proyecto *Digital Camera Calibration & Validation* no participan en la segunda, y de estos (Tabla 2.2), solamente analizan los datos de la ADS40 tres de los trece participantes.

#	Institución	Código	Datos procesados
1	Instituto Cartográfico de Cataluña, Barcelona, España	ICC	DMC
2	Lantmatäriet, Gävle, Suecia	LM	DMC
3	ITACyL, Valladolid, España	Itacyl	UCD
4	Inpho, Stuttgart, Alemania	Inpho	DMC, UCD
5	CSIRO ciencias de la información, Wembley, Australia	CSIRO	DMC, UCD
6	DLR, Berlín, Alemania	DLR-B	ADS
7	Universidad de Ciencias Aplicadas, Stuttgart, Alemania	HfT	DMC
8	IPI, Universidad Hannover, Alemania	IPI	DMC, UCD
9	ETH Zürich, Suiza	ETH	ADS, DMC, UCD
0	Universidad de Pavia, Italia	UoP	ADS
11	Universidad de Nottingham, Inglaterra	Uno	UCD
12	Intergraph/ZI-Imaging, Aalen, Alemania	IngrZI	DMC
13	Vexcel, Graz, Australia	Vexcel	UCD

Tabla 2.2. Participantes en la segunda fase del proyecto Digital Camera Calibration & Validation (Cramer, 2007).

Los datos de la ADS40 se obtienen el 26 de junio del 2004 sobre el campo de pruebas de Alemania, Vaihingen/Enz (del Instituto de Fotogrametría, IFP, de la Universidad de Stuttgart). Este campo cubre un área de $7.5 \times 4.8 \text{ km}^2$ y dispone de más de 200 puntos medidos con una precisión de 2 cm, de los cuales 12 son utilizados como puntos de apoyo y 190 como chequeo.

Se realizan cuatro vuelos a distinta altura: 500, 1500, 2500 y 4000 m con un tamaño o huella del píxel en el terreno, *Ground Sample Distance* (GSD), de 0.06, 0.18, 0.26 y 0.42 m respectivamente. Estos vuelos se llevan a cabo bajo un proyecto conjunto del Instituto de Fotogrametría IFP, y Leica Geosystems. La

cámara es instalada en un avión *Pilatos Porter* que permite velocidades de vuelo lentas, lo que es esencial sobre todo para la obtención de los datos de la ADS40 desde alturas de vuelo muy bajas. Como ya se ha citado, se toman cuatro vuelos, cada uno de ellos adquirido con diferente configuración (Tabla 2.3).

#	Altura de vuelo [m]	GSD [m]	Pasadas longitudinales	Pasadas transversales	Solape % (líneas E-W)	Solape % (líneas N-S)
1	4000	0.42	1	2	---	48
2	2500	0.26	3	3	70	29
3	1500	0.18	4	2	44	---
4	500	0.06	8	2	55	---

Tabla 2.3. Configuración de los vuelos ADS40 sobre Vaihingen/Enz (Cramer, 2006).

El Instituto de fotogrametría IFP (Cramer, 2005) realiza el tratamiento completo de los datos del vuelo a 1500 m y del vuelo a 2500 m utilizando el software suministrado por Leica. Solamente se estudian los aspectos geométricos de la cámara obteniendo los siguientes resultados en la precisión externa: para el vuelo bajo, GSD de 0.18 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.075 m, y un $RMSE_Z$ de 0.077 m¹, y para el vuelo alto, GSD de 0.26 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.089 m, y un $RMSE_Z$ de 0.100 m. El ajuste se realiza corrigiendo a los datos de la deriva y añadiendo el cálculo de desalineamiento entre IMU-cámara.

El ETH de Zürich (Kocaman et al., 2006) solamente considera el vuelo bajo, vuelo con GSD de 0.18 m, y utiliza para el ajuste del bloque sus propios modelos matemáticos desarrollados para la aerotriangulación de sensores lineales (Gruen y Zhang, 2003). Los modelos matemáticos que se utilizan para el procesamiento de los datos de la ADS40 son el modelo de interpolación de Lagrange, LIM, y el modelo de georreferenciación directa, DGR. Este último es el más simple de todos, ya que las imágenes de la trayectoria se modelan como un todo y se tienen

¹ Raíz cuadrática del error cuadrático medio (Root Mean Square Error).

en cuenta nueve errores sistemáticos que son estimados por trayectoria (el vector excentricidad entre el sistema cartesiano de la cámara y el sistema cartesiano GNSS, y un desplazamiento y una deriva en función del tiempo asociados al cómputo del GNSS). En el modelo LIM los parámetros de orientación externa son determinados por los llamados puntos de orientación fijos (*fixes*), los cuales son introducidos cada cierto intervalo de tiempo. Entre puntos de orientación fijos los parámetros de orientación externa de una cierta línea de escaneo son interpolados utilizando un polinomio de Lagrange.

Los valores obtenidos en la precisión externa para cada uno de los modelos matemáticos son (Kocaman et al., 2006):

- Para el modelo DGR se consigue un $RMSE_{XY}$ de 0.052 m y un $RMSE_Z$ de 0.069 m.
- Para el modelo LIM-4 (utilizando cuatro puntos fijos por pasada): $RMSE_{XY}$ de 0.037 m: $RMSE_Z$ de 0.068 m.
- Para el modelo LIM-8 (utilizando ocho puntos fijos por pasada): $RMSE_{XY}$ de 0.058 m: $RMSE_Z$ de 0.064 m.

El DLR-B de Berlín (Scholten et al., 2002) utiliza un flujo de trabajo que es originalmente desarrollado para la orientación y generación de MDT y ortofoto de datos procedentes de la cámara *High Resolution Stereo Camera* (HRSC). Sin embargo no es capaz de obtener unos resultados para la precisión externa de los datos ADS40 ya que no puede estimar las coordenadas de los puntos chequeados.

La Universidad de Pavia, UoP, (Cramer, 2006) obtiene sus resultados utilizando el software de procesamiento de Leica Geosystems, es decir GPro (Ground Processing Software) y ORIMA (*Orientation Management Program*), al igual que el IFP. Realizan un primer ajuste sin corregir la deriva, los posibles efectos del datum, y los errores de desalineamiento IMU-cámara (*boresight*), y un segundo ajuste con la misma configuración que el IFP. Sin embargo sus

resultados en el vuelo bajo son peores, especialmente en la componente norte ya que parece estar presente un error sistemático. De manera contraria, para el vuelo alto y con la misma configuración que el IFP, obtienen mejores resultados en la componente planimétrica. Según los autores, esto refleja que la práctica individual de los usuarios influye en la precisión final. A continuación se muestran los valores obtenidos para el vuelo bajo (Cramer, 2006):

- Para el modelo Básico (sin corregir de deriva, datum y desalineamiento entre IMU-Cámara) se consigue un $RMSE_{XY}$ de 0.108 m y un $RMSE_Z$ de 0.150 m.
- Para el ajuste resuelto según la configuración empleada por IFP, corregido de deriva y desalineamiento IMU-Cámara se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.089 m y un $RMSE_Z$ de 0.091 m.

Los valores obtenidos para el vuelo alto son (Cramer, 2006):

- Para el modelo Básico (sin corregir de deriva, datum y desalineamiento entre IMU-Cámara) se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.103 m y un $RMSE_Z$ de 0.277 m.
- Para la segunda configuración, corregido de deriva y desalineamiento IMU-Cámara se consigue un $RMSE_{XY}$ de 0.061 m y un $RMSE_Z$ de 0.088 m.

Institución	Configuración	GSD 0.18 [m]		GSD 0.26 [m]	
		$RMSE_{XY} / GSD$	$RMSE_Z / GSD$	$RMSE_{XY} / GSD$	$RMSE_Z / GSD$
IFP	---	0.417	0.428	0.342	0.385
ETH	DGR	0.289	0.383	---	---
	LIM-4	0.205	0.378	---	---
	LIM-8	0.322	0.356	---	---
UoP	BÁSICO	0.600	0.833	0.396	1.065
	II	0.494	0.506	0.235	0.338

Tabla 2.4. Síntesis de los resultados obtenidos para la ADS40 de la primera generación sobre el campo de pruebas de Vaihingen/Enz. DGR: trayectoria modelada como un todo corregida del vector cámara-GNSS y de los errores (desplazamiento y deriva) asociados al cómputo del GNSS. LIM: interpolación de Lagrange utilizando puntos fijos espaciados cada cierto tiempo. Básico: sin aplicar ninguna corrección. II: corrección por deriva y desalineamiento IMU/Cámara.

De estos resultados (Tabla 2.4) podríamos concluir que las precisiones externas obtenidas para un vuelo con GSD de 0.18 m están en torno a 0.3 veces el GSD

para la componente planimétrica y en torno a 0.38 veces el GSD para la altimétrica, eliminando los resultados obtenidos por la Universidad de Pavia por diferir considerablemente con los anteriores. Para el vuelo con GSD de 0.26 m y tomando como resultados los obtenidos por el IFP, se concluye que la componente altimétrica se mantiene en 0.38 veces el GSD, y la planimétrica 0.34 veces el GSD.

Es decir, los resultados planimétricos son ligeramente mejores a los obtenidos para la componente altimétrica independientemente de la altura del vuelo.

La Comunidad Científica continúa realizando algunas otras pruebas empíricas que sin embargo no son recogidas en la segunda fase de este proyecto, *Digital Camera Calibration & Validation*. Podemos citar entre otras a Cramer (2005, 2006); Kocaman et al., (2006, 2008) y Casella et al., (2007, 2008).

En Cramer (2005), se aerotriangulan los datos del vuelo a 1500 m sobre el campo de pruebas de Alemania, Vaihingen/Enz (GSD de 0.18 m), variando el número de puntos de apoyo (0, 4 y 12) y con dos enfoques diferentes: el primero basado en la orientación estándar implementada en el software ORIMA/CAP-A (*Combined Adjustment Program, Aerial Version*) y el segundo basado en el modelo de georreferenciación directa implementado por Dirk Stallmann en el software de aerotriangulación del IFP, DGAP (*Dirks General Analytical Positioning*). Los resultados obtenidos para la precisión externa con ORIMA son:

- Con 0 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.126 m; $RMSE_Z$ de 0.135 m.
- Con 4 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.075 m; $RMSE_Z$ de 0.090 m.
- Con 12 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.073 m; $RMSE_Z$ de 0.068 m.

Con DGAP los resultados son similares:

- Con 0 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.120 m; $RMSE_Z$ de 0.145 m.

- Con 4 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.077 m; $RMSE_Z$ de 0.065 m.
- Con 12 puntos de apoyo: $RMSE_{XY}$ de 0.075 m; $RMSE_Z$ de 0.063 m.

Por tanto y a la vista de los resultados, en este estudio se concluye que para obtener una mejora altimétrica es necesario introducir puntos de apoyo, sin embargo aumentar estos en un factor de tres (pasando de 4 puntos de apoyo a 12 puntos de apoyo) no se traduce en una mejora de los resultados. En los mejores casos se obtiene una precisión externa planimétrica de 0.41 veces el GSD utilizando el software ORIMA y 0.42 veces el GSD utilizando DGAP, mientras que para la altimetría se obtiene con ORIMA una precisión de 0.38 veces el GSD y con DGAP, 0.35 veces el GSD.

Estos resultados difieren en la componente planimétrica de los obtenidos en la 2ª fase de *Digital Camera Calibration & Validation* (de 0,3 veces el GSD a 0,41), y puede deberse a la experiencia del operador y al modelo matemático empleado para la aerotriangulación.

En 2006, Cramer continúa los estudios sobre los otros vuelos del campo de pruebas de Vaihingen/Enz. En dichos vuelos y sobre el sistema de sensores se instalaron dos unidades inerciales adicionales además de la unidad inercial (IMU) de la casa Applanix POS (Mostafa et al., 2001). La primera (en adelante AIMU) parte del sistema Applanix POS/AV-510 y está basada en el inercial Science Inc. DMARS IMU. La segunda (en adelante IMU-IIId) es parte esencial del sistema IGI AEROcontrol-IIId (Kremer, 2001). Para realizar los ajustes del bloque se utiliza el software ORIMA corrigiendo de los parámetros de deriva y de l desalineamiento IMU-cámara. Inicialmente se trabaja con la trayectoria del avión calculada a través de los datos GNSS/IMU con la unidad inercial de Applanix POS. En el segundo flujo de trabajo se recalcula la trayectoria, variando los datos del IMU (Tabla 2.5), y se mantiene la misma configuración dentro de ORIMA para determinar los efectos del cambio de la unidad inercial sobre la precisión externa final del ajuste. En ambos casos se varía los puntos de apoyo entre 0, 4 y

12. Cramer (2006) presenta los datos obtenidos tras el ajuste con 12 puntos de apoyo para todos los vuelos exceptuando el bajo, cuyos resultados los presenta de manera individual.

	APPLANIX POS/AV-510	IGI AEROcontrol-IIId
System components	AIMU (dry tuned gyros), PCS-computer (incl. L1/L2 GPS receiver) s/w package: POSpac	IMU-IIId (fibre-optic gyros), AEROcontrol-computer L1/L2 GPS receiver s/w package: AEROoffice
Operation in flight	autonomous	via Standard CCNS4
IMU parameters	AIMU	IMU-IIId
Size (H x W x L) / Weight	9 x 11 x 11 cm / 1.6 kg	19 x 14 x 13 cm / 3.3 kg
Raw data	200 Hz	64 Hz
Gyro drift	1 deg/h	0.1 deg/h
Gyro drift stability	0.01 deg/sqrt(h)	0.02 deg/sqrt(h)
Absolute Accuracy Spec. (post-processed)		
Data rate	200 Hz	64 Hz
Position (RMS)	5-10 cm	5-10 cm
Attitude (RMS)		
Roll, Pitch	0.005 deg (20")	0.005 deg (20")
Heading	0.008 deg (30")	0.008 deg (30")

Tabla 2.5. Parámetros de las unidades inerciales APPLANIX POS/AV-510 y AEROcontrol-IIId (Scholten et al., 2003).

Los resultados obtenidos tras el primer flujo de trabajo (IMU de Applanix POS) son:

- En el vuelo a 1500 m, GSD de 0.18 m, se obtienen los siguientes errores medios cuadráticos para la precisión externa: $RMSE_{XY}$ de 0.075 m; $RMSE_Z$ de 0.077 m.
- En el vuelo a 2500 m con GSD de 0.26 m: $RMSE_{XY}$ de 0.093 m; $RMSE_Z$ de 0.100 m.
- Y en el vuelo a 4000 m cuyo GSD es de 0.42 m: $RMSE_{XY}$ de 0.101 m; $RMSE_Z$ de 0.123 m.

Este estudio demuestra que la precisión externa de los puntos chequeados mejora con la altura de vuelo (Tabla 2.6), es decir, en el vuelo bajo se obtiene para la

componente planimétrica 0.42 veces el GSD, mientras que para el vuelo alto se obtiene un factor de 0.24. En cuanto a la altimetría, para el vuelo bajo se obtiene 0.43 veces el GSD y para el alto 0.29 veces el GSD. Cramer (2006) considera que en trabajos con condiciones y configuraciones de vuelo similares, estos resultados podrían transferirse.

Para el segundo flujo de trabajo (recalculando la trayectoria) se obtienen los siguientes resultados:

- Vuelo a 1500 m, GSD de 0.18 m: $RMSE_{XY}$ de 0.07 m; $RMSE_Z$ de 0.08 m (para la configuración del IMU, AIMU); $RMSE_{XY}$ de 0.07 m; $RMSE_Z$ de 0.06 m (para la configuración del IMU, IMU-IId).
- Vuelo a 2500 m, GSD de 0.26 m: $RMSE_{XY}$ de 0.10 m; $RMSE_Z$ de 0.10 m (para la configuración del IMU, AIMU); $RMSE_{XY}$ de 0.10 m; $RMSE_Z$ de 0.09 m (para la configuración del IMU, IMU-IId).
- Vuelo a 4000 m, GSD de 0.42 m: $RMSE_{XY}$ de 0.10 m; $RMSE_Z$ de 0.12 m (para la configuración del IMU, AIMU); $RMSE_{XY}$ de 0.10 m; $RMSE_Z$ de 0.14 m (para la configuración del IMU, IMU-IId).

En este segundo flujo de trabajo, los resultados (Tabla 2.6) muestran un comportamiento muy similar, por lo que el IMU utilizado no influye en los resultados. Es decir, se pone de manifiesto la gran versatilidad de la orientación por puntos fijos a la hora de utilizar trayectorias GNSS/IMU con distintos rendimientos.

Configuración	GSD 0.18 [m]		GSD 0.26 [m]		GSD 0.42 [m]	
	$RMSE_{XY}/GSD$	$RMSE_Z/GSD$	$RMSE_{XY}/GSD$	$RMSE_Z/GSD$	$RMSE_{XY}/GSD$	$RMSE_Z/GSD$
GNSS/IMU _{inicial}	0.417	0.428	0.358	0.385	0.240	0.293
AIMU	0.400	0.428	0.377	0.369	0.236	0.276
IMU-IId	0.389	0.344	0.381	0.338	0.233	0.326

Tabla 2.6. Síntesis de los resultados obtenidos para la ADS40 de la primera generación en Cramer (2006).

En Casella et al., (2007a), se presentan los resultados de uno de los vuelos de la ADS40 de la primera generación sobre el campo de pruebas de Pavia, Italia. Estos vuelos se realizan por la compañía Italiana CGR en agosto del 2004 a diferentes alturas: 2000, 4000 y 6000 m. Son registradas un total de siete pasadas: tres para el vuelo a 2000 m de altura, dos para el vuelo a 4000 m y dos para el vuelo a 6000 m de altura. Todas las pasadas son tomadas de Este a Oeste (E-W).

El vuelo de estudio por Casella et al., (2007a) es el vuelo a 2000 m de altura, cuyo GSD es de 0.20 m. Tanto el ETH de Zürich como la Universidad de Pavia participan en este estudio con dos enfoques distintos. El ETH utiliza dos de los modelos matemáticos de desarrollo propio para el ajuste del bloque, el DGR (las imágenes de la trayectoria se modelan como un todo y se corrige el vector excentricidad entre el sistema cartesiano de la cámara y el sistema cartesiano GNSS, y un desplazamiento y una deriva en función del tiempo asociados al cómputo del GNSS) y el LIM (interpolación de Lagrange). La Universidad de Pavia utiliza el software comercial suministrado por el proveedor de la cámara: Socet Set 4.4.1, Gpro 2.1 y ORIMA 6.1. Los resultados de las pruebas (Tabla 2.7) son evaluados en términos de precisión interna (σ_0) y externa ($RMSE_{XY}$, $RMSE_Z$ de los puntos chequeados) variando de 5 a 12 los puntos de apoyo utilizados para testear algún cambio significativo. Igualmente en los dos grupos de trabajo se chequean planimétrica y aliméricamente la georreferenciación directa.

UNIVERSIDAD DE PAVIA. GSD DE 0.20 M				
MODELO	PA / PCH	SIGMA0 [μ M]	RMSE _{XY} [M]	RMSE _Z [M]
DG	0 / 46	6.6	0.11	0.64
BASIC	5 / 41	2.6	0.25	0.39
BASIC	12 / 34	2.8	0.22	0.28
ETH ZURICH. GSD DE 0.20 M				
MODELO	PA / PCH	SIGMA0 [μ M]	RMSE _{XY} [M]	RMSE _Z [M]
DG	---	---	0.153	0.649
DGR	5 / 41	2.96	0.26	0.20
DGR	12 / 34	3.09	0.22	0.12
LIM-4	5 / 41	2.88	0.25	0.18

LIM-4	12 / 34	3.02	0.20	0.08
LIM-18	5 / 41	2.76	0.25	0.21
LIM-18	12 / 34	2.91	0.20	0.10

Tabla 2.7. Resultados experimentales en Casella et al., (2007a). PA: Puntos de apoyo. PCh. Puntos de chequeo. DG: georreferenciación directa. Basic: sin aplicar ninguna corrección. DGR: trayectoria modelada como un todo corregida del vector cámara-GNSS y de los errores (desplazamiento y deriva) asociados al cómputo del GNSS. LIM: interpolación de Lagrange utilizando puntos fijos espaciados cada cierto tiempo;

A la vista de estos resultados se concluye que los resultados obtenidos en la georreferenciación directa son muy similares para ambos grupos de trabajo, 0.5 veces el tamaño del GSD para planimetría, y 3 veces el tamaño del GSD para altimetría. Se sospecha que las diferencias entre los resultados obtenidos por la Universidad de Pavia y el ETH son debidas a los distintos métodos utilizados. En varias discusiones sobre el valor disparatado que toma la componente altimétrica, varios expertos del tema (Casella et al., 2997a; Casella et al., 2007b) consideran que este resultado se debe a un mal funcionamiento del GNSS.

Para la Universidad de Pavia los mejores resultados se obtienen con el mayor número de puntos de apoyo al igual que el ETH donde el modelo que mejores resultados muestra es el LIM-4 (interpolación de Lagrange con cuatro puntos fijos). Dado que las configuraciones de las aerotriangulaciones no se pueden comparar entre los dos grupos de trabajo, tampoco pueden compararse sus resultados. Si bien, podemos decir que los resultados óptimos son presentados por el ETH al aplicar el modelo LIM-4 con 12 puntos de apoyo. Sus resultados (Tabla 2.8) son: el tamaño del GSD para la componente planimétrica y 0.4 veces el GSD para la componente altimétrica.

Institución	Configuración	GSD 0.20 m	
		RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD
UoP	BASIC / 12 PA	1.1	1.4
ETH	LIM-4 / 12 PA	1.0	0.4

Tabla 2.8. Resultados más favorables obtenidos para la ADS40 de la primera generación por Casella et al., (2007a).

Estos resultados vuelven a diferir de los obtenidos en la 2ª fase de *Digital Camera Calibration & Validation*, donde recordemos que para un vuelo con

GSD de 0.18 m, obteníamos un precisión de 0.3 veces el GSD para la planimetría y 0.38 veces el GSD para la altimetría. La gran diferencia planimétrica puede deberse a que el vuelo y su configuración varían de un estudio a otro, sin olvidar que tanto los operarios como el software utilizado juegan un papel importante en los resultados finales.

A continuación, en la misma línea de trabajo, se realiza un análisis sobre los tres vuelos del campo de test de Pavia (Casella et al., 2007b) en el que se pretende estudiar la precisión externa que se alcanza en función de la altura de vuelo y el número de puntos de apoyo usados. En cuanto al número de puntos de apoyo utilizados se vuelve a señalar que el uso de 12 puntos en lugar de 5 produce un aumento significativo en la precisión externa. Los valores de los errores medios cuadráticos en los casos resueltos con 12 puntos de apoyo son:

- Para el vuelo a 2000 m de altura: $RMSE_{XY}$ de 0.318 m; $RMSE_Z$ de 0.143 m.
- Para el vuelo a 4000 m de altura: $RMSE_{XY}$ de 0.444 m; $RMSE_Z$ de 0.756 m.
- Para el vuelo a 6000 m de altura: $RMSE_{XY}$ de 0.468 m; $RMSE_Z$ de 0.850 m.

En estos resultados vemos que la componente planimétrica en la precisión externa mejora con la altura de vuelo, siendo de 1.59 veces el GSD para el vuelo bajo y de 0.78 para el vuelo alto. En cambio para la altimetría el mejor resultado se obtiene para el vuelo bajo, siendo el error medio cuadrático altimétrico obtenido 0.71 veces el GSD. Para los otros dos vuelos, 4000 m y 6000 m, se obtienen valores de 1.89 y 1.41 respectivamente.

En Casella y Franzini (2008) se continúa estudiando el mismo vuelo para analizar los errores sistemáticos combinando las vistas de una pasada dos a dos: nadiral y hacia atrás (N02/B14), nadiral y hacia delante (N02/F27) y hacia atrás y hacia delante (B14/F27). Obviamente al tomar una única pasada estas serían las tres posibles combinaciones, pero si tomamos dos pasadas el número de combinaciones ascendería a nueve. Por ello, se lleva a cabo el siguiente flujo de

trabajo: se toman dos pasadas adyacentes y se establece el número de puntos de chequeo. Estos puntos son medidos sobre la orientación directa en todos los modelos que aparecen de entre esas nueve combinaciones posibles comparando estos valores con sus coordenadas terreno. La conclusión principal derivada de este estudio (Casella y Franzini, 2008) es que los casos resueltos con modelos longitudinales (vistas a lo largo de una pasada) o modelos transversales (de dos pasadas contiguas) se comportan de manera muy diferente, poniendo de manifiesto la existencia de un error sistemático en la cámara. El hecho de aerotriangular el bloque en su conjunto (modelo longitudinal y transversal) hace que estos errores se solventen.

En Kocaman et al., (2008), se analizan los resultados de los dos vuelos anteriormente mencionados: el vuelo realizado sobre el campo de test de Vaihingen/Enz y el realizado sobre el campo de test de Pavia. Se han recogido sus resultados para mostrarlos en la siguiente tabla (Tabla 2.9):

VAIHINGEN					
GSD [m]	Modelo	RMSE _{XY} [m]	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z [m]	RMSE _Z /GSD
0.156	DG	0.177	1.13	0.180	1.15
	DGR	0.068	0.44	0.064	0.41
PAVIA					
GSD [m]	Modelo	RMSE _{XY} [m]	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z [m]	RMSE _Z /GSD
0.20	DG	0.156	0.78	0.650	3.25
	DGR / LIM	---	1.1 – 1.3	---	0.4 – 1.0
0.39	DG	0.654	1.67	1.790	4.59
	DGR / LIM	---	0.8 – 1.0	---	1.9 – 2.4

Tabla 2.9. Síntesis de los resultados en Kocaman et al., (2008). DGR: trayectoria modelada como un todo corregida del vector cámara-GNSS y de los errores (desplazamiento y deriva) asociados al cómputo del GNSS. LIM: interpolación de Lagrange utilizando puntos fijos espaciados cada cierto tiempo. DGR/LIM: Intervalos de los resultados obtenidos con ambos modelos.

Se miden las georreferenciaciones directas (DG) de los vuelos a 2000 y a 4000 m sobre el campo de test de Pavia (GSD de 0.20 y 0.39 m respectivamente). Los valores obtenidos para el vuelo bajo son los mismo que en Casella et al., (2007). La georreferenciación directa en el vuelo alto arroja peores resultados que en el vuelo bajo: para la componente planimétrica se obtienen errores medios

cuadráticos con valores cercanos a 1.7 veces el GSD y para la componente altimétrica, 4.6 veces el GSD (Tabla 2.9).

El vuelo bajo es testeado usando el modelo DGR y el LIM, con 5 y 12 puntos de apoyo. En el modelo LIM se utilizaron 4 y 18 puntos fijos de orientación (fixes)². Los errores medios cuadráticos obtenidos para la precisión externa están entre 1.0-1.3 veces el GSD para planimetría y 0.4-1.0 veces el GSD para altimetría. Para el vuelo alto se utilizan los modelos DGR y LIM con la misma configuración de puntos de apoyo, pero en este caso en el modelo LIM se utilizaron 4 y 15 puntos fijos de orientación. Los valores obtenidos en los errores medios cuadráticos de la precisión externa de estos test están entre 0.8-1.0 veces el GSD para la planimetría y 1.9-2.4 veces el GSD para la altimetría.

En cambio, los resultados obtenidos para el vuelo realizado sobre el campo de pruebas de Vaihingen/Enz son mucho mejores. Ya sobre los valores de la georreferenciación directa (DG) se obtienen valores muy próximos al tamaño del GSD tanto en planimetría como en altimetría (Tabla 2.9). Cuando se aerotriangula aplicando el modelo más básico con 4 puntos de apoyo se obtienen valores de 0.44 veces el GSD para la componente planimétrica, y 0.41 para la altimétrica. Para analizar mejor estos resultados debemos ver los estudios realizados por Kocaman et al., (2006), si bien en estos estudios se concluye que el nivel de precisión no mejora al aumentar el número de puntos de apoyo, al igual que no mejora con el modelo LIM (interpolación de Lagrange).

² Los parámetros de orientación externa son interpolados entre dos puntos fijos vecinos, introducidos cada cierto intervalo de tiempo, a través de polinomios de Lagrange. En función del intervalo de tiempo entre los puntos fijos se determina el número de estos para la trayectoria de vuelo

Dada esta variedad en los resultados de Kocaman et al., (2008) se concluye que no hay suficientes trabajos adecuados y disponibles a nivel mundial para poder sacar conclusiones de valor general y se hace mención a la necesidad de más pruebas empíricas y trabajos de investigación para este tipo de cámaras.

Por tanto, recapitulando toda esta información y mostrando los resultados más favorables dentro de cada estudio y/o investigación (Tabla 2.10), concluimos que la precisión externa obtenida en los datos de la ADS40 de la primera generación varía considerablemente de un vuelo a otro. Es decir, de los resultados tan favorables en el vuelo realizado sobre Vaihingen/Enz podemos pasar a resultados como los obtenidos en el vuelo realizado sobre el campo de pruebas de Pavia. De valores muy por debajo del tamaño de GSD, a valores por encima del mismo. Por otro lado y a la vista de los resultados mostrados en la Tabla 2.10, a medida que aumenta el tamaño del GSD (vuelo a mayor altura) los resultados de la componente planimétrica mejoran con un empeoramiento en la componente altimétrica. Este comportamiento se observa tanto en el vuelo realizado sobre Vaihingen/Enz como en el vuelo realizado sobre el campo de pruebas de Pavia. Aún así, tal y como concluían Kocaman et al., (2008), no hay suficientes trabajos adecuados y disponibles a nivel mundial para poder sacar conclusiones de valor general

VAIHINGEN/ENZ			
Proyecto y/o investigación	GSD [m]	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD
Digital Camera Calibration & Validation	0.18	0.30	0.38
Cramer (2005)		0.41	0.38
Cramer (2006)		0.39	0.34
Kocaman et al., (2008)		0.44	0.41
Digital Camera Calibration & Validation	0.26	0.34	0.38
Cramer (2006)		0.38	0.34
Cramer (2006)	0.42	0.23	0.33
PAVIA			
Proyecto y/o investigación	GSD [m]	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD
Casella et al., (2007a)	0.20	1.00	0.40
Casella et al., (2007b)		1.59	0.72
Kocaman et al., (2008)		1.1 – 1.3	0.4 – 1.0

Casella et al., (2007b)	0.40	1.11	1.89
Kocaman et al., (2008)		0.8 – 1.0	1.9 – 2.4
Casella et al., (2007b)	0.60	0.78	1.42

Tabla 2.10. Síntesis de los resultados experimentales para la primera generación de la ADS40.

2.2.2. ADS40 SH51/52. SEGUNDA GENERACIÓN

Si los trabajos referentes a la primera generación son insuficientes, los desarrollos y análisis empíricos realizados con la cámara ADS40 de segunda generación son escasos.

En relación a la ADS40 de segunda generación podemos citar a Casella et al., (2008), cuyos estudios se centran en la precisión geométrica de un bloque volado a 2000 m de altura sobre el campo de pruebas de Pavia (Italia). Este vuelo se realiza a mediados de marzo de 2008 por la empresa CGR con un avión Casa 212. Se adquieren tres vuelos a 800, 2000 y 6000 m de altura.

El vuelo a 800 m es constituido por dos pasadas ortogonales y su objetivo es comprobar la posibilidad de adquirir imágenes de alta resolución, su GSD es de 0.080 m.

El vuelo de 2000 m está formado por cuatro pasadas E-W y una en cruz. Su GSD es de 0.200 m y su objetivo es poder compararlo con el vuelo realizado sobre el mismo campo de pruebas en el 2004.

El último vuelo, realizado a 6000 m de altura tiene un GSD de 0.600 m y está constituido por dos pasadas este-oeste (E-W) y una en cruz. Este vuelo es particularmente interesante para la empresa CGR, ya que su objetivo es el proyecto nacional de ortofotografía, TerraItalyTM.

Por tanto, volviendo a los estudios realizados sobre el vuelo a 2000 m de altura (Casella et al., 2008), se estima la precisión externa de la georreferenciación directa (DG) y se aerotriangula siguiendo tres configuraciones distintas: la primera (AT) es la más simple implementada en el software ORIMA y a la segunda y a la tercera se las incorpora al ajuste el cálculo del boresight, en la

segunda se estima el desalineamiento entre IMU-cámara para todo el bloque (AT+MIS), y en la tercera se estima un valor para cada pasada (AT+MIS-2).

En este estudio se demuestra que la precisión externa en la georreferenciación directa (DG) se encuentra dentro del tamaño del GSD, que cuando se aerotriangula la precisión externa es inferior a la mitad del GSD en todas las componentes y que cuando se recalcula el desalineamiento IMU-Cámara, los mejores resultados que se obtienen son 0.34 veces el GSD para la planimetría y 0.31 para la altimetría.

Una vez obtenidos los datos del ajuste se comparan las precisiones externas obtenidas con las de la ADS40 de la primera generación (Casella et al., 2007a). En esta comparación se determina que los datos de la nueva generación son mejores que los de la anterior para la componente altimétrica, siendo planimétricamente ligeramente peor en la georreferenciación directa. A continuación se muestran los resultados obtenidos para la georreferenciación directa (DG):

- Para la primera generación (GSD de 0.20 m): $RMSE_{XY}$ de 0.152 m; $RMSE_Z$ de 0.643 m.
- Para la segunda generación (GSD de 0.20 m): $RMSE_{XY}$ de 0.188 m; $RMSE_Z$ de 0.220 m.

En la aerotriangulación (AT) se obtienen mejores resultados, tanto planimétrica como altimétricamente, en la segunda generación:

- Para la primera generación (GSD de 0.20 m): $RMSE_{XY}$ de 0.357 m; $RMSE_Z$ de 0.389 m.
- Para la segunda generación (GSD de 0.20 m): $RMSE_{XY}$ de 0.111 m; $RMSE_Z$ de 0.072 m.

En WenYuan et al., (2008) se presenta uno de los primeros estudios sobre los datos de la ADS40 realizados en China llevados a cabo por ShanXi y la oficina de cartografía China. En este trabajo se sigue el flujo de procesamiento utilizado por el software fotogramétrico de Leica en tres conjuntos de datos a distinta escala. En ellos se obtienen las precisiones internas requeridas en cuanto a la triangulación y se toman medidas estereoscópicas tras el ajuste para poder analizar la precisión externa de los tres conjuntos de datos. Los tres vuelos se realizan en distintas ciudades y con distinto GSD. El primero de ellos en Ping Yao, en octubre del 2006 con un tamaño de GSD de 0.200 m, el segundo de ellos en noviembre del mismo año sobre Tai Yuan con un tamaño de GSD de 0.500 m, y el tercer y último, sobre Tai Gu, en mayo del 2007 con un GSD de 0.060 m.

Para cada uno de los vuelos se realiza el ajuste variando el número de puntos de apoyo: 0, 4 y 9. Y a la vista de las medidas estereoscópicas realizadas después del ajuste se observa que las diferencias entre las dos coordenadas planimétricas son insignificantes entre los casos resueltos con 4 y con 9 puntos de apoyo, en cambio, la componente altimétrica si mejora al aumentar el número de puntos de apoyo, exceptuando el vuelo con GSD de 0.06 m (Tabla 2.11). La componente altimétrica presenta un error medio cuadrático en la precisión externa menor que la planimétrica, y se determina que estos buenos resultados altimétricos se deben a que las medidas estereoscópicas se realizan sobre el modelo formado con la vista Backward (14°) y Forward (28°). Mediante el estudio de las ubicaciones de los puntos de apoyo se observa que los que se encuentran en el límite del área de estudio presentan una precisión externa peor a los que se encuentran en el centro, indicando una geometría más débil en estos límites. Además, y según los datos que recogemos de este estudio en la Tabla 2.11, los resultados tanto planimétricos como altimétricos mejoran al aumentar la altura de vuelo, es decir, a mayor tamaño de GSD mejores resultados planimétricos y altimétricos.

GSD [m]	PA	RMSE_{xy}/GSD	RMSE_z/GSD
0.5	0	2.15	1.82
	4	0.87	0.80

	9	0.86	0.70
0.2	0	1.74	0.90
	4	1.21	0.95
	9	1.20	0.75
0.06	4	1.43	1.00
	9	1.54	1.00

Tabla 2.11. Resultados experimentales ADS40 SH5x en WenYuan et al., (2008).

Al margen de estos estudios y a finales del 2007, la Sociedad Alemana de Fotogrametría, Sensores Remotos y Geoinformación (DGPF, *German Society of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation*), toma la iniciativa de evaluar las cámaras fotogramétricas digitales entre las que se encuentra la ADS40 de segunda generación además de la Ultracam-X, la DMC, el JAS-150, la Quattro DigiCAM y la Cámara Industrial Aérea, AIC-x1. Este proyecto nace de la necesidad de generalizar y comparar los resultados obtenidos entre estas cámaras ya que todas las pruebas realizadas hasta la fecha estudian la geometría y calidad radiométrica de los sensores, cada uno de ellos en diferentes escenarios, por lo que la comparación de resultados es bastante limitada. Del mismo modo se pretende evaluar las fortalezas y debilidades específicas de cada sensor relevantes de cara a las posibles aplicaciones de sus datos.

Con el fin de permitir un análisis exhaustivo de todos ellos, se determina que los datos sean capturados en el mismo campo de pruebas, con las mismas condiciones de vuelo y bajo condiciones ambientales controladas. Así se elige como campo de pruebas Vaihingen/Enz, el cual y como ya se ha citado anteriormente para pruebas empíricas de la primera generación, es mantenido por el Instituto de Fotogrametría IFP, de la Universidad de Stuttgart. El objetivo es adquirir con cada uno de los sensores datos a dos alturas de vuelo, dando lugar a dos proyectos con diferente GSD, uno con GSD de 0.200 m y otro con GSD de 0.080 m. Desafortunadamente, no se cumplen los requisitos con todos los sensores ya que algunos de ellos sólo pueden ser tratados a una sola altura como el sensor AIC-x1.

A principios del 2009 y una vez terminados todos los vuelos (Tabla 2.12), los datos son distribuidos entre instituciones, autoridades de cartografía, proveedores de sensores y empresas de fotogrametría interesadas en su tratamiento y estudio. Con el fin de evitar el mal uso de los datos, se firma un acuerdo entre las partes interesadas en el que se fija de antemano los análisis y plazos para la entrega de resultados. Así se establece una red de expertos trabajando en estrecha colaboración entre los que se forma diferentes grupos de trabajo, cada uno centrado en los siguientes temas:

- Geometría, dirigido por el Dr. K. Jacobsen, Universidad de Leibniz Hannover.
- Radiometría, dirigido por el Dr. M. von Schownermark, Universidad de Stuttgart.
- Modelos digitales de superficie, encabezado por Dr. M. Haala, Universidad de Stuttgart.
- Estereoscopía, dirigido por V. Spreckels, RAG Herne.

Sensor	Fabricante	Compañía de Vuelo	Días de vuelo	Observaciones
DMC	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.08 06.08.08	Volado con RMK-Top15, GSD = 0.080 m; p =60%
ADS40, 2nd	Leica Geosystems	Leica Geosystems	06.08.08	---
JAS-150	Jenaoptronik	RWE Power	09.09.08	---
Ultracam-X	Vexcel Imaging	Bsf Swissphoto	11.09.08	---
RMK-Top15	Intergraph/ZI	RWE Power	24.07.08 06.08.08	Volado junto con DMC, GSD = 0.080 m; p =60%
DigiCAM	IGI	Geoplana	06.08.08	---
AIC-x1	Trimble/Rolleimetric	Alpha Luftbild	11.09.08	Sin pasadas en cruz
AIC-x4	Trimble/Rolleimetric	Vulcan Air	19.09.08	Datos no disponibles
DLR 3K-camera	DLR Munich	DLR Munich	15.07.08	Sin pasadas en cruz
AISA+	Specim-FH Anhalt	RWE Power	02.07.08	Volado junto con DMC
ROSI	DLR Munich	DLR Munich	15.07.08	---
ALS 50 LiDAR	Leica Geosystems	Leica Geosystems	21.08.08	---

Tabla 2.12. Sistemas de sensores volados durante el proyecto DGPF (Haala et al., 2010).

En Cramer (2010) se presenta una recopilación de los test de DGPF sobre la evaluación de cámaras aéreas digitales. Los datos de la ADS40 son evaluados tanto por la Universidad de Hannover como por la de Stuttgart. El software utilizado en el ajuste del bloque tanto para la primera institución (UH) como para la segunda (US) es ORIMA. La UH procesa solamente el vuelo con GSD de 0.080 m y utiliza para la evaluación de la precisión externa 52 puntos de chequeo. La US introduce en el cálculo los parámetros internos de la cámara, por lo que sus resultados se muestran en el apartado correspondiente a la autocalibración.

Tal y como señala Cramer (2010), los datos de la ADS40 ofrecen muy buenos resultados (siempre por debajo del tamaño del GSD) pero que no pueden extrapolarse a proyectos de mayor cobertura y bajo condiciones ambientales menos controladas ya que estos son tomados en un campo de pruebas de extensión reducida y controlado.

El proyecto es oficialmente cerrado en julio del 2010, pero esto no pone fin a la evaluación científica, sino que se abren las puertas a seguir con la participación y análisis de todos los datos recopilados con esta iniciativa.

Por tanto, recapitulando toda esta información y mostrando los resultados más favorables obtenidos para la ADS40 de la segunda generación (Tabla 2.13), se concluye que al igual que pasaba con la primera generación, la precisión externa obtenida en los datos de la ADS40 varían considerablemente de un vuelo a otro. Es decir, en base a los resultados obtenidos en los dos vuelos con GSD de 0.20 m (Tabla 2.13) se observa como los resultados pasan de valores por debajo del tamaño del GSD para el vuelo realizado sobre el campo de pruebas de Pavia, a valores por encima del mismo, caso del vuelo realizado sobre Ping Yao. Por otro lado y a la vista de los resultados mostrados en la Tabla 2.13, a medida que aumenta el tamaño del GSD (vuelo a mayor altura) los resultados tanto para la componente planimétrica como para la altimétrica mejoran, siendo para cualquiera de los casos mas favorable esta última. Aún así, estos resultados no se

pueden extrapolar a proyectos de mayor cobertura, ya que se necesitaría una mayor cantidad de trabajos y proyectos realizados fuera de campos de prueba y en condiciones ambientales naturales, sin llegar a controlarlas tal y como se realiza en dichos campos.

Proyecto y/o investigación	Vuelo	GSD [m]	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD
Casella et al., (2008)	Pavia	0.20	0.34	0.31
Wenyuan et al., (2008)	Tai Yuan	0.50	0.86	0.7
Wenyuan et al., (2008)	Ping Yao	0.20	1.20	0.75
Wenyuan et al., (2008)	Tai Gu	0.06	1.43	1.00

Tabla 2.13. Síntesis de los resultados experimentales para la segunda generación de la ADS40.

2.2.3. ADS40 SH81/82. TERCERA GENERACIÓN

Como citamos en el apartado anterior los desarrollos y análisis empíricos realizados con la cámara ADS40 de segunda generación son escasos, y aún lo son más para la tercera generación, ADS80 SH81/82. Las precisiones teóricas esperadas para la ADS80 SH81/82 son mostradas en la Tabla 2.14.

GSD [M]	CONFIGURACIÓN	PA	RMSE [M]
0.05	DG	No	< 1.00
	AT	No	< 0.50
	AT	Si	< 0.05
0.10	DG	No	< 1.00
	AT	No	< 0.50
	AT	Si	< 0.06
0.15	DG	No	< 1.00
	AT	No	< 0.50
	AT	Si	< 0.08
0.20	DG	No	< 1.00
	AT	No	< 0.50
	AT	Si	< 0.10

Tabla 2.14. Precisión teórica para la ADS80 (Leica Geosystems, 2008a).

Esta precisión externa teórica que propone la empresa cuando lanza el producto no tiene mucho que ver con un estudio que realizaron posteriormente (Schreiber, 2008), en el que muestran las precisiones externas obtenidas para tres vuelos realizados sobre la ciudad suiza de Romanshorn, el primero de ellos con un GSD de 0.05 m, el segundo con uno GSD de 0.10 m y el tercero de ellos con 0.20 m.

En la siguiente tabla recogemos los resultados obtenidos (Tabla 2.15):

GSD [M]	RMSE_{XY} [M]	RMSE_Z [M]	RMSE_{XY} / GSD	RMSE_Z / GSD
0.05	0.024	0.038	0.48	0.76
0.10	0.048	0.087	0.48	0.87
0.20	0.111	0.117	0.55	0.59

Tabla 2.15. Resultados experimentales para la ADS80 (Schreiber, 2008).

A la vista de los resultados (Tabla 2.15), la ADS80 ofrece resultados por debajo del tamaño del GSD tanto para la componente planimétrica como para la altimétrica, siendo esta última algo peor en cualquiera de los tres vuelos, a diferencia de lo que ocurre con la ADS40 de la segunda generación, donde la componente altimétrica es mejor que la planimétrica.

Promediando los resultados mostrados en la Tabla 2.15, podríamos concluir que para la planimetría se obtiene valores en torno a 0.5 veces el GSD y para la altimetría 0.74 veces el GSD.

Entre marzo y abril de 2010 se realiza otro vuelo con la ADS80 SH82 sobre Burlington, Iowa, con un tamaño de GSD de 0.65 m. Sobre este vuelo se determina la precisión externa a través de la medición de 20 puntos de chequeo (Berggren, 2010). Se procesa el vuelo mediante las siguientes configuraciones: sin puntos de apoyo, con 5 puntos de apoyo (uno en cada esquina de la zona de vuelo y otro en el centro) y con 38 puntos de apoyo distribuidos por todo el área del proyecto fijando únicamente la componente vertical (Z).

GSD [m]	Configuración	RMSE_{XY}/GSD	RMSE_Z/GSD
0.65	0 PA	0.60	0.77
	5 PA (XYZ)	0.45	0.78
	38 PA (Z)	0.60	0.32

Tabla 2.16. Resultados experimentales para la ADS80 en AT utilizando 20 PCh (Berggren, 2010).

A la vista de los resultados de la Tabla 2.16 podemos ver como para las configuraciones estándar, 0 y 5 puntos de apoyo, los resultados obtenidos concuerdan con los anteriormente mencionados en Schreiber (2008). Sin embargo y al aumentar el número de puntos de apoyo fijando la componente

altimétrica (tercera configuración), se obtienen resultados del orden de 0.32 veces el tamaño del GSD para la componente altimétrica, manteniéndose la componente planimétrica igual que en el caso de no utilizar puntos de apoyo. Esto pone de manifiesto que las precisiones externas en los procesos de aerotriangulación para la cámara ADS80 mejoran al aumentar el número de puntos de apoyo, obteniéndose valores por debajo del tamaño del GSD.

2.3. ACERCAMIENTOS A LOS DIFERENTES TEST EMPÍRICOS DE AUTO-CALIBRACIÓN

Del mismo modo que se hizo para los test empíricos de aerotriangulación se muestra a continuación los resultados obtenidos en los diferentes test empíricos de autocalibración.

En algunos de los vuelos aerotriangulados, tanto para la primera como para la segunda generación, se realizan distintas pruebas introduciendo al ajuste del bloque los parámetros internos del sensor, por lo que muchos de los resultados aquí presentados corresponden a los vuelos estudiados en el apartado anterior.

2.3.1. ADS40 SH40. PRIMERA GENERACIÓN

Recuérdese que los datos de la ADS40 tratados en la segunda fase del proyecto del EuroSDR, se obtienen el 26 de junio del 2004 sobre el campo de pruebas de Alemania, Vaihingen/Enz (del Instituto de Fotogrametría, IFP, de la Universidad de Stuttgart). Los resultados geométricos de autocalibración de la cámara ADS40 en este vuelo, en el procesamiento del IFP son: para el vuelo bajo, GSD de 0.18 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.051 m y un $RMSE_Z$ de 0.057 m, y para el vuelo alto, GSD de 0.26 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.087 m y un $RMSE_Z$ de 0.087 m.

Recuérdese cuales son los valores obtenidos sin autocalibración:

- Para el vuelo bajo, GSD de 0.18 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.08 m, y un $RMSE_Z$ de 0.08 m.

- Para el vuelo alto, GSD de 0.26 m, se obtiene un $RMSE_{XY}$ de 0.09 m, y un $RMSE_Z$ de 0.10 m.

Por tanto, y a la vista de los datos (Tabla 2.17), se observa que al aplicar autocalibración los resultados del vuelo bajo mejoran en un factor de 0.67 veces la componente planimétrica y en un factor de 0.74 veces la componente altimétrica. Sin embargo, para el vuelo alto estas mejoras son insignificantes.

GSD [m]	Aerotriangulación		Autocalibración	
	$RMSE_{XY}/GSD$	$RMSE_Z/GSD$	$RMSE_{XY}/GSD$	$RMSE_Z/GSD$
0.18	0.42	0.43	0.28	0.32
0.26	0.34	0.38	0.33	0.33

Tabla 2.17. Resultados experimentales por el IFP para la ADS40 SH41 (Cramer, 2009).

El software del ETH varía el número de parámetros adicionales para el cálculo de la autocalibración. De estos parámetros adicionales, 6 describen el comportamiento de la lente y son únicos para todo el plano focal (corrección en la longitud de la focal, 3 parámetros para la distorsión radial y 2 parámetros para la distorsión tangencial). El resto de parámetros son relativos a cada una de las líneas CCD y consisten en un desplazamiento con respecto al punto principal, un factor de escala y un parámetro de corrección de la inclinación de la línea CCD en la dirección perpendicular a la de vuelo. En términos medios se obtiene un resultado para los errores medios cuadráticos de la precisión externa del vuelo bajo de $RMSE_{XY}$ de 0.05 m y un $RMSE_Z$ de 0.06 m, valores consistentes con los obtenidos por IFP. De los cálculos del ETH se observa que el uso de parámetros adicionales durante el ajuste mejora la precisión geométrica en la componente horizontal.

La UoP realiza sólo la autocalibración para el vuelo con GSD de 0.18 m obteniendo para la componente planimétrica un error medio cuadrático de 0.07 m, y un error medio cuadrático altimétrico de 0.07 m. Lo que supone un valor de 0.34 veces el GSD para la componente planimétrica y 0.37 veces el GSD para la altimétrica.

Por tanto, y finalizada la 2ª fase del proyecto *Digital Camera Calibration & Validation*, en términos generales las precisiones externas obtenidas para la ADS40 son bastante altas. Los valores medios de los errores medios cuadráticos obtenidos en los casos de autocalibración están entre 1/4 - 1/5 de GSD para la componente horizontal y 1/3 para la componente vertical. Los parámetros internos durante el ajuste mejoran ligeramente los resultados y puede ser más visible esta mejora en la componente horizontal (Cramer, 2009).

De entre las pruebas empíricas realizadas por la Comunidad Científica posteriores al proyecto *Digital Camera Calibration & Validation*, podemos volver a citar a Casella et al., (2007, 2008) y a Kocaman et al., (2006, 2008).

Junto con los resultados de aerotriangulación de la ADS40 de primera generación Casella et al., (2007a) presentan los resultados al aplicar autocalibración del vuelo a 2000 m de altura (GSD de 0.20 m) sobre el campo de pruebas de Pavia, Italia.

Del mismo modo que con la aerotriangulación, el ETH vuelve a utilizar dos de los modelos matemáticos para el ajuste del bloque (DGR y LIM) y la Universidad de Pavia utiliza el software comercial ORIMA. Los resultados de las pruebas (Tabla 2.18) son evaluados en términos de precisión interna (σ_0) y precisión externa ($RMSE_{XY}$, $RMSE_Z$ de los puntos chequeados) variando de 5 a 12 los puntos de apoyo utilizados para testear algún cambio significativo.

Universidad de Pavia				
Modelo	PA / PCh	Sigma0 [μm]	RMSE _{XY} [m]	RMSE _Z [m]
SELF	5 / 41	2.3	0.05	0.09
SELF	12 / 34	2.3	0.05	0.06
ETH Zurich				
Modelo	PA / PCh	Sigma0 [μm]	RMSE _{XY} [m]	RMSE _Z [m]
DGR SC*	5 / 41	2.57	0.06	0.09
DGR SC*	12 / 34	2.56	0.04	0.05
LIM-4 SC*	5 / 41	2.55	0.06	0.12
LIM-4 SC*	12 / 34	2.55	0.04	0.06
LIM-18 SC*	5 / 41	2.47	0.11	0.14
LIM-18 SC*	12 / 34	2.47	0.07	0.08

Tabla 2.18. Resultados experimentales en Casella et al., (2007a). SELF: modelo matemático que involucra una transformación de Datum, calcula el desalineamiento entre el IMU y la cámara y recalcula los parámetros internos del sensor. SC*: Incorporación al ajuste del bloque (DGR o LIM) los parámetros internos del sensor.

Los resultados tanto para la Universidad de Pavia como para el ETH Zürich, mejoran al aplicar autocalibración. Para la Universidad de Pavia los mejores resultados son obtenidos con 12 puntos de apoyo, los valores en los errores medios cuadráticos son 0.05 m en planimetría y 0.06 m en altimetría, lo que equivale respectivamente a 0.25 y 0.3 veces el GSD. Para los resultados obtenidos en Zürich el modelo más simple con 12 puntos de apoyo es suficiente para conseguir los mismos resultados e incluso algo mejores, 0.20 veces el tamaño del GSD para la planimetría y 0.25 para la altimetría. De todos estos estudios Casella et al., (2007a), concluye que la precisión externa mejora en los casos en los que se aplica autocalibración y que el incorporar 12 puntos de apoyo en lugar de 5 también mejoran los resultados.

En Casella et al., (2007b) se realizan los estudios sobre los otros dos vuelos sobre el campo de pruebas de Pavia (4000 y 6000 m). En el vuelo a 6000 m de altura es necesaria la autocalibración para conseguir resultados aceptables y estos mejoran al pasar de 5 a 12 puntos de apoyo. En el caso resuelto con 12 puntos de apoyo se obtienen errores medios cuadráticos planimétricos de 0.15 veces el GSD y 0.25 para la altimetría. La mejora más significativa al utilizar más puntos de apoyo es en la componente altimétrica. En el vuelo a 4000 m de altura se observa un comportamiento similar, aunque en este caso la incorporación de más puntos de

apoyo no mejora sustancialmente los resultados. En este caso, se obtienen errores medios cuadráticos planimétricos de 0.16 veces el GSD y 0.30 para la altimetría. La conclusión general en este estudio es que con la ADS40 de la primera generación es necesario realizar una autocalibración para obtener resultados aceptables y que esta juega un papel fundamental requiriendo un modelo específico para este tipo de cámaras.

Recuérdese que Casella y Franzini (2008) continúan estudiando el mismo vuelo analizando los errores sistemáticos combinando las vistas de una pasada dos a dos: nadir/hacia atrás, nadir/hacia delante y hacia atrás/hacia delante. En este estudio también se realiza un nuevo ajuste utilizando los ficheros de calibración obtenidos tras la autocalibración, con lo que pretende un aumento de la precisión en los resultados tras la aerotriangulación. Es decir, se aerotriangula el vuelo a 2000 m de altura utilizando los ficheros de calibración facilitados por el fabricante. Posteriormente se autocalibra dichos datos obteniendo un nuevo fichero de calibración. Con este nuevo fichero, se procede a realizar la misma aerotriangulación inicial y se comparan los resultados obtenidos. Este estudio demuestra que la precisión mejora al utilizar los nuevos ficheros de calibración. De obtener 1.53 veces el GSD para la componente planimétrica y 1.41 veces el GSD para la componente altimétrica, se pasa a obtener 0.34 veces el GSD para la planimetría y 0.47 para la altimetría al utilizar los nuevos ficheros de calibración (Tabla 2.19).

Fichero de calibración inicial				
Modelo	PA / PCh	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]
DG	0 / 46	0.120	0.093	0.643
BASIC	12 / 34	0.217	0.215	0.282
Fichero de calibración obtenidos tras la autocalibración				
Modelo	PA / PCh	RMSE _x [m]	RMSE _y [m]	RMSE _z [m]
DG	0 / 46	0.122	0.080	0.138
BASIC	12 / 34	0.059	0.033	0.094

Tabla 2.19. Resultados experimentales en Casella y Franzini (2008). DG: resultados medidos sobre los parámetros de orientación externa directa. BASIC: aerotriangulación de los datos incorporando puntos de apoyo y el vector excentricidad GPS-cámara.

En Kocaman et al., (2008), se estudia la autocalibración sobre el vuelo a 1500 m realizado sobre el campo de test de Vaihingen/Enz. El modelo funcional de la autocalibración utilizado para los sensores lineales es descrito en Kocaman et al., (2006). Los resultados obtenidos tras el ajuste introduciendo los parámetros internos del sensor muestran que los resultados en la precisión externa mejoran ligeramente en planimetría al igual que lo hace la precisión interna del ajuste (σ_0). Del mismo modo se estudian los vuelos a 4000 m y a 2000 m sobre el campo de pruebas de Pavia. En este caso los resultados sin calibración muestran grandes errores sistemáticos que son corregidos al aplicar la autocalibración haciendo disminuir los errores medios cuadráticos obtenidos. El hecho de aumentar el número de puntos de apoyo en la autocalibración no mejora los resultados y finalmente se obtienen valores de 0.2 veces el GSD para la planimetría y 0.25 para la altimetría para el mejor de los casos en el vuelo a 2000 m, y de 0.2 veces el GSD y 0.3 veces el GSD en planimetría y altimetría respectivamente para el vuelo a 4000 m. Por tanto, en cualquier caso el uso de la autocalibración mejora los resultados.

2.3.2. ADS40 SH51/52. SEGUNDA GENERACIÓN

En relación a la ADS40 de segunda generación se puede señalar el proyecto DGPF, en el que la Universidad de Stuttgart (US) evalúa los dos vuelos a distinta altura tomados con la ADS40 sobre el campo de pruebas Vaihingen/Enz. En cada uno de los vuelos utiliza 4 puntos de apoyo y examina la precisión externa a través de 121 puntos de chequeo para el vuelo con GSD de 0.080 m y 182 puntos de chequeo para el vuelo con GSD de 0.200 m. Tal y como se citó al hablar de la aerotriangulación, los análisis de esta cámara ofrecen muy buenos resultados, sin embargo según señala Cramer (2010), los campos de prueba tienen una superficie limitada por lo que extrapolar estos buenos resultados a áreas más grandes y proyectos bajo condiciones ambientales no tan controladas es difícil y arriesgado. Además sus conclusiones hacen hincapié en el requerimiento de un software especial para el procesamiento de los datos, que aún no está al alcance

de todos.

Hasta aquí todos los autores estudian la influencia de la autocalibración en la precisión externa de los datos, analizan la posible existencia de algún error sistemático en la georreferenciación asociado al cómputo del GNSS y la manera de minimizarlo, el rendimiento de la ADS40 sin y con autocalibración o la calibración del desalineamiento del IMU.

Por su parte, Xinru y Miaozhong (2010), pretenden generar un fichero de calibración suficiente para generar resultados óptimos basado en un campo de pruebas. Todos los datos del experimento son proporcionados por la Universidad de Wuhan, incluyendo el vuelo de calibración sobre el campo de pruebas de Songshan en agosto del 2009, y los puntos de apoyo tomados con una precisión de 1 cm. Los autores hacen notar que mientras el vuelo es adquirido en el 2009, el fichero de calibración proporcionado por el fabricante data de febrero del 2007. El trabajo consiste en realizar la aerotriangulación y autocalibración del vuelo con el fichero inicial de calibración. Se observa que al aplicar la autocalibración los resultados mejoran indicando la necesidad de una nueva calibración de la cámara. Por ello se genera un nuevo archivo de calibración que una vez comparado con el original se utiliza para verificar si es suficiente y fiable.

Para realizar esta comparación se utilizan dos conjuntos de datos (en adelante datos A y datos B) y cada uno de ellos se aerotriangula variando el número de puntos de apoyo utilizados (0, 5 y 9 puntos de apoyo):

- Datos A: tres pasadas voladas en ambas direcciones con una altura de vuelo de 600 m, y un solape transversal del 70%. 55 puntos medidos y distribuidos por toda la zona de trabajo.
- Datos B: cinco pasadas con una altura de vuelo de 1000 m, y un solape transversal del 60%. En esta zona se distribuyeron y midieron 94 puntos.

Datos A				
Calibración	PA / PCh	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _Z [m]
V001	0 / 55	0.140	0.301	0.298
	5 / 55	0.121	0.215	0.329
	9 / 55	0.136	0.191	0.192
V002	0 / 55	0.019	0.026	0.132
	5 / 55	0.010	0.015	0.029
	9 / 55	0.010	0.015	0.022
Datos B				
Calibración	PA / PCh	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _Z [m]
V001	0 / 94	0.227	0.338	0.241
	5 / 94	0.194	0.290	0.350
	9 / 94	0.161	0.288	0.273
V002	0 / 94	0.033	0.029	0.088
	5 / 94	0.023	0.024	0.043
	9 / 94	0.018	0.019	0.039

Tabla 2.20. Resultados experimentales en Xinru et al., (2010). V001: fichero de calibración inicial. V002: fichero de calibración obtenido tras el proceso de autocalibración.

A la vista de estos resultados (Tabla 2.20) se verifica la necesidad de una nueva calibración para los datos, ya que con el nuevo fichero generado (V002) los dos conjuntos de datos arrojan mejores resultados.

En los Datos A se obtienen precisiones externas planimétricas de 0.270 m para los casos resueltos con el fichero de calibración inicial pasando a 0.023 m para los casos resueltos con el fichero de calibración nuevo. Para la altimetría esta mejora también es bastante significativa, pasando de 0.273 m a 0.061 m.

En los Datos B las precisiones externas planimétricas obtenidas para los casos resueltos con el fichero de calibración inicial son de 0.362 m, pasando a 0.034 m para los casos resueltos con el fichero de calibración nuevo. Para la altimetría los resultados son de 0.288 m a 0.057 m.

Más recientemente, Fuchs y Adigiuel (2010) establecen un nuevo flujo de trabajo para la autocalibración de la cámara barredora de Leica. Se toman para el estudio un vuelo en cruz a dos alturas y volado de este a oeste (E-W) y de oeste a este (W-E). El flujo de trabajo comienza con la extracción automática de un esquema bastante denso de puntos de paso. En cada una de las iteraciones de la

autocalibración los residuos de los puntos de paso son analizados para cada línea CCD. Es decir, se obtienen las fotocoordenadas de los puntos de paso y se representan de manera individual las fotocoordenadas x e y asociándolas el vector de error que corresponda según el valor obtenido para cada punto de paso en la autocalibración. Esta representación se traduce en una nube densa de puntos en la que podemos determinar la bondad de la extracción de los puntos de paso según se ajusten a una spline, curva diferenciable definida en porciones mediante polinomios. De esta manera se podrá asignar el peso que le corresponde, según la distancia a la curva ajustada, a cada uno de los puntos de paso para la siguiente iteración de la autocalibración. Se obtiene que mejorando esta extracción automática de puntos, mejoran los resultados en la autocalibración además de los tiempos en las iteraciones y el número de ellas.

Actualmente, no se conoce ningún test empírico que estudie la importancia o no de la autocalibración en los datos generados con la tercera generación de la cámara de barrido de Leica, ADS80.

A continuación se presentará una síntesis de las precisiones externas obtenidas en los procesos de aerotriangulación y autocalibración para cada una de las generaciones del sensor ADS40 y sus principales conclusiones.

2.4. SÍNTESIS DE LAS PRECISIONES EXTERNAS OBTENIDAS EN LOS TEST EMPÍRICOS

A continuación se muestra el caso más favorable y el menos favorable de todos los resultados obtenidos en los procesos de aerotriangulación, tanto para la ASD40 de primera y segunda generación, como para la ADS80 (Tabla 2.21). A la vista de estos resultados, se puede concluir que en la mayoría de los casos la componente altimétrica obtiene mejores resultados que la planimétrica. Promediando estos valores se observa que en los procesos de aerotriangulación para la ADS40 SH40 (primera generación) se obtienen valores de precisión

externa de 0.91 veces el GSD para planimetría y 0.53 veces el GSD para altimetría. Para la ADS40 SH51/52 (segunda generación), los valores promedios obtenidos son de 0.89 veces el GSD para la componente planimétrica y 0.66 veces el GSD para la altimetría. Y finalmente, para la ADS80 SH81/82 (tercera generación), se obtienen valores de 0.54 veces el GSD para planimetría y 0.60 veces el GSD para altimetría.

Generación	Más Favorable		
	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD	Observaciones
ADS40 SH40	0.23	0.33	Cramer (2006) GSD 0.42 m
ADS40 SH51/SH52	0.34	0.31	Casella et al., (2008). GSD 0.20 m
ADS80 SH81/SH82	0.60	0.32	Berggren (2010) GSD 0.65 m
Generación	Menos Favorable		
	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD	Observaciones
ADS40 SH40	1.59	0.72	Casella et al., (2007b) GSD 0.20 m
ADS40 SH51/SH52	1.43	1.00	Yuan et al., (2008) GSD 0.06 m
ADS80 SH81/SH82	0.48	0.87	Schreiber (2008) GSD 0.10 m

Tabla 2.21. Síntesis de las precisiones externas de las cámaras barreadoras de Leica en los procesos de aerotriangulación.

En cuanto a los procesos de autocalibración, tal y como se ha ido citando a lo largo del desarrollo de los diferentes test empíricos, ésta es necesaria a la hora de trabajar con la ADS40 de la primera generación para obtener resultados aceptables. Prueba de esto es que la precisión externa obtenida en los procesos de aerotriangulación mejoran al utilizar los ficheros de calibración obtenidos tras los procesos de autocalibración tal y como citaban Casella y Franzini (2008).

Para la primera generación, se obtienen precisiones por debajo de 0.20 veces el tamaño del GSD para la componente planimétrica y de 0.25 para la altimétrica (Tabla 2.22), mejorando los resultados obtenidos en la aerotriangulación (0.91 veces el GSD para planimetría y 0.53 para altimetría). Sin embargo, estos resultados son valores promedios de los obtenidos para los vuelos resueltos sobre campos de prueba, por lo que no debe extrapolarse a proyectos de mayor cobertura, en condiciones ambientales naturales y por tanto, fuera de estos campos de prueba.

Primera generación		
Proyecto y/o investigación	RMSE_{XY}/GSD	RMSE_Z/GSD
Cramer (2009)	0.25-0.20	0.33
Casella et al., (2007a)	0.20	0.25
Casella et al., (2007b)	0.15	0.25
Casella y Franzini (2008)	0.34	0.47
Kocaman et al., (2008)	0.20	0.25
Segunda generación		
Proyecto y/o investigación	RMSE_{XY}/GSD	RMSE_Z/GSD
Xinru et al., (2010)	0.36	0.79

Tabla 2.22. Síntesis de los resultados experimentales para la autocalibración de la primera y segunda generación de la ADS40.

Del mismo modo, en los test empíricos realizados con la segunda generación también se concluye la necesidad de una autocalibración para alcanzar la mejor precisión posible. Además, y tal y como cita Xinru et al., (2010) surge la necesidad de realizar pruebas en el futuro que determinen la validez en el tiempo de los ficheros de calibración. Promediando los valores obtenidos por el autor (Tabla 2.20) se obtienen para la segunda generación valores de 0.36 veces el tamaño del GSD para la precisión externa planimétrica y 0.79 veces para la componente altimétrica (Tabla 2.22).

Por tanto, recapitulando la información referente a la autocalibración de la ADS40 de la primera y segunda generación podríamos concluir que la precisión externa planimétrica y altimétrica mejora al introducir en el ajuste los parámetros internos de la cámara. Sin embargo, y dado que hay pocos trabajos experimentales realizados para este tipo de cámaras, y los que hay no se realizan bajo las mismas condiciones, es difícil concluir qué precisiones externas se han de obtener para proyectos de vuelo con las cámaras de barrido de Leica Geosystems.

3 CAPÍTULO III - ADS40/ADS80

CAPÍTULO III

CARACTERIZACIÓN GEOMÉTRICA DE LA CÁMARA DE BARRIDO ADS40/ADS80

3.1. INTRODUCCIÓN

En el capítulo introductorio de esta Tesis Doctoral se citan las dos grandes familias de sensores digitales que conviven hoy día en el mercado, sensores matriciales y sensores lineales, y se hace un breve recorrido en la historia de la fabricación de este último tipo de sensores, ya que la cámara de estudio, ADS40, corresponde a este grupo.

En este apartado se mostrará con más detalle los distintos tipos de sensores lineales que se han utilizado y/o se siguen utilizando hasta llegar al más novedoso de los sistemas, ADS80. En la siguiente tabla se muestra una clasificación de los sensores de barrido con capacidad estereoscópica según la plataforma sobre la cual son montados (Tabla 3.1).

Plataforma	Sensor	Fabricante	Año	Observaciones
Satelital	SPOT	CNES	1986	SPOT 5 adquiere pares estereoscópicos HRS
	IRS	ISRO	1988	IRS-P5 dispone de dos sensores para estereoscopía longitudinal.
	WAOSS	DLR	1996	Desarrollado para la misión Rusa Mars-96
	MOMS	DLR	1996	MOMS-2 consta de tres sensores para estereoscopía longitudinal.
	IKONOS	Spacelimage	1999	Satélite comercial. Estereoscopía longitudinal y transversal.
	ASTER	NASA	1999	Estereoscopía longitudinal (inclinaciones: 0°, 27.6°).

	QuickBird	DigitalGlobe	2001	Dos sensores: pancromático y multiespectral.
Aeronaves	DPA	DLR	1994	Digital Photogrammetric Assembly. No comercial.
	HRSC	DLR	1996	Nueve sensores paralelos montados sobre el plano focal
	WAAC	DLR	1997	Gran formato. Basada en el concepto de WAOSS.
	ADS40 1nd	LeicaGeosystems & DLR	1998	1ª cámara comercial de gran formato
	3-DAS-1	Wehrli&Associates y Geosystems	2004	Medio formato. Solo RGB
	4-DAS-1	Wehrli&Associates y Geosystems	2004	Medio formato. RGB y NIR
	3-OC	Wehrli&Associates y Geosystems	2006	Oblicua
	JAS-150	Jena-Optronik	2006	Nueve sensores lineales en tres planos focales.
	ADS40 2nd	Leica Geosystems	2006	Introduce SH51/52
	ADS80	Leica Geosystems	2008	SH81/82
Helicóptero	TLS	STARLABO	2000	SI-100, SI-250, SI-290 y SI-2900

Tabla 3.1. Tipos de sensores lineales según plataforma.

Las imágenes extraídas de la teledetección espacial tienen, entre otras, las siguientes características: cobertura mundial, poder de síntesis gracias a la dimensión de las superficies cubiertas y repetibilidad. De entre estas, por ejemplo las imágenes del SPOT (Tabla 3.1) permiten el estudio de fenómenos que evolucionan a través del tiempo y el espacio y sus tres grandes ámbitos de aplicación son la defensa, la agricultura y la cartografía. Otra familia de satélites espaciales son los de la serie IRS, *Indian Remote Sensing Satellite*, que disponen de tres sensores: una cámara pancromática de alta resolución de un solo canal, un sensor LISS-III (*Linear Imaging Self-Scanning Sensor*) y un sensor WiFS (*Wide Field Sensor*) con dos canales de baja resolución. Se podría seguir citando las principales características de este tipo de sensores pero el objetivo de este punto es centrarse en como la fotogrametría aérea hereda el planteamiento de captura de información mediante barrido, abriéndose un gran reto debido a la geometría y

rango espectral disponible por este tipo de sensores.

La estereoscopía es un requisito indispensable en las imágenes aéreas para poder obtener la elevación del terreno (coordenada Z). Las imágenes tomadas por satélites son estereoscópicas cuando se realiza un mínimo de dos barridos simultáneos: uno normal (vertical) y otro oblicuo. En general se habla de toma oblicua cuando el eje óptico no es vertical. La geometría estereoscópica oblicua puede realizarse de dos formas: lateral o longitudinal (Sandau, 2004).

En el caso de geometría estereoscópica lateral (*across-track*) las imágenes se obtienen desde dos órbitas próximas pero distintas, generalmente una imagen se toma desde un punto de vista cenital y normal a la superficie mientras que la otra será oblicua a la trayectoria orbital (Quirós et al., 2005). Esta geometría implica que el sensor tiene la capacidad de giro lateral (perpendicular a la trayectoria orbital). Este tipo de geometría fue la primera que se usó en datos espaciales y en concreto fue el caso del satélite SPOT (sensor HRS) (Bernard, 2001).

En la geometría estereoscópica longitudinal (*along-track*) las imágenes se obtienen desde posiciones sucesivas en la misma órbita, siendo una de ellas cenital y la otra oblicua, bien hacia delante, bien hacia atrás (o ambas en algún caso). Un ejemplo de esta geometría es el TERRA-ASTER, con una toma cenital y otra oblicua hacia atrás, mientras que el MOMS-2 posee tres tomas simultáneas: adelante, cenital y atrás (Quirós et al., 2005).

En cuanto a los primeros sensores aéreos de barrido con capacidad estereoscópica utilizados en aplicaciones aéreas podemos citar a los del Centro Aeroespacial Alemán (DLR) como el WAAC, *Wide Angle Airborne Camera* (Boerner et al., 1997), la DPA, *Digital Photogrammetric Assembly* (Haala et al., 1998) y la HRSC, *High Resolution Stereo Camera* (Wewel et al., 1999). Si bien ninguno de estos sensores eran comerciales, el primer sensor lineal comercial de gran formato montado sobre aeronave fue desarrollado por LH Systems y el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) en 1998 (Sandau et al., 2000) y no es otro que la

cámara de barrido lineal ADS40 (primera generación). Como podemos ver en la Tabla 3.1, Leica Geosystems anuncia la segunda generación de esta cámara a finales del 2006 y en el 2008 lanza la ADS80, su tercera generación, un sensor superior a cualquiera de los otros sensores aéreos disponibles en la actualidad.

Volviendo al año 2000 y posterior a la ADS40 de primera generación, *Starlabo Corporation* desarrolla junto con el Instituto de Ciencia Industrial de la Universidad de Tokio, un sistema aéreo “*Three-Line-Scanner*” (TLS) montado sobre helicóptero, llamado STARIMAGER (Murai y Matsumoto, 2000). Este sistema es originalmente diseñado para registrar las características lineales (carreteras, ríos, ferrocarriles, líneas eléctricas, etc.) pero más tarde los test empíricos de sus datos revelan su posible uso en la cartografía en general y en aplicaciones de Sistemas de Información Geográfica (SIG). Desde su desarrollo hasta la actualidad se han ido presentando distintos modelos entre los que varía el número de líneas CCD y el número de píxeles por línea. Algunos de estos modelos son: SI-100, SI-250, SI-290 y SI-2900.

En 2004, aparece un nuevo escáner digital fotogramétrico de medio formato, el 3-DAS-1, basado en el trabajo realizado en colaboración entre Roman & Associates y Geosystem (Wehrli et al., 2004). El 3-DAS-1 registra tres canales RGB de forma simultánea y su aplicación más relevante ha sido la producción de ortoimágenes. De la misma familia de cámaras tenemos: el 4-DAS-1, 3-OC-1, 1-DAS-1 y el 3-DAS-2. El 4-DAS-1 incorpora un canal infrarrojo cercano (NIR) en el nadir junto a los tres canales RGB que ya disponía el 3-DAS-1, es más estable que este último y permite tres ángulos para generar la vista en estéreo: 16°, 26° y 42°.

En el año 2006, y en la misma colaboración entre Roman & Associates y Geosystem, se introduce una cámara oblicua lineal de medio formato denominada 3-OC. Esta cámara, junto con la 3-DAS-1, utiliza un sistema óptico para cada una de las vistas, hacia atrás, nadir y hacia delante, pero rígidamente

unidos entre sí. Esto hace necesario desarrollar un modelo fotogramétrico para tres cámaras diferentes, pero que se mueven juntas a lo largo de la trayectoria de vuelo.

Y por último y siguiendo a la 3-0C, el JAS 150 (*Jena Airborne Scanner*) es introducido en mayo del 2006 por Jena-Optronik en Alemania (Petrie, 2006). Cuenta con nueve CCDs, cada uno de ellos con 12000 píxeles y montados sobre tres planos focales, cuatro bandas multiespectrales y cinco líneas para la captura de datos pancromáticos, una con orientación nadiral y las otras cuatro con diferentes ángulos (Georgi et al., 2005).

De aquí en adelante, se centra el estudio en los sensores lineales de barrido de Leica Geosystems: ADS40/ADS80. En un primer lugar se realizará una visión general de dichos sensores para posteriormente indicar sus especificaciones, su calibración geométrica y su modelo funcional y estocástico.

3.2. CARACTERIZACIÓN DE LOS SENSORES AÉREOS DE BARRIDO. SENSORES ADS40/ADS80

Los CCDs lineales, o dispositivos de carga acoplada, *Charge-Coupled Device*, son los elementos básicos de los escáneres aéreos de barrido. La cobertura de barrido de estos escáneres en el terreno depende, además de la focal y de la altura de vuelo, de la longitud de estos CCDs lineales que pueden variar entre 4000 y 14000 detectores o píxeles (Petrie y Walker, 2007), siendo 12000 el mínimo para sensores aéreos de gran formato.

Por tanto, si un CCD consiste en una matriz de fotodetectores, es decir, una matriz de celdas sensibles a la luz, cada una de estas celdas corresponde a un píxel. El número total de píxeles que forman este CCD determinará, conocido el tamaño del píxel, junto con la focal y altura de vuelo, la cobertura de barrido en el terreno.

Como se cita en capítulos anteriores, los escáneres aéreos de barrido realizan una captura continua de la información, de manera que una imagen proporcionada por este tipo de sensores es muy diferente a una imagen convencional de cámara matricial. Una imagen de un escáner o sensor aéreo de barrido consiste en cientos o miles de líneas discretas colindantes entre sí tomadas en diferentes instantes de tiempo. Esta situación hace que no exista recubrimiento en la información y que por tanto no se pueda extraer datos estereoscópicos (por ejemplo, puntos de paso que permitan una aerotriangulación) según el método clásico de la fotogrametría. Por ello, el sensor debe estar compuesto de al menos dos CCDs lineales que formen junto con el objetivo de la lente dos ángulos que garanticen la intersección de rectas perspectivas. Dado que cada una de estas líneas discretas ha sido capturada desde posiciones distintas, tendrá distintos valores de orientación. Además, cada una de estas líneas puede verse afectada por los movimientos de la cámara durante el vuelo, problema que complica aún más el procesamiento de este tipo de imágenes y que hace necesario el uso de una plataforma giroestabilizadora sobre la cual va montada la cámara.

Para la adquisición de tiras de imágenes en color e infrarrojo el proceso se complica aún más, ya que se debe disponer de múltiples líneas CCDs paralelas entre sí disponiendo cada una de ellas de un filtro capaz de absorber la longitud de onda que corresponda, tal y como se detalla en el apartado correspondiente a las especificaciones del sistema óptico. De ahí que se haga obligatorio el uso de un equipo GNSS/IMU que permite modelizar la trayectoria completa, lo que encarece este tipo de sistemas.

Según Petrie (2006), hay tres grupos principales de cámaras aéreas de barrido:

- La cámara simple monocromática: equipada con un único CCD lineal que produce una imagen continua del terreno y se utiliza principalmente para tareas de reconocimiento militar. Son de diseño relativamente sencillo y generalmente utilizan la parte del visible o del infrarrojo cercano del espectro.

- Las cámaras multiespectrales o de color: equipadas con una matriz de tres CCDs lineales para producir imágenes continuas del terreno en RGB. Estas cámaras también son utilizadas principalmente para reconocimiento militar.
- Cámaras de tres líneas CCDs o trilineales: constan de tres CCDs lineales pancromáticos, cada uno de ellos con una inclinación distinta para registrar el terreno desde tres puntos de vista distintos y así poder generar modelos estereoscópicos, modelos digitales del terreno y ortoimágenes con fines cartográficos. Generalmente, la inclinación de estos CCDs lineales se dispone de tal forma que se obtiene dos vistas oblicuas (hacia atrás y hacia delante) y otra nadiral. En este último tipo de cámaras también se puede incorporar en el plano focal CCDs lineales adicionales para el registro de imágenes de color y de infrarrojo. El principio del diseño de las tres líneas CCDs se atribuye, a menos en su manifestación digital, al alemán Hoffman en la década de 1970 (Fricker, 2001).

Como es bien sabido, durante más de 25 años, el Centro Aeroespacial Alemán (DLR) ha estado en la vanguardia del desarrollo de la tecnología de este tipo de sensores junto con empresas comerciales asociadas como MBB (*Messerschmitt Bölkow Blohm*) o DASA (*Deutsche Aerospace AG*) (Petrie y Walker, 2007). De este modo, y a finales de la década de 1990, Leica Geosystems utilizando toda la tecnología y experiencia adquirida por el DLR, crea su propio escáner aéreo de barrido de tres líneas: la ADS40 (*Airborne Digital Sensor*). Esta cámara representó una importante innovación dentro del mundo de la fotogrametría, fue diseñada para satisfacer las necesidades geométricas y permitir la captura de imágenes multiespectrales.

Dentro de la clasificación expuesta por Petrie (2006), la ADS40 se incluye entre las cámaras de barrido trilineales. Es decir, el principio en el que se basa su sistema de imagen estéreo consiste, tal y como se ha visto, en que la cámara del avión, que sigue una trayectoria recta, va tomando tres imágenes: una hacia

delante (*forward*), otra vertical (nadir) y la última hacia atrás (*backward*).

Debido a este principio de adquisición, todos los objetos del terreno serán registrados por triplicado (Fig. 3.1), es decir, un punto P' del terreno aparecerá registrado tanto en la imagen *forward* (P_F), como en la *backward* (P_B) y en la nadiral (P_N).

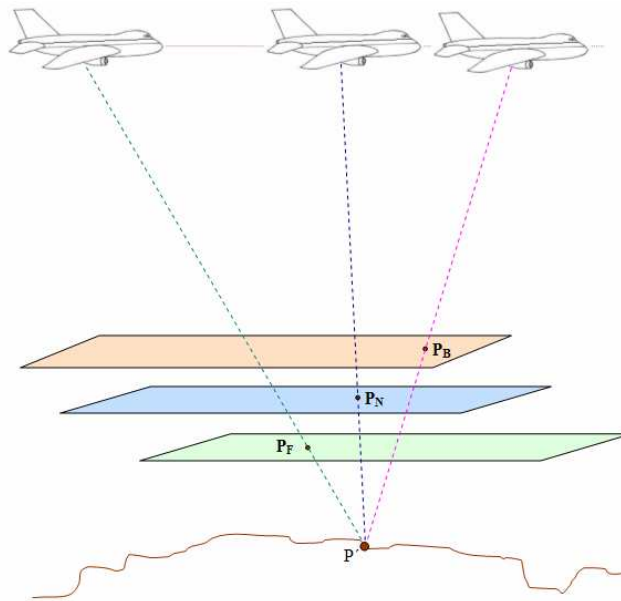


Fig. 3.1. Principio de adquisición de imágenes de la ADS40/80.

El uso de las imágenes por pasada en todo el proceso fotogramétrico es una de las mayores ventajas del uso de los CCDs lineales con distinta inclinación, ya que el manejo de estas imágenes en grandes bloques reduce el tiempo de procesamiento, haciendo este más fácil y seguro. Pero a esta ventaja se le asocia las dificultades en los modelos matemáticos y en los sistemas de coordenadas empleados para la resolución del ajuste de haces, ya que el uso de los CCDs lineales en fotogrametría aérea hereda el planteamiento de los sensores de barrido de teledetección y esto hace necesario replantearse el método de la fotogrametría clásica.

Podríamos por tanto definir la ADS40 como el primer sensor fotogramétrico

digital trilineal, y comercial, de gran formato desarrollado por Leica Geosystems en colaboración con la Agencia Espacial Alemana, DLR, capaz de adquirir imágenes multiespectrales en la región del visible (RGB) y del infrarrojo próximo (IR).

En la primera generación de este sensor, ADS40 SH40 (Tabla 3.2), cada una de las tres líneas (hacia atrás, nadir y hacia delante) consistía en un par de CCDs lineales colocados en paralelo, con uno de los CCD desplazado lateralmente medio píxel respecto del otro, de manera que se conseguía duplicar la resolución nominal del sensor en la dirección transversal a la trayectoria. También fueron montados en el plano focal cuatro CCDs lineales simples (no dobles) de 12000 píxeles, para formar las bandas RGB e IR. Tal y como se citará más adelante se hace necesario el uso de un *beam splitter* (tricroide) para separar la información de cada banda.

Parámetros del sensor ADS40 SH40	
Configuración del plano focal	10 arrays CCD: - 3 x 2 CCD lineales pancromáticos de 12000 píxeles - 4 CCD lineales multiespectrales de 12000 píxeles Ángulos en estéreo: 14°, 28°, 42°.
Tamaño del array	12000 píxeles
Focal	62.77 mm
Tamaño del píxel	6.5 x 6.5 micras
FOV (campo de visión)	64°

Tabla 3.2. Características técnicas del sensor ADS40 SH40.

En general, los avances tecnológicos en materiales y aleaciones, las nuevas técnicas de construcción, la evolución de micro-filtros, y la tecnología de diseño electrónico y poder de cómputo entre otros, hacen posible que realizadas las pertinentes revisiones conceptuales sobre la ADS40 SH40, Leica Geosystems continuara con la línea de cámaras de barrido presentando en 2006 y en 2008 otros dos nuevos modelos de esta cámara (Fig. 3.2).

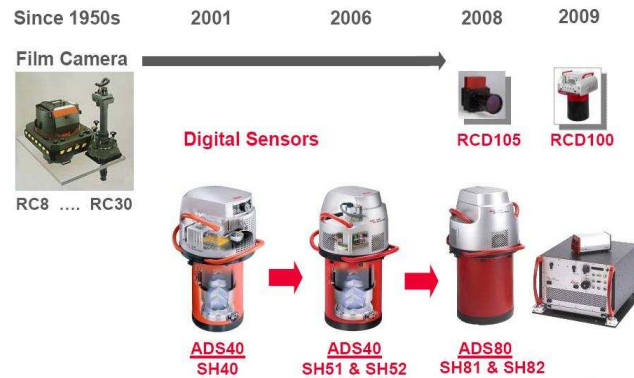


Fig. 3.2. Sensores aéreos de Leica Geosystems (Arthur R., 2010).

Por tanto, y como se viene mencionando, a finales del 2006, Leica Geosystems anunció la segunda generación de la cámara de barrido ADS40. Se introducen dos sensores nuevos, SH51/52, ambos físicamente más pequeños que el original sensor SH40 (primera generación). Otro cambio importante en el sensor ADS40 es el cambio de los componentes GNSS/IMU de Applanix POS/AV (*Position Orientation System*) a un sistema propio, IPAS10 (*Inertial Position & Attitude System*) (Tempelmann y Hinsken, 2007).

En el 2008 se continúa elevando el listón y aparece la nueva cámara de barrido Leica ADS80, un sensor superior a cualquiera de los otros sensores aéreos de gran formato disponibles en la actualidad. La ADS80 dispone de dos nuevos sensores SH81/82, capaces de adquirir con la misma resolución datos pancromáticos, en color y en infrarrojo, obteniendo mejores resultados, mayor productividad y menores costes. De entre sus características se puede citar: la simplicidad tanto en la planificación del vuelo como en la entrega de datos totalmente automatizado, la flexibilidad en todas las aplicaciones tanto de fotogrametría como de teledetección, esta última gracias a la posibilidad de obtener magnitudes físicas a partir de los niveles de gris una vez realizada su calibración radiométrica, una mayor productividad debido a un rápido flujo de trabajo, y una mayor fiabilidad y eficiencia debido a la estrecha integración de todos sus componentes. En pocas palabras, con la nueva Leica ADS80 se puede

llegar a mejores resultados mucho más rápido y a un coste más bajo.

Junto con este último sensor se desarrolló un nuevo flujo de trabajo, Leica XPro, solución más productiva para la generación de la imagen digital. Esta última generación fue anunciada por Leica Geosystems en el XXI Congreso de la Asociación Internacional de la Fotogrametría y Teledetección (ISPRS) de Pekín (Heerbrugg, 2008).

A continuación se mostrarán las características y especificaciones de la cámara de barrido de Leica Geosystems haciendo mención a las mejoras significativas entre cada una de las generaciones de esta cámara.

3.3. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA ÓPTICO

Independientemente de la clasificación expuesta por Petrie (2006) y en base al sistema óptico utilizado por las cámaras de barrido, podemos diferenciar dos tipos: de una sola lente o de múltiples lentes.

La cámara aérea de barrido de este estudio, la ADS40/ADS80, dispone de una única lente con lo que la captura en estéreo se hace posible gracias a la disposición de varios CCDs lineales sobre el plano focal.

Tanto la ADS40 como la ADS80 llevan incorporado un objetivo telecéntrico DO64 (Fig. 3.3) capaz de mantener la respuesta espectral en los extremos del CCD, es decir, realiza una transmisión constante en todo el campo de visión con lo que se convierte en un sensor adecuado para la teledetección. Pero el sistema óptico no está formado únicamente por este objetivo telecéntrico, en los distintos cabezales de la ADS40/80 se entrelazan una serie de dispositivos que confieren a la cámara el conjunto de especificaciones radiométricas que lo hacen tan apropiado para aplicaciones de teledetección.

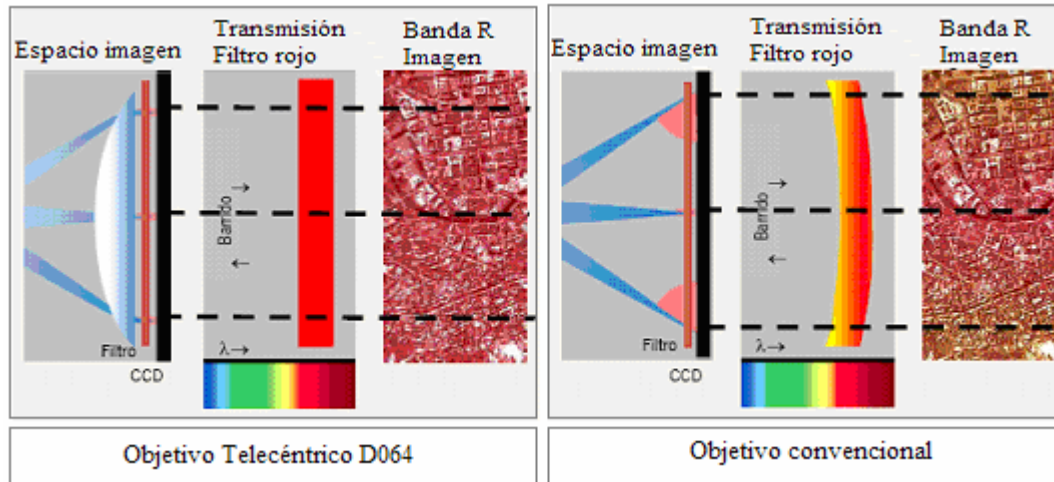


Fig. 3.3. Esquema de funcionamiento del objetivo telecéntrico y del convencional (Delgado J., s.a.).

En cuanto al cabezal SH40 de la ADS40 de la primera generación, un dispositivo llamado tricroide (Fig. 3.4), consistente en un divisor de haz diseñado para minimizar la pérdida de energía, asegura que los CCDs encargados del registro RGBN detecten la luz procedente de la misma franja de terreno. Dicho dispositivo consta de un juego de filtros de interferencia y prismas de modo que, un haz de luz incidente es dividido en tres rayos que se filtran, transmitiendo de forma homogénea y en un rango limitado de longitudes de onda, hacia los elementos sensoriales diferenciados (los CCDs).

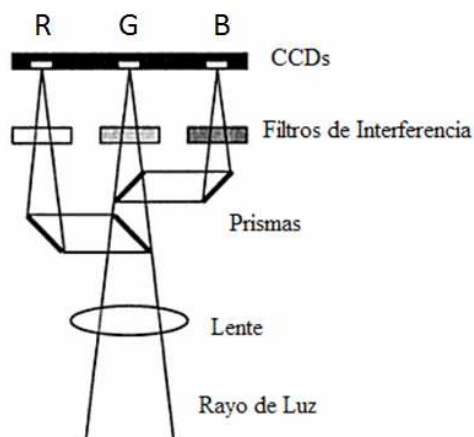


Fig. 3.4. Dispositivo tricroide con descomposición de la luz visible en los canales RGB.

El rendimiento de los CCDs y de los filtros se maximiza a través del uso de la lente telecéntrica que, como se muestra en la Figura 3.3, posibilita la incidencia ortogonal de los rayos ópticos.

Los diseños para la cabeza del sensor ADS40 de segunda generación y la ADS80, representan los avances en óptica, mecánica y electrónica entre los años del lanzamiento de la primera ADS40 y el año 2006.

En cuanto a la óptica, se desarrolla un divisor de haz que junto con filtros dicromáticos o de interferencia, permiten un control preciso de las longitudes de onda y anchos de banda, siendo capaz de ofrecer cinco bandas de alta resolución: pancromática, rojo, verde, azul e infrarrojo. Este dispositivo denominado tetracroide, sustituto del anterior tricroide o *beam splitter* en la ADS40 SH40, se localiza entre la óptica del sensor y los CCDs, y se considera el avance tecnológico más importante de este sensor (Casella et al., 2008).

En el tricroide del SH40 los filtros dicromáticos estaban separados 0.4 milímetros, en cambio en el tetracroide al situarse todos ellos sobre una placa de cristal plano-paralela, junto con el diseño del objetivo telecéntrico, se asegura que no hay distorsiones adicionales (Tempelmann y Hinsken, 2007).

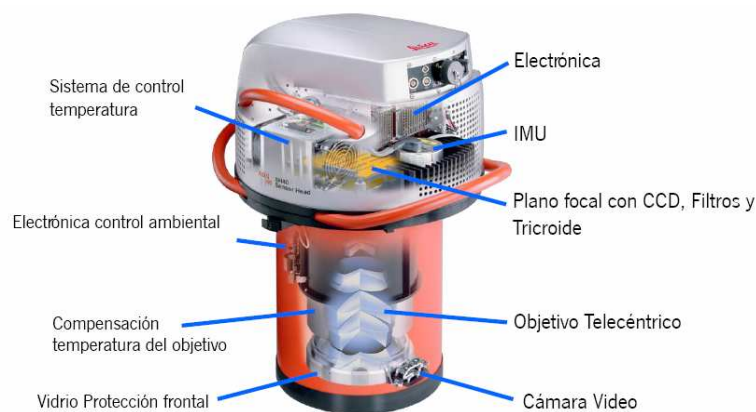


Fig. 3.5. Cabezal del sensor ADS40/ADS80 (Delgado J., s.a.).

Otros conceptos a tener en cuenta en el cabezal del sensor (Fig. 3.5) están relacionados con la mecánica y electrónica. Algunas de las principales mejoras realizadas sobre la segunda y tercera generación son citadas brevemente a continuación:

- El rápido desarrollo de la electrónica digital, especialmente en cuanto a la tecnología FPGA³, *Field-programmable Gate Arrays* (Bachofen et al., 2008), permite reemplazar el bastidor de la electrónica por una pequeña pila con cuatro placas (conversión A/D, procesamiento de la señal digital, energía e interfaz del IMU), a la vez que proporciona una mayor funcionalidad.
- El diseño mecánico de la SH40 era bueno con respecto a la estabilidad relativa del sistema de lentes, del plano focal y del IMU. Sin embargo, estaba limitado al uso de pequeños sistemas de IMU, y requería bastante espacio para la estructura compleja del plano focal y para el refrigerador del mismo. Esta limitación queda resuelta con la segunda generación, SH51/52, mediante la sustitución de la carcasa de cerámica del plano focal por una aleación de aluminio cuyo coeficiente de expansión térmico coincide con el del acero y posee un elevado índice de conducción térmica. De esta manera el completo sistema óptico-mecánico prácticamente se convierte en una única pieza, y el sistema de refrigeración Peltier para el plano focal puede ser integrado en el portador de aluminio de la cabeza del sensor (Tempelmann y Hinsken, 2007). Las mejoras mecánicas en el diseño básico de la ADS40 SH40 permitieron una integración más compacta y rígida de la plataforma

³ En principio llamadas LCA, Logia Cell Array, nacen en 1985 con una idea sencilla: un Gate Array tolerable a errores de diseño y programable o reprogramable por el usuario. La FPGA es un componente estándar (re)programable por el usuario. Esto implica que la interconexión debe ser (re)programable y las funciones lógicas y la E/S también deben ser (re)programables.

del IMU sobre el eje óptico, la cual soporta prácticamente todos los impactos posibles sin desviaciones significativas. Además, se permitió al usuario la elección de distintas unidades de IMU.

Con todas estas mejoras se amplía el campo de aplicación de la ADS40/80 en teledetección y fotogrametría de alta resolución ya que se consigue registrar las imágenes con un GSD de 0.050 m (Bachofen et al., 2008).

En cuanto al software, y en base a las mejoras electro-mecánicas de la segunda generación del sensor, se desarrollaron herramientas correspondientes a la evaluación y planificación del vuelo, FPES (*Flight Planning and Evaluation Software*) y el software correspondiente a la orientación y control durante el vuelo, FCMS (*Flight & Sensor Control Management System*) (Bachofen et al., 2008). En el año 2008, con el lanzamiento de la tercera generación, la ADS80, se desarrolla un nuevo software de procesamiento denominado XPro, capaz de obtener el producto final desde la descarga de datos en el menor tiempo posible en proyectos de mayor superficie (Leica Geosystems, 2008b).

Por otro lado, se les facilita a los usuarios inexpertos, mediante un vuelo a dos alturas con un patrón determinado, realizar la calibración del sistema mediante el ajuste del bloque (Saks y Tempelman, 2008). La configuración de este tipo de vuelos y el modelo matemático para la resolución de la calibración son explicados en capítulo IV de esta Tesis Doctoral.

3.4. ESPECIFICACIONES DE LA GEOMETRÍA LINEAL DEL SENSOR

Puede darse el caso de que la línea CCD esté formada por un conjunto de ellas existiendo un pequeño solape entre unas y otras. Este es el caso de sensores como el IKONOS de GeoEye (Kocaman y Gruen 2008), sin embargo la ADS40/80 dispone únicamente de una línea CCD para cada uno de los canales que captura.

Con la intención de mejorar la resolución espacial, se dispone de un segundo CCD lineal idéntico al primero y desfasado de este en medio píxel en la dirección de la línea. La tasa de lectura será por tanto de $\frac{1}{2}$ GSD en esta dirección, dirección perpendicular a la línea de vuelo (Fig. 3.6). Esta técnica es conocida como “*staggering*” y su uso mejora la resolución espacial entre un 8% y un 15 % (Becker et al., 2005). Los movimientos de la plataforma durante el vuelo fotogramétrico son los principales obstáculos en una mayor mejora de la resolución cuando se utiliza esta técnica.

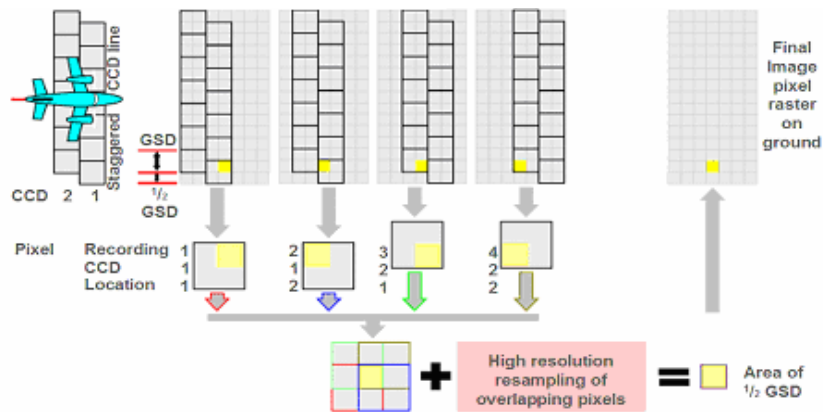


Fig. 3.6. Aplicación del staggering en las líneas CCD (Schreiber, 2010).

La distribución de las líneas CCDs en el plano focal ha ido variando de una generación a otra. Si bien, el número de píxeles de cada una de ellas se ha mantenido constante siendo 12000 los píxeles que conforman cada línea CCD, con un tamaño de píxel de $6.5 \mu\text{m}$. A continuación se cita, para cada uno de los cabezales del sensor, dicha distribución.

El sensor SH40 (Fig. 3.7), utiliza ocho CCDs lineales paralelos: tres CCDs pancromáticos (hacia delante, nadir y hacia atrás) y cinco CCDs espectrales (rojo, verde, azul y dos infrarrojos cercanos, uno de ellos opcional). Los tres CCDs de color tienen prácticamente la misma inclinación y los CCDs del infrarrojo se encuentran ligeramente desplazados con respecto al CCD del canal pancromático en el nadir. Los tres CCDs encargados del registro pancromático disponen realmente de dos CCDs desfasados entre ellos medio píxel para poder registrar el

terreno mediante la técnica *staggering* mencionada anteriormente.

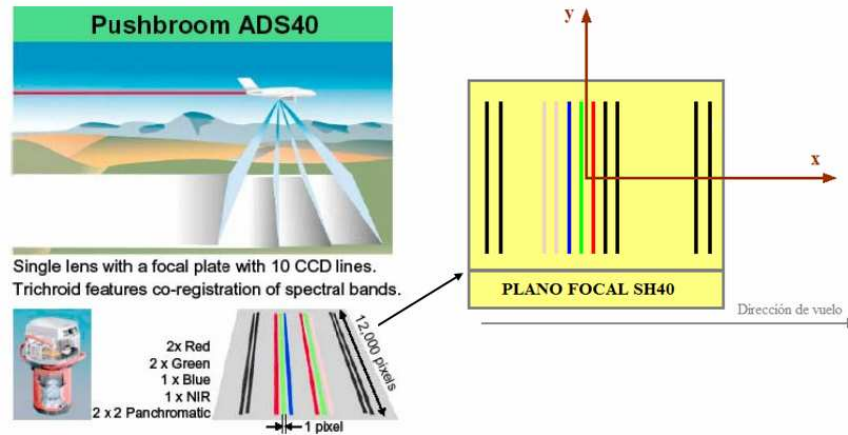


Fig. 3.7. A la izquierda esquema representativo de la adquisición de las imágenes ADS40 (Casella et al., 2007b). A la derecha, configuración del plano focal en la ADS40, primera generación.

El principio de las tres líneas para el canal panchromático (hacia delante, nadir y hacia atrás) se mantiene en las tres generaciones del sensor ADS40/80.

La ADS40 de segunda generación dispone de dos cabezales distintos, cada uno de ellos con una configuración del plano focal diferente: SH51 y SH52.

El sensor SH51 ofrece ocho CCDs lineales (Fig. 3.8), cuatro CCDs panchromáticos, uno hacia delante, dos en el nadir y otro hacia atrás, con lo que se permite generar visión estereoscópica, y cuatro CCDs multiespectrales en el nadir (rojo, verde, azul e infrarrojo cercano).

El sensor SH52 (Fig.3.8) ofrece además de las imágenes estereoscópicas panchromáticas, imágenes estereoscópicas en color y en falso color (Fricker, 2007), incorporando a la vista hacia atrás tres CCDs, uno rojo, otro verde y otro azul. Esto se consigue gracias a la incorporación de otro tetracroide en este cabezal.

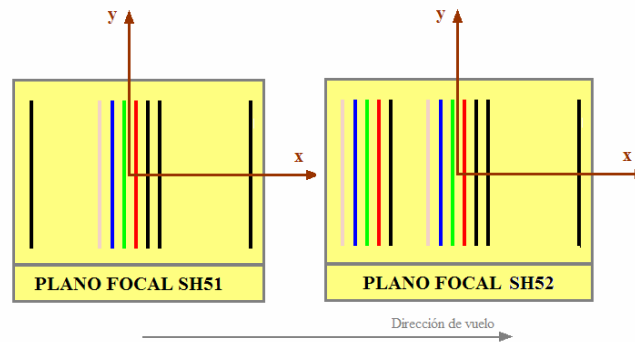


Fig. 3.8. Configuración de los planos focales en la ADS40, segunda generación.

El sensor SH91 se caracteriza por ser un sensor lineal doble nadiral (Fig. 3.9). Es decir, los CCDs pancromáticos de la vista nadiral están configurados según la técnica *staggering*, el resto de CCDs son simples. En total contiene ocho líneas CCDs, cuatro pancromáticos, y otros cuatro responsables del registro del rojo, verde, azul e infrarrojo cercano, situados en la vista nadiral. Su configuración es la idónea para la generación de Modelos Digitales de Superficie (MDS), y resulta ser la solución más vendida de la ADS80.

En el cabezal SH92 (Fig. 3.9), junto al CCD pancromático situado en la vista hacia atrás (*Backward*) se añaden tres CCDs lineales que registran el rojo, verde y azul, y uno más registrando el canal del infrarrojo cercano. Está formado por un total de 12 CCDs lineales. Los CCDs pancromáticos se disponen de la misma manera que en el cabezal SH91. Es la configuración ideal para la generación de las ortofotos verdaderas.

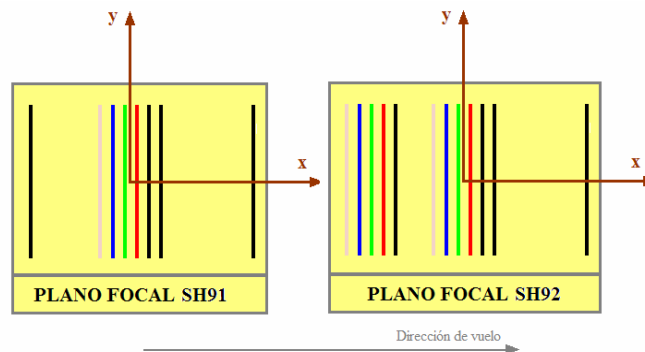


Fig. 3.9. Configuración de los planos focales en la ADS80, tercera generación.

3.5. ESPECIFICACIONES DE LA RESOLUCIÓN

Según Kramer (2002) la resolución define la unidad física más pequeña discernible de la señal que detectan los sensores. Para los sensores aéreos se debe considerar la resolución espacial, espectral y radiométrica. A continuación se especificarán estas resoluciones para el caso de nuestro estudio: ADS40/80.

3.5.1. RESOLUCIÓN ESPACIAL

Si la resolución define la unidad física más pequeña discernible, la resolución espacial hace referencia a la mínima medida “espacial” que podemos distinguir o apreciar sobre la imagen. Es decir, el nivel de detalle que nos ofrece, y generalmente se suele emplear el tamaño del elemento más básico de la imagen, el píxel.

Por lo general, también se puede ver la resolución espacial expresada en términos de GSD (*Ground Simple Distance*) o huella del píxel sobre el terreno (Fig. 3.10).

Se puede definir el GSD teórico como el tamaño del píxel proyectado sobre el terreno. Su valor depende tanto del tamaño del píxel como de la focal de la cámara y de la altura de vuelo. Así se puede escribir para un GSD teórico:

$$GSD = \frac{H}{f} \cdot p \tag{3.1}$$

Siendo p el tamaño del píxel, f la focal de la cámara y H la altura media sobre el terreno.

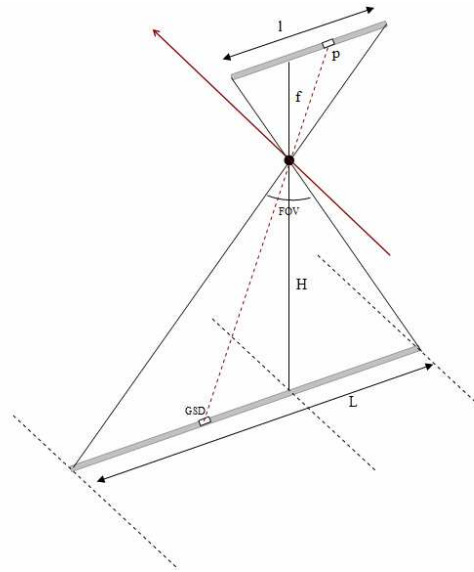


Fig. 3.10. Proyección en el terreno del tamaño del píxel y de la línea CCD para la cámara ADS40/80 H : altura de vuelo. f : focal. p : tamaño del píxel. l : longitud del CCD. L : huella del CCD; GSD: huella del píxel. FOV : Campo visual.

Para expresar la eficacia en cobertura del terreno empleamos el FOV (*Field of View*)⁴, el cual se define como el campo visual o ángulo de cobertura que determina la superficie a abarcar en el terreno, es decir la huella del CCD. En función de este ángulo de cobertura, y de la altura de vuelo, la longitud del CCD será proyectado con mayor o menor valor de huella (L). El valor del FOV viene determinado por las especificaciones técnicas de la cámara. Y como se pudo ver en la Tabla 3.2 para la ADS40 SH40 toma un valor de 64° .

Desde su introducción en el mercado la ADS40/80 ha sido capaz de adquirir imágenes de hasta 0.050 m de GSD para los canales pancromáticos y de 0.150 m

⁴ Debe diferenciarse el concepto de FOV frente al de IFOV. El IFOV o Campo de Visión Instantánea del sensor (Instantaneous Field of View) se define como el ángulo sólido que se proyecta desde el detector al área terrestre que está midiendo en cada instante, es decir, es el ángulo de cobertura que determina la proyección del píxel sobre el terreno, que no es otro que el tamaño del GSD.

para los canales RGB (Fricker y Rohrbach., 2005). Las resoluciones de 0.050 m apenas son demandadas por los clientes ya que los proyectos fotogramétricos realizados con este tipo de cámaras se realizan en áreas de una enorme cobertura donde el número de pasadas necesarias sería muy elevado. De ahí que para estos proyectos se estime una resolución espacial entre 0.20 y 0.80 m de GSD (Fricker y Rohrbach., 2005).

3.5.2. RESOLUCIÓN RADIOMÉTRICA

Se puede definir la resolución radiométrica como la sensibilidad del sensor para discretizar las diferencias de radiación recibida. Es decir, en cualquier tipo de sensor, esta resolución es el número máximo de niveles de gris capaz de discretizar. Se expresa mediante un número entero que se corresponde con el número de bits que se utilizan para cuantificar un píxel. La mayoría de las cámaras de línea tienen una resolución radiométrica entre 8 bits (256 valores de gris⁵) y 16 bits (65536 valores de gris).

Sin embargo, existen una serie de problemas añadidos como pueden ser: el nivel de *offset* o pequeña señal de salida que arroja el sensor aún en ausencia de luz, y el nivel de saturación, a partir del cual, el píxel no puede proporcionar más electrones de corriente aunque crezca el nivel de luz que sobre él incide. La diferencia entre estos dos niveles determina el rango dinámico. Así pues, se caracteriza la cámara de estudio a través de su resolución radiométrica y su rango dinámico.

⁵ La cuantización de los niveles de gris asigna a cada píxel un valor entero 2^b , con b siendo valores de: 2, 4, 8, 12 o 16 bits.

La ADS40 SH40 (primera generación) está optimizada para la adquisición de imágenes con un rango dinámico de hasta 12 bits y una resolución radiométrica mayor o igual a 8 bits (Sandau et al., 2000).

Ya en la ADS40 SH51/52 (segunda generación), la resolución radiométrica aumenta a 16 bits manteniéndose en la ADS80 (tercera generación). Ambas generaciones obtienen un rango dinámico de 12 bits.

En la ADS80 y para los datos comprimidos, la resolución radiométrica se encuentra entre los 10 y 12 bits y su sensibilidad supera en un factor de cuatro a la sensibilidad del cabezal SH40 de la primera generación.

Para la ADS40/80, la resolución radiométrica es de vital importancia en las aplicaciones de carácter temático propias de la teledetección, ya que junto con la información proporcionada sobre su calibración radiométrica es posible obtener magnitudes físicas a partir de los niveles digitales.

3.5.3. RESOLUCIÓN ESPECTRAL

La resolución espectral indica el número y anchura de bandas espectrales que puede distinguir un sensor. Según Cramer (2005) se puede definir la resolución espectral como la capacidad de resolución de un sistema en términos de longitud de onda o de frecuencia. Los sensores de menor resolución espectral corresponden a los sistemas fotogramétricos y al radar.

Como ya se cito anteriormente, y según Petrie (2006) en la clasificación de las cámaras aéreas de barrido, por lo general, estos tipos de cámaras pueden adquirir imágenes pancromáticas (PAN) o multiespectrales (MS).

La definición de los anchos de banda espectrales puede diferir ligeramente de un sensor a otro. Para la ADS40 de la primera generación puede verse los anchos de banda correspondientes a los canales multiespectrales en la Tabla 3.3.

AZUL	VERDE	ROJO	NIR I	NIR II
428-492 nm	533-587 nm	608-662 nm	703-757 nm	833-887 nm

Tabla 3.3. Longitudes de onda para el cabezal de la ADS40 de la primera generación.

Para las siguientes generaciones y debido a los nuevos filtros, se modifican ligeramente algunos de estos rangos (Tabla 3.4).

AZUL	VERDE	ROJO	NIR	PAN
435-495 nm	530-580 nm	610-660 nm	840-900 nm	465-680 nm

Tabla 3.4. Rango de bandas espectrales para la ADS40/80, SH5x/SH9x.

Un parámetro importante a la hora de considerar este tipo de resolución es el poder de resolución espectral, parámetro que mide la capacidad de distinguir dos longitudes de onda diferentes.

Tanto en la ADS40 como en la ADS80, gracias a los filtros de interferencia, las bandas multiespectrales no se registran de manera solapada. Además, la transmisión del espectro en estas bandas es constante en todo el rango de longitud de onda (Fig. 3.11), mientras que el canal pancromático transmite un 50% del total del rango espectral. En Markelin et al. (2008) se apunta a que una de las principales características de este sensor es que las bandas en las que captura la información tienen una forma prácticamente rectangular y no tienen recubrimiento, a diferencia de otros sensores aerotransportados.

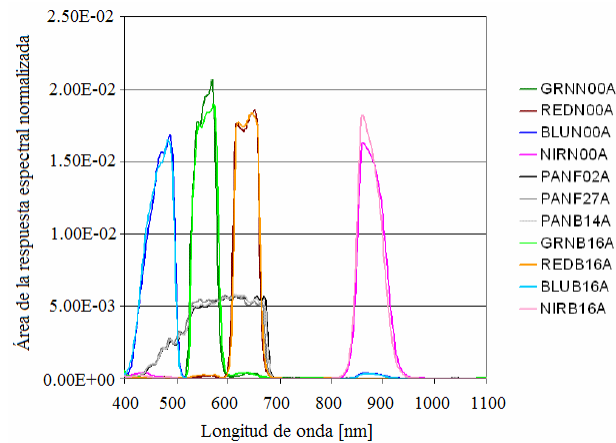


Fig. 3.11. Respuesta espectral para la ADS40/80, SH5x/SH9x (Arthur, 2010).

3.6. ESTABILIZACIÓN DE LA PLATAFORMA

Los sensores aéreos lineales suelen estabilizarse con una plataforma giro-estabilizadora con el fin de reducir la deformación de la imagen causada por el movimiento de las aeronaves y para mantener el ángulo de visión. La ADS40 lleva instalada como plataforma giro-estabilizadora una PAV30 (Leica Geosystems, 2001), plataforma desarrollada por Leica Geosystems para compensar los movimientos angulares de la aeronave (Fig. 3.12) y para mejorar la eficiencia en los vuelos. Los rangos de estabilización para alabeo o balanceo (*roll*), para el cabeceo (*pitch*) y para la guiñada (*yaw*) son respectivamente: $(-5^\circ; +5^\circ)$, $(-5^\circ; +5^\circ)$, $(-30^\circ; 30^\circ)$ (véase especificaciones del vuelo fotogramétrico en el capítulo IV de esta Tesis Doctoral).

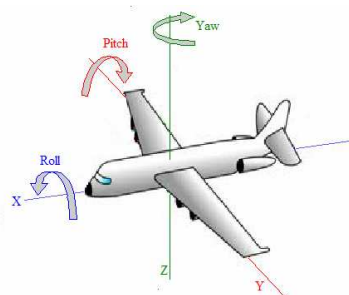


Fig. 3.12. Rotaciones de la plataforma sobre los tres ejes cartesianos.

La ADS80 cuenta con una nueva plataforma giro-estabilizadora (PAV80) con una mayor velocidad de estabilización y permitiendo mayores ángulos de inclinación. Los rangos de estabilización para alabeo o balanceo (*roll*), para el cabeceo (*pitch*) y para la guiñada (*yaw*), Figura 3.12, son respectivamente: (-7°; +7°), (-8°; +6°), (-30°; 30°) (Leica Geosystems, 2011).

De la fotogrametría clásica se sabe que el alabeo del avión en el momento del disparo de la cámara (*roll*) afecta el recubrimiento lateral (entre pasadas), el cabeceo del avión (*pitch*) afecta el recubrimiento longitudinal (entre fotos contiguas), y la guiñada (*yaw*) afecta tanto el recubrimiento longitudinal como el lateral. Trasladando esta situación a este caso de estudio se aprecia como (Fig. 3.13) cada una de las líneas discretas que conforman una pasada presentan distintos ángulos con respecto a la línea de vuelo originándose deformaciones en la imagen que deben de ser corregidas para su posterior procesamiento.



Fig. 3.13. Efecto en las imágenes ocasionado por las rotaciones de la cámara durante el vuelo (Titarov, 2007).

3.7. CALIBRACIÓN GEOMÉTRICA DE LOS PARÁMETROS DE LA CÁMARA BARREDORA

Recuérdese, tal y como se citó en el acercamiento a la calibración en el capítulo II de esta Tesis Doctoral, que los parámetros de la Orientación Interna de un CCD lineal son determinados tras una calibración en laboratorio. Sin embargo,

estos parámetros pueden sufrir alteraciones con el tiempo que se traducen en errores sistemáticos en las coordenadas imagen. Debido a esto se hace necesaria la autocalibración, también citada en el capítulo II de esta Tesis.

Una vez obtenidos los parámetros internos de la cámara se almacenan estos, junto con las fotocoordenadas corregidas, en ficheros de calibración individuales para cada uno de los CCDs del plano focal.

En los CCDs lineales se puede encontrar dos tipos de errores:

- Los errores sistemáticos de la cámara que, a su vez, pueden ser clasificados como errores del sistema óptico (lentes) y como errores relacionados con los parámetros de la línea CCD.
- Y los errores producidos por el desalineamiento y desplazamiento de la cámara con respecto a los dispositivos de medición de la Orientación Externa (GNSS/IMU).

Estos dos últimos errores hacen referencia al *boresight* y al *lever arm* (Kresse et al., 2006). El *boresight* da cuenta del desalineamiento angular entre el IMU y la cámara (matriz de rotación que relaciona los ejes de la cámara con los ejes del IMU), mientras que el *lever arm* es el desalineamiento espacial que mide el vector GNSS-cámara (vector de excentricidad) y que puede ser determinado topográficamente. Ambos errores serán explicados más detenidamente en el apartado referente a la calibración/autocalibración del sensor en el capítulo IV de esta Tesis Doctoral.

A continuación se explicará brevemente los errores correspondientes a las líneas CCD y las distorsiones del objetivo, errores que se han descrito ampliamente también en otras Tesis Doctorales: Poli (2005) y Kocaman (2008).

3.7.1. PARÁMETROS RELATIVOS AL SISTEMA ÓPTICO

Los errores sistemáticos relativos a los parámetros del sistema óptico son las distorsiones del objetivo y las variaciones en la longitud de la focal y del punto principal. Como estos parámetros son específicos de la lente, en el caso de existir múltiples lentes, se definiría un parámetro para cada objetivo por separado. Este no es el caso del sensor de estudio, ya que tal y como se ha visto la ADS40/80 dispone de una única lente.

El punto principal es según Atkinson, (1996) el punto definido por la base de la perpendicular en el plano imagen desde el centro de la lente. La longitud de esa perpendicular es la distancia principal o focal (Clarke et al., 1998).

Como ya se ha visto anteriormente, los parámetros internos de la cámara (punto principal, focal y distorsión de la lente) son calibrados en un laboratorio con la ayuda de un goniómetro óptico. En un modelo de lente idealizado, el plano de la imagen es exactamente perpendicular al eje óptico pero en realidad hay una ligera diferencia. Los errores sistemáticos en la definición del punto principal causan una corrección constante (x_p, y_p) en las coordenadas imagen de todos los puntos.

La distancia principal o focal (f) también puede conocerse como constante de la cámara. Un error sistemático en este parámetro crea un efecto de escala en las coordenadas imagen resultantes (Fig. 3.14). Los efectos de un cambio en la focal Δf en las coordenadas imagen de un punto i son calculadas usando la siguiente ecuación (3.2) donde los términos Δx_f y Δy_f representan las correcciones para x_i e y_i respectivamente.

$$\begin{aligned}\Delta x_f &= -\frac{(x_i - x_p)}{f} \Delta f \\ \Delta y_f &= -\frac{(y_i - y_p)}{f} \Delta f\end{aligned}\tag{3.2}$$

Donde f es la focal; Δf es el incremento en esta focal; x_i, y_i son las coordenadas imagen de un punto i ; y x_p, y_p son las coordenadas imagen del punto principal.

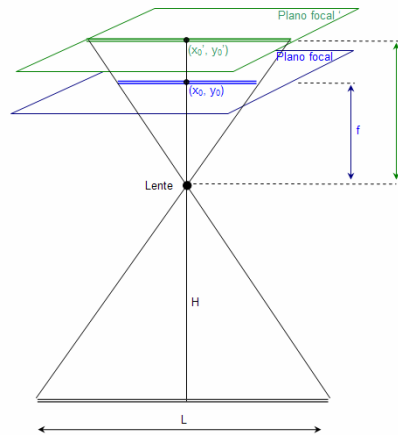


Fig. 3.14. Efectos de un cambio sistemático en la focal (f). H: altura de vuelo, (x_p, y_p) : punto principal.

Para corregir los errores sistemáticos derivados de las distorsiones del objetivo se utiliza el modelo de Brown (1971). Para sensores lineales se debe considerar tres coeficientes para las distorsiones radiales (Remondino y Fraser, 2006).

Dicha distorsión (3.3) se modeliza a través de un polinomio de orden impar formado por potencias de la distancia radial r , conocido como modelo Gaussiano.

$$\Delta r = K_1 r^3 + K_2 r^5 + K_3 r^7 + \dots \quad (3.3)$$

donde, $r^2 = (x - x_s)^2 + (y - y_s)^2$ y x_s, y_s son las coordenadas del punto de mejor simetría. Este punto centraliza las distorsiones de la lente posibilitando que la distorsión radial sea simétrica. De esta manera se podría decir que la distorsión radial es producida por las lentes de la cámara desplazando los puntos de la imagen radialmente a partir del punto de mejor simetría (x_s, y_s) .

Para la distorsión tangencial se podrán tener en cuenta los dos primeros parámetros definidos en el modelo de Brown (Kocaman, 2008). Dichos parámetros (p_1, p_2) corregirán las fotocoordenadas de un punto i según la

ecuación (3.4) donde (x_s, y_s) son las coordenadas del punto de mejor simetría y r es la distancia desde el punto i a dicho punto de mejor simetría. Esta distorsión se debe a la excentricidad de los múltiples sistemas ópticos y en imágenes digitales presenta valores tan pequeños que dicha corrección $(\Delta x_d, \Delta y_d)$ rara vez es aplicada.

$$\begin{aligned} \Delta x_d &= \left(r_i^2 + 2(x_i - x_s)^2 \right) p_1 + 2(x_i - x_s)(y_i - y_s) p_2 \\ \Delta y_d &= \left(r_i^2 + 2(y_i - y_s)^2 \right) p_2 + 2(x_i - x_s)(y_i - y_s) p_1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

3.7.2. PARÁMETROS RELATIVOS A LA LÍNEA CCD

Los errores sistemáticos presentados a continuación: escala, rotación, desplazamiento del punto principal, y curvatura, son definidos para una única línea CCD.

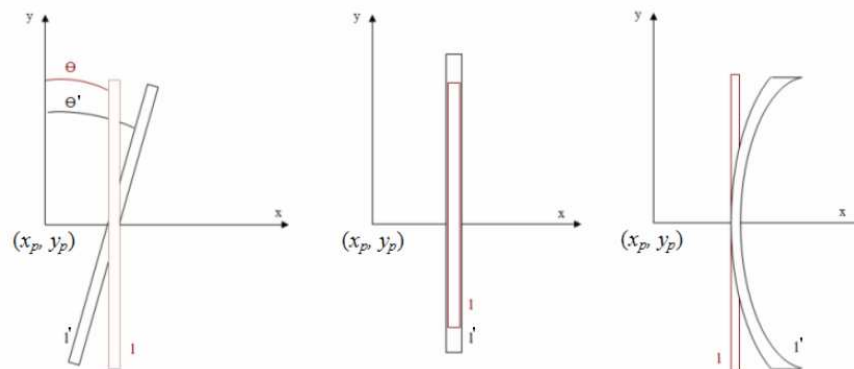


Fig. 3.15. Efectos de rotación (izquierda), de escala (centro) y de curvatura (derecha) sobre un CCD lineal. I: CCD ideal; I': CCD calibrado; (x_p, y_p) : Punto principal; Θ : rotación ideal; Θ' : rotación calibrada.

Se debe introducir un parámetro de escala para cada una de las líneas CCD que constituyen la cámara y se encuentran sobre el plano focal (Fig. 3.15). El parámetro de la escala tiene un efecto significativo sobre la coordenada y de los puntos de la imagen, que se define perpendicular a la línea de vuelo. El término de corrección para cada punto se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$\Delta y_s = -(y_i - y_p) s \quad (3.5)$$

donde Δy_s es el termino de corrección de la coordenada imagen y_i de cada punto en la dirección y , s es el parámetro de escala de cada CCD, y_p es la coordenada imagen y del punto principal de la lente.

Tanto en el sensor ADS40 como en el sensor ADS80, las líneas CCD se suponen perpendiculares a la dirección de vuelo. Sin embargo, las pequeñas rotaciones respecto de esta orientación inicial (Fig. 3.15), que pueden ocurrir durante la fabricación, deben ser consideradas en el modelo de calibración. El efecto de la rotación de la línea CCD es significativo en la dirección x . El término de corrección con respecto a la rotación de la línea CCD para cualquier punto imagen se calcula utilizando la ecuación (3.6):

$$\Delta x_\theta = \frac{(y_i - y_p)}{\rho} \Delta \theta \quad (3.6)$$

donde, y_i es la coordenada imagen de cada punto en la dirección y ; y_p es la coordenada imagen del punto principal de la lente en la dirección y ; $\Delta \theta$ es el incremento de rotación de la línea CCD definido como $(\theta - \theta')$ siendo θ el valor de rotación ideal y θ' el calibrado, cuyo valor debería ser nulo; y $\rho = 180/\pi$ define el cambio de radianes a grados para el término de rotación de la línea CCD.

En cuanto al desplazamiento del punto principal $(\Delta x_p, \Delta y_p)$, el centro de cada una de las líneas CCDs se encuentran desplazadas del punto principal de la cámara. Las posiciones de los centros de los CCDs sobre el plano focal deben ser conocidas (Fig. 3.16) y estos pueden ser calculados a través de un proceso de autocalibración. Se define por tanto un par de parámetros de desplazamiento $(\Delta x_p, \Delta y_p)$ para cada línea CCD individual. Las coordenadas imagen de cada píxel del CCD $(\Delta x_i, \Delta y_i)$ se actualizan mediante la adición de estos parámetros estimados.

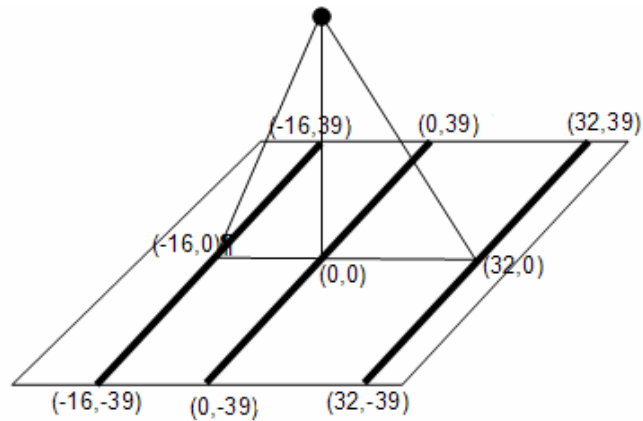


Fig. 3.16. Fotocoordenadas aproximadas de los tres CCDs pancromáticos sobre el plano focal. Unidades en milímetros.

Y, por último, falta hacer mención al error en curvatura (Fig. 3.17). Pues bien, la línea CCD no es una línea recta perfecta, sino que se curva ligeramente por lo que presenta forma de arco. Este error afecta principalmente a la coordenada x de los puntos imagen. El término de corrección (Δx_b) para cada punto i se calcula utilizando la ecuación (3.7) (Poli, 2005):

$$\Delta x_b = (y_i - y_p) r_i b \quad (3.7)$$

donde b es la curvatura de la línea (inverso del radio de curvatura, R_C); y_i es la coordenada imagen de cada punto en la dirección y ; y_p es la coordenada imagen del punto principal de la lente en la dirección y ; y r_i es la distancia radial expresada como $\sqrt{(x_i - x_s)^2 + (y_i - y_s)^2}$.

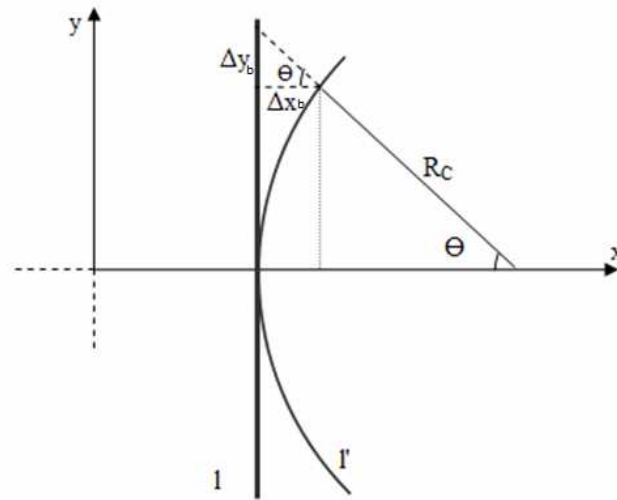


Fig. 3.17. Efecto de curvatura sobre un CCD lineal. l: CCD ideal; l': CCD calibrado; R_c : Radio de curvatura; Δx_b : incremento en la fotocoordenada x; Δy_b : incremento en la fotocoordenada y.

3.8. MODELO MATEMÁTICO DEL SENSOR LINEAL

3.8.1. MODELO FUNCIONAL

El modelo matemático para procesar este tipo de imágenes es la condición de colinealidad adaptada a las circunstancias del carácter lineal de la información y por tanto a la necesidad de disponer de información de la trayectoria mediante la integración GNSS/IMU.

Para poder integrar estos datos en un modelo de aerotriangulación manejable se trabaja con puntos fijos de orientación (*orientation fixes*) espaciados cada cierto tiempo, estos puntos fijos contienen la orientación del sensor en un instante dado (Hinsken et al., 2002). Por lo tanto, una imagen lineal tendrá múltiples puntos fijos (Fig. 3.18) y cada uno de estos puntos fijos K , dispondrá de observaciones relativas a la posición del punto y a la orientación del sensor en un instante dado, siendo integrados en el ajuste de aerotriangulación de modo que actúen como puntos de vista para un proceso clásico.

Es aconsejable de cara a optimizar la información disponible, que la separación entre estos puntos sea igual a la base corta del sensor (Fig. 3.18), siendo esta la distancia en el terreno entre la proyección de la vista trasera y la vista nadiral de los dos CCDs pancromáticos (Hinsken et al., 2002). Con esta separación entre puntos fijos, se consiguen las mejores condiciones geométricas para la resolución del ajuste ya que cualquier punto del terreno que sea reproyectado para cada uno de los tres sensores estará entre dos de estos puntos fijos.

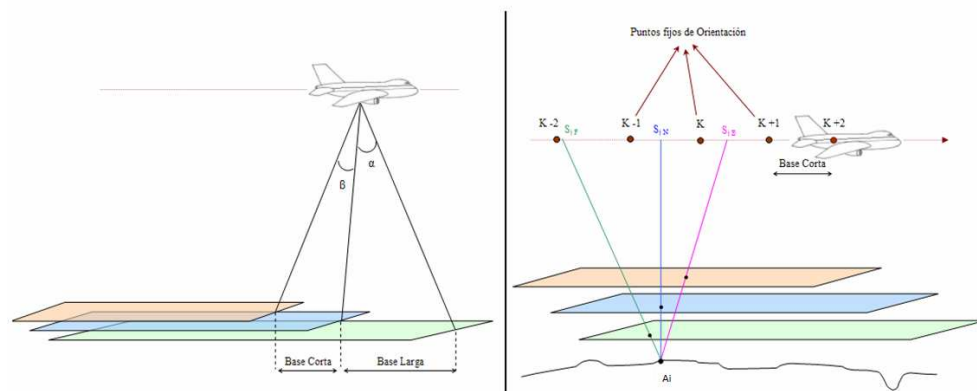


Fig. 3.18. A la izquierda definición de base corta y base larga. A la derecha reproyección de un punto para cada uno de los tres sensores pancromáticos.

De este modo, la aerotriangulación deberá quedar expresada como función de puntos fijos vecinos. Por tanto se debe calcular en función de K y $K+1$ los parámetros de orientación de S_j , donde K y $K+1$ son dos puntos fijos contiguos y S_j es el punto de vista correspondiente a la línea sobre la que se reproyecta el punto A_i del terreno (Fig. 3.19).

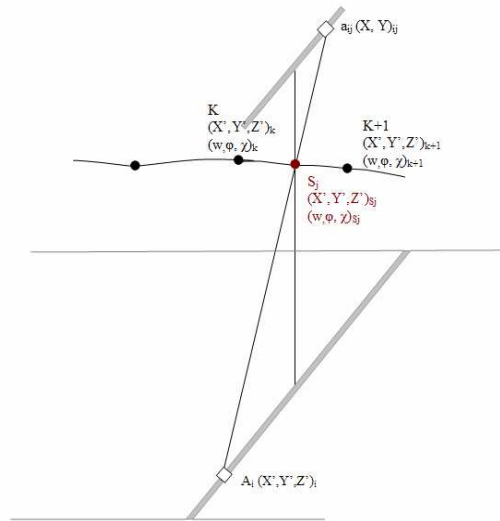


Fig. 3.19. Punto objeto reproyectado entre dos puntos fijos (orientation fixes). a_{ij} , punto imagen correspondiente al punto objeto A_i del terreno; S_j , punto de vista correspondiente a la línea sobre la que se reproyecta A_i ; K y K+1, puntos fijos contiguos.

Suponiendo una interpolación lineal (Fig. 3.20) en la trayectoria para el punto S_j entre los puntos K y K+1, y considerando una sola variable de entre sus seis correspondientes a los elementos de la orientación externa, tenemos:

$$\frac{X_{K+1} - X_K}{t_{K+1} - t_K} = \frac{X_{K+1} - X_j}{t_{K+1} - t_j} \quad (3.8)$$

$$X_j = X_{K+1} - \left(\frac{t_{K+1} - t_j}{t_{K+1} - t_K} \cdot (X_{K+1} - X_K) \right)$$

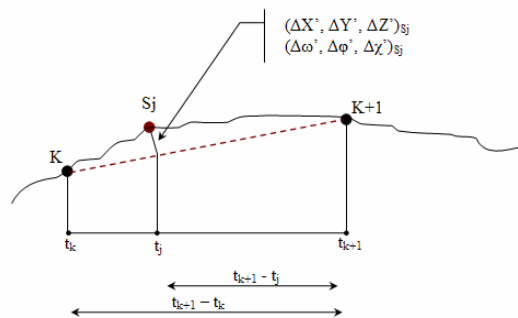


Fig. 3.20. Interpolación lineal entre dos puntos fijos (K y K+1). t_k : tiempo asociado al punto fijo K. t_{k+1} : tiempo asociado al punto fijo K+1. t_j : tiempo asociado al punto de vista S_j . $(\Delta X', \Delta Y', \Delta Z')$, $(\Delta \omega', \Delta \phi', \Delta \chi')$: errores en la posición y orientación del punto de vista S_j debido a la interpolación lineal (ver infra).

Si se denomina $\left(\frac{t_{K+1}-t_j}{t_{K+1}-t_K}\right)$ como el coeficiente de interpolación lineal, A_j , se podrá escribir:

$$\begin{aligned} X_j &= X_{K+1} - A_j \cdot X_{K+1} + A_j \cdot X_K \\ X_j &= X_{K+1} \cdot (1 - A_j) + X_K \cdot A_j \end{aligned} \quad (3.9)$$

Por tanto el coeficiente de interpolación lineal, A_j , será función del tiempo entre los dos puntos fijos vecinos.

De esta manera se puede escribir como parámetros de posición y orientación del punto S_j los siguientes (3.10):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{S_j} &= A_j \cdot \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_K + (1 - A_j) \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{K+1} \\ \begin{bmatrix} \omega' \\ \varphi' \\ \chi' \end{bmatrix}_{S_j} &= A_j \cdot \begin{bmatrix} \omega' \\ \varphi' \\ \chi' \end{bmatrix}_K + (1 - A_j) \begin{bmatrix} \omega' \\ \varphi' \\ \chi' \end{bmatrix}_{K+1} \end{aligned} \quad (3.10)$$

Dado que al suponer una interpolación lineal se está incorporando un error (Fig. 3.20) tanto en la posición como orientación del punto S_j , se debe aplicar una corrección que de cuenta de este hecho (3.11).

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} X'_G \\ Y'_G \\ Z'_G \end{bmatrix}_{S_j} - \left\{ A_j \begin{bmatrix} X'_G \\ Y'_G \\ Z'_G \end{bmatrix}_K + (1 - A_j) \begin{bmatrix} X'_G \\ Y'_G \\ Z'_G \end{bmatrix}_{K+1} \right\} \\ \begin{bmatrix} \Delta \omega' \\ \Delta \varphi' \\ \Delta \chi' \end{bmatrix}_j &= \begin{bmatrix} \omega'_I \\ \varphi'_I \\ \chi'_I \end{bmatrix}_{S_j} - \left\{ A_j \begin{bmatrix} \omega'_I \\ \varphi'_I \\ \chi'_I \end{bmatrix}_K + (1 - A_j) \begin{bmatrix} \omega'_I \\ \varphi'_I \\ \chi'_I \end{bmatrix}_{K+1} \right\} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Donde el subíndice “G” indica las observaciones tomadas con GNSS mientras que el subíndice “T” muestra las observaciones IMU.

Por tanto, y teniendo en cuenta la situación mostrada en la Figura 3.19, para un punto de vista S_j de la trayectoria y para un punto A_i del terreno cuya imagen queda recogida en el sensor en el punto a_{ij} , puede escribirse, aplicando la condición de colinealidad, que:

$$\begin{bmatrix} x_{ij} \\ y_{ij} \\ f \end{bmatrix}_{ij} = \lambda_{ij} \cdot R_j \left[\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{S_j} \right] \quad (3.12)$$

Donde las fotocoordenadas (x_{ij}, y_{ij}) están referidas al punto principal, R_j contiene las correcciones $[\Delta\omega', \Delta\phi', \Delta\chi']_j$, y las coordenadas del punto de vista S_j (3.10) son corregidas según la Ecuación (3.11). Estos vectores de corrección (3.11) son observaciones obtenidas del sistema GNSS/IMU al igual que el coeficiente de interpolación lineal, A_j .

Dividiendo la primera y la segunda ecuación por la tercera en (3.12) eliminamos el factor de escala λ_{ij} :

$$\begin{aligned} x_{ij} &= -f \frac{r_{11j} (X'_i - X'_{S_j}) + r_{12j} (Y'_i - Y'_{S_j}) + r_{13j} (Z'_i - Z'_{S_j})}{r_{31j} (X'_i - X'_{S_j}) + r_{32j} (Y'_i - Y'_{S_j}) + r_{33j} (Z'_i - Z'_{S_j})} \\ y_{ij} &= -f \frac{r_{21j} (X'_i - X'_{S_j}) + r_{22j} (Y'_i - Y'_{S_j}) + r_{23j} (Z'_i - Z'_{S_j})}{r_{31j} (X'_i - X'_{S_j}) + r_{32j} (Y'_i - Y'_{S_j}) + r_{33j} (Z'_i - Z'_{S_j})} \end{aligned} \quad (3.13)$$

Las fotocoordenadas y la focal serán conocidas siempre que se acepte como válida la calibración de la cámara, por ello recibirán una incertidumbre asociada a su observación y por tanto un peso. Por otro lado, los puntos objeto serán incógnitas al igual que los elementos de posición y orientación de los puntos fijos.

Por lo general, los sensores GNSS/IMU tendrán un desplazamiento sistemático con respecto al sensor ADS40/80, excentricidad de la cámara con respecto a la antena GNSS. Este desplazamiento sistemático entre los parámetros de orientación del sensor y las observaciones GNSS/IMU son compensadas en posteriores procesos de aerotriangulación. Lo mismo ocurre con el caso en el que existan discrepancias entre el sistema cartesiano del GNSS y el sistema cartesiano fotogramétrico o en el caso de tener que aplicar una corrección de la trayectoria del GNSS. Cualquiera de estas correcciones se explicará en detalle en el método seguido para aerotriangular este tipo de imágenes (Capítulo IV).

3.8.2. MODELO ESTOCÁSTICO

Según la ecuación (3.13) se forma un modelo no lineal de m ecuaciones con n incógnitas donde los parámetros de calibración son considerados conocidos. Este modelo debe ser linealizado mediante el desarrollo en serie de Taylor y, por tanto, a través de las correspondientes matrices jacobianas.

Considerando las fotocoordenadas referidas al punto principal se puede rescribir el modelo matemático como:

$$\begin{aligned} F &= x_{ij} + f \cdot \frac{U}{W} = 0 \\ G &= y_{ij} + f \cdot \frac{V}{W} = 0 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Donde:

$$\begin{bmatrix} U \\ V \\ W \end{bmatrix} = R_j \left[\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_i - \begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix}_{sj} \right] \quad (3.15)$$

Se forma así un sistema de observación sobredeterminado y mixto donde las observaciones deben ser corregidas de su indeterminación o residuo en sentido riguroso. Si denominamos c al número de incógnitas y q al número de

observaciones, se obtiene (3.16):

$${}_m[\mathbf{A}]^c \cdot {}_c[\mathbf{X}]^l + {}_m[\mathbf{B}]^q \cdot {}_q[\mathbf{V}]^l + {}_m[\mathbf{L}]^l = 0 \quad (3.16)$$

Donde \mathbf{A} se corresponde con la jacobiana respecto de las incógnitas y \mathbf{B} con la jacobiana respecto de las observaciones.

$$\begin{bmatrix} \delta F / \delta x_1 & \delta F / \delta x_2 & \dots & \delta F / \delta x_p \\ \delta G / \delta x_1 & \delta G / \delta x_2 & \dots & \delta G / \delta x_p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta F / \delta v_1 & \delta F / \delta v_2 & \dots & \delta F / \delta v_q \\ \delta G / \delta v_1 & \delta G / \delta v_2 & \dots & \delta G / \delta v_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ G \end{bmatrix} = 0 \quad (3.17)$$

Llamando \mathbf{W} a la matriz de pesos asociada a las observaciones, imponiendo el criterio de MMCC ⁶, $\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V} = \text{mínimo}$, y utilizando los Multiplicadores de Lagrange, los cuales permiten minimizar $\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V}$ sujeto a la ecuación (3.16) realizando las correspondientes derivadas parciales con respecto a las incógnitas y a los residuos, la expresión a minimizar queda:

$$\mathbf{V}^T \cdot \mathbf{W} \cdot \mathbf{V} + 2\mathbf{k}^T \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{A}\mathbf{X}) = \text{mínimo} \quad (3.18)$$

Y sus derivadas parciales serán:

$$\begin{aligned} \frac{\delta(\mathbf{V}^T \mathbf{W} \mathbf{V} + 2\mathbf{k}^T \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{A}\mathbf{X}))}{\delta \mathbf{V}} &= 2\mathbf{W}\mathbf{V} + 2\mathbf{B}^T \mathbf{k} = \mathbf{W}\mathbf{V} + \mathbf{B}^T \mathbf{k} = 0 \\ \frac{\delta(\mathbf{V}^T \mathbf{W} \mathbf{V} + 2\mathbf{k}^T \cdot (\mathbf{L} + \mathbf{B}\mathbf{V} + \mathbf{A}\mathbf{X}))}{\delta \mathbf{X}} &= 2\mathbf{A}^T \mathbf{k} = \mathbf{A}^T \mathbf{k} = 0 \end{aligned} \quad (3.19)$$

⁶ De las infinitas soluciones que admite el sistema de observación sobredeterminado elegiremos aquella que haga mínima la composición cuadrática de los residuos.

De la derivada parcial con respecto a los residuos se obtiene:

$$\mathbf{V} = -\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T\mathbf{k} \quad (3.20)$$

Y de la derivada parcial con respecto a las incógnitas \mathbf{X} :

$$\mathbf{A}^T\mathbf{k} = 0 \quad (3.21)$$

Sustituyendo el valor obtenidos de \mathbf{V} en el sistema mixto original (3.16) y despejando \mathbf{k} se obtiene:

$$\mathbf{k} = [\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T]^{-1} [\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{L}] \quad (3.22)$$

Finalmente, sustituyendo este valor de \mathbf{k} en la ecuación (3.21) se obtiene que para el sistema de observación, el sistema normal tras la aplicación del criterio de mínimos cuadrados ponderados ayudándonos de los multiplicadores de Lagrange es:

$$\mathbf{A}^T [\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T]^{-1} [\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{L}] = 0 \quad (3.23)$$

Que expandido tendrá la forma:

$$\mathbf{A}^T [\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T]^{-1} \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{A}^T [\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T]^{-1} \mathbf{L} = 0 \quad (3.24)$$

Finalmente, y para obtener los residuos, se sustituye el valor de \mathbf{k} obtenido anteriormente (3.22) en la expresión (3.20):

$$\mathbf{V} = -\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T [\mathbf{B}\mathbf{W}^{-1}\mathbf{B}^T]^{-1} [\mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{L}] \quad (3.25)$$

4 CAPÍTULO IV - METODOLOGÍA

CAPÍTULO IV

METODOLOGÍA PARA LA ORIENTACIÓN Y AUTOCALIBRACIÓN DE LA CÁMARA DE BARRIDO ADS40/80

En el presente capítulo se determinan las condiciones técnicas mínimas que debe regir cualquier proyecto fotogramétrico llevado a cabo con la cámara de barrido ADS40/80. Del mismo modo, se definen los métodos y técnicas a utilizar con el fin de obtener las precisiones internas y precisiones externas requeridas en dichos proyectos fotogramétricos.

4.1. PROYECTO DE VUELO. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Del mismo modo que sucede en fotogrametría clásica, la captura de datos del sensor ADS40/80 requiere de una planificación de vuelo cuyo propósito es el diseño de un plan detallado y completo que recoge los parámetros de captura de las imágenes (PNOA, 2012). Un plan de vuelo optimizado es la llave para una adquisición efectiva de imágenes, aumentando la productividad y rentabilidad del proyecto fotogramétrico.

Dicho diseño, junto con los parámetros de captura de las imágenes ADS40/80, son expresados en el pliego de condiciones técnicas, en el cual se abordarán los siguientes aspectos:

- Especificaciones del sistema de referencia.
- Especificaciones del vuelo fotogramétrico.
- Especificaciones de la toma de datos GNSS/IMU.
- Parámetros de captura del sensor.

4.1.1. ESPECIFICACIONES DEL SISTEMA DE REFERENCIA

De acuerdo a la directiva INSPIRE 2007/2/EC (*Infrastructure for Spatial Information in the European Community*), se publica el Real Decreto 1071/2007, que establece el sistema ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) como sistema geodésico de referencia oficial en la Península, Baleares, Ceuta y Melilla, cuyo objetivo es facilitar el acceso de los usuarios a una red GNSS de alta precisión, de modo que cualquier punto en el territorio nacional se encuentre dentro de un círculo de radio máximo de 15 Km con centro en un vértice de la Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales (REGENTE), que actúa como marco de referencia. (Real Decreto 1071, 2007).

ETRS89 es un sistema geodésico de referencia tridimensional coincidente con el ITRS (*International Terrestrial Reference Systems*) en el marco ITRF89 época 1989 (Grau et al., 2012). Los parámetros geométricos del Sistema de Referencia Terrestre Europeo, ETRS89, son:

- Elipsoide GRS80 (Geodetic Referente System 1980) cuyo valor del semieje mayor (a) es de 6378137 m y su achatamiento (f) es 1: 298.257222101.
- Origen geocéntrico (Fig. 4.1), cuyo eje X queda definido por la intersección del meridiano de Greenwich y el plano del Ecuador medio; el eje Z es el eje de rotación del elipsoide en la dirección del CIO (definición estándar para el polo norte); y el eje Y queda definido perpendicular a los otros dos formando un triedro directo.

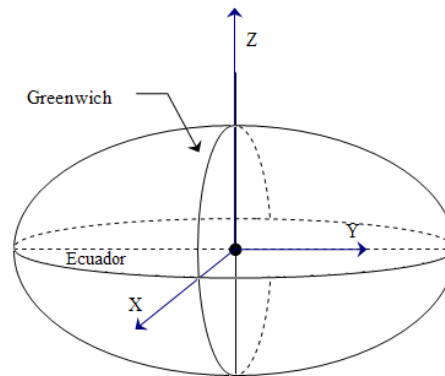


Fig. 4.1. Definición del sistema geodésico de referencia ETRS89.

Por ello, todo el trabajo se realizará en ETRS89, basándose exclusivamente en vértices REGENTE de la Red Geodésica Nacional u otras estaciones que hayan sido observadas por métodos estáticos a partir de la REGENTE o de redes autonómicas oficiales enlazadas con REGENTE. En caso de que el trabajo se realizara en Canarias, el sistema Geodésico de Referencia a utilizar sería el REGCAN2001, basándose en los vértices REGCAN2001 (PNOA, 2012).

El Real Decreto 1071/2007 de 27 de julio determina que para la cartografía terrestre, básica y derivada, a escala igual o menor de 1:500000, se adopte el sistema de referencia de coordenadas ETRS-Cónica Conforme de Lambert, y para escalas mayores a 1:500000, el ETRS- Transversa de Mercator siempre referido al Huso correspondiente.

Se utilizarán únicamente altitudes ortométricas. La transformación desde las altitudes elipsoidales (referidas al sistema ETRS89) se realizará utilizando el modelo de geoide oficial EGM08-REDNAP publicado a finales del 2009, modelo generado a partir de la adaptación del modelo gravimétrico mundial EGM08 (*Earth Gravitational Model 2008*) al marco de referencia vertical definido por la REDNAP (Red Española de Nivelación de Alta Precisión) y distribuido por el Instituto Geográfico Nacional.

4.1.2. ESPECIFICACIONES DEL VUELO FOTOGRAMÉTRICO

Se denomina especificaciones del vuelo fotogramétrico a todos aquellos parámetros que definen el diseño correcto del vuelo. Para que este diseño sea óptimo deberán definirse el correcto equipo GNSS/IMU a emplear así como la plataforma giroestabilizadora, se determinará el número de pasadas que conforman el vuelo junto como sus conexiones y recubrimientos, y el tamaño teórico del GSD con su error máximo entre otras.

Será de uso obligatorio la plataforma giroestabilizadora que según instrucciones del fabricante de la cámara será el PAV30 para el caso de la ADS40 (Leica Geosystems, 2001) y el PAV80 para el caso de la ADS80 (Leica Geosystems, 2011). En cualquier caso las desviaciones de la vertical de la cámara serán menores a 4°.

Para las cámaras lineales de barrido se hace obligatorio el uso del sistema de navegación basado en GNSS. Este equipo deberá disponer de doble frecuencia de al menos 1 o 2 Hz e irá sincronizado con la cámara mediante el registro de eventos. De igual modo se hace de uso obligatorio el sistema inercial IMU, cuya frecuencia de registro de datos deberá ser superior o igual a 200 Hz y su deriva no deberá superar en ningún caso 0.5° / hora. La deriva no compensada deberá ser menor a 3° (PNOA, 2012).

En el caso de la ADS40 SH52 se dispone de un sistema IPAS10, compuesto por un IMU de 256 Hz y un sensor GNSS de 12 canales dual L1 y L2 con capacidad de captura de datos brutos de 20 Hz (Schreiber, 2008). En el caso de la ADS80 SH82 el sistema que se dispone es un Leica IPAS20 e igualmente viene provisto de un sistema GNSS/IMU (Leica Geosystems, 2008a).

Tal y como indican las especificaciones técnicas del PNOA (PNOA, 2012), las desviaciones de la trayectoria del avión no deberán ser superiores a 50 m de la planificada. En cuanto a la zona de recubrimiento, cada una de las pasadas

realizadas tendrá un exceso longitudinal equivalente al ancho de barrido. Todas las pasadas seguirán trayectorias paralelas y se podrán establecer pasadas transversales para el caso de vuelos de autocalibración. En el caso de existir pasadas interrumpidas, estas deberán conectarse al menos con una longitud equivalente a 1 ancho de barrido en todos los ángulos de toma (vista hacia delante, hacia atrás, y nadiral).

En cuanto al valor del GSD, se realizará cada pasada a una altura de vuelo tal que se cumplan simultáneamente las siguientes condiciones (PNOA, 2012):

- El tamaño del píxel medio para toda la pasada será el tamaño del GSD requerido menos un 10% de su valor, con un margen de error de \pm el 10% del tamaño del GSD. Así se tiene, en caso de un GSD de 50 cm, que el tamaño de GSD medio para toda la pasada será de $0.45 \text{ m} \pm 10\%$.
- El número de píxeles con un tamaño del GSD teórico mayor al 10% no deberá superar el 10% total de píxeles.

El recubrimiento longitudinal entre las distintas pasadas es del 100% en toda la zona de trabajo. Si bien, hay que tener en cuenta que existe un cierto desplazamiento entre las pasadas correspondientes a las tres vistas pancromáticas; este desplazamiento viene determinado por la longitud de las pasadas y el ángulo entre dichas vistas. Por ejemplo, si se denomina R_{F27}^{N02} a la longitud del recubrimiento entre la vista nadiral del sensor pancromático y la vista hacia delante del sensor pancromático, tendremos que $R_{F27}^{N02} = S - H \cdot \text{tg} \alpha$, donde S es la longitud total de la pasada y α es el ángulo formado entre ambas vistas (Fig. 4.2).

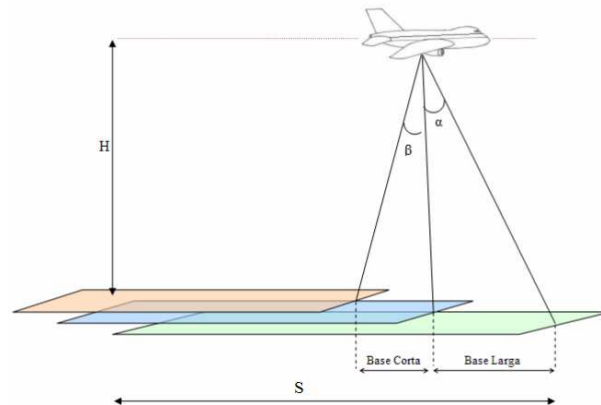


Fig. 4.2. Longitud del recubrimiento longitudinal para imágenes de barrido, ADS40/ADS80. S: longitud de la pasada. α : ángulo entre la vista hacia delante y la nadiral. β : ángulo entre la vista hacia atrás y la nadiral. H: altura de vuelo.

El recubrimiento transversal (Fig. 4.3) se calculará en función de la superficie total, del ancho de barrido o huella de la línea CCD sobre el terreno (L) y del número total de pasadas (N). Si la superficie total del vuelo es la longitud de la pasada (S) por el ancho de la superficie a cubrir (a), podemos escribir:

$$R_{\text{Transversal}} [\%] = \frac{100}{L} \cdot \left(\frac{N \cdot L - a}{2N - 2} \right) \quad (4.1)$$

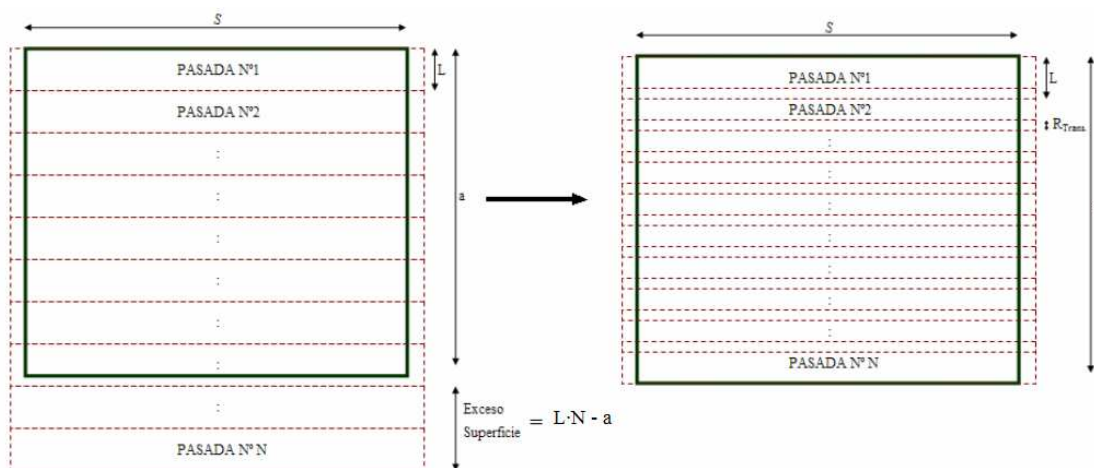


Fig. 4.3. Cálculo del recubrimiento transversal. a: ancho de la superficie a cubrir; L: ancho de barrido o huella de la línea CCD sobre el terreno y N: número total de pasadas.

En ningún caso el valor de este recubrimiento deberá ser menor al 25%.

4.1.3. ESPECIFICACIONES DE LA TOMA DE DATOS GNSS/IMU

El método para la georreferenciación directa utilizado será GNSS diferencial, DGNSS, integrado con los datos procedentes del IMU o Unidad de Medida Inercial. DGNSS es un sistema que proporciona a los receptores de GNSS correcciones de los datos recibidos de los satélites GNSS, con el fin de proporcionar una mayor precisión en la posición calculada, pudiendo alcanzar hasta 5 cm en esta posición. Su fundamento radica en el hecho de que un receptor GNSS fijo en tierra (referencia) del que se conoce exactamente su posición basándose en otras técnicas más precisas, recibe la posición dada por el sistema GNSS, y puede compensar los errores producidos por este comparando ambas posiciones. Las estaciones de referencia o receptores fijos serán estaciones de la red de estaciones permanentes del Instituto Geográfico Nacional u otras estaciones que se encuentren próximas, siempre que se encuentren a menos de 40 km.

Sin embargo, existe un problema adicional asociado a la determinación inicial de las ambigüedades y al mantenimiento de dicho cómputo a lo largo del vuelo. Este cómputo o cálculo de errores se ve amenazado por la pérdida de la señal GNSS, fundamentalmente causadas por las propias alas del avión al girar 200 grados de una pasada a otra; por las variaciones en la geometría de la constelación de satélites, tanto más crítica cuanto más dure el tiempo de vuelo; y por las variaciones atmosféricas, que será más crítica cuanto mas bajo sea el vuelo y mayor sea la superficie a cubrir (más tiempo de vuelo). Para evitar pérdidas de la señal GNSS durante las maniobras del avión entre pasadas, el avión no puede ladearse y es obligado a deslizar, lo cual incrementa los tiempos de maniobra al final de cada línea de vuelo. Las imprecisiones asociadas al cómputo (Fig. 4.4) se traducen en una desviación de la trayectoria capturada por el GNSS con respecto a la real y que varía en función del tiempo (drift), y un error constante o traslación (shift).

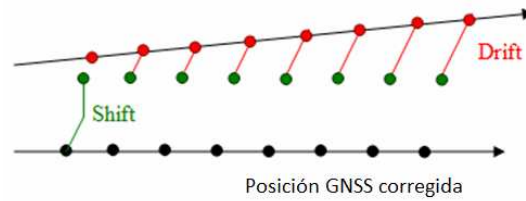


Fig. 4.4. Imprecisiones asociadas al cómputo de la trayectoria GNSS.

Por otro lado se sabe que la navegación inercial, Sistema de Navegación Inercial (IMU), se basa en el posicionamiento relativo a partir de la integración de las aceleraciones registradas por los acelerómetros, utilizando las velocidades angulares de los giróscopos para determinar la dirección del recorrido. De esta manera la tecnología GNSS/IMU proporciona observaciones complementarias. El GNSS produce posiciones y medida de tiempos, mientras que el IMU proporciona ángulos y posiciones. El IMU es autónomo, de forma que en caso de pérdida de navegación GNSS, puede proporcionar información de la posición del sensor. Sin embargo, sufre una propagación de errores elevada en el tiempo, que hace necesarios procesos de inicialización y calibración, por lo que precisa de las medidas GNSS. La complementariedad entre observaciones GNSS e IMU queda patente también en la frecuencia en la que son producidas las medidas en ambos sistemas: GNSS produce medidas a baja frecuencia ($\sim 2\text{Hz}$), mientras que las IMU producen medidas con una frecuencia mayor de 85Hz , necesarias para la georreferenciación de las imágenes lineales de barrido al permitir integrar la trayectoria entre puntos GNSS. La integración de los datos GNSS e IMU se realizará mediante el filtro Kalman (Caron et al., 2006) tal y como se citará en el apartado correspondiente al procesamiento de la orientación directa. Una vez transformados los datos e integrados con el IMU, la precisión de post-proceso para las coordenadas (X, Y, Z) de los centros proyectivos (puntos fijos) deberá ser igual o menor a 0.150 m para un vuelo para con $\text{GSD } 0.500\text{ m}$ (PNOA, 2012), y la precisión angular no debe conducir a errores angulares superiores a 0.005° (balanceo y cabeceo) y 0.008° (guiñada).

4.1.4. PARÁMETROS DE CAPTURA DEL SENSOR

Tanto para la cámara ADS40 como para la ADS80 se deberá disponer de una copia del certificado de calibración que habrá de realizarse con un periodo no superior a dos años antes de la fecha de vuelo (Anexo I). La cámara deberá cumplir además con las resoluciones geométricas, radiométricas y espectrales que variarán ligeramente en base al cabezal del sensor utilizado, tal y como se cita en el capítulo III, en el apartado correspondiente a las especificaciones de la resolución.

Independientemente de los parámetros de captura de los sensores (Tabla 4.1) se deben de tener en cuenta una serie de condicionantes para poder llevar a cabo de manera óptima la captura de datos: fecha y hora de la toma de datos, condiciones orográficas de la zona a cubrir, condiciones meteorológicas, etc.

	ADS40 SH52	ADS80 SH82
Configuración del plano focal.	12 arrays CCDs lineales: - 2 CCD pancromáticos simples. - 1 x 2 CCD lineal pancromático. - 8 CCD multiespectrales: 2 Rojos, 2 Verdes, 2 Azules y 2 Infrarrojos. - Ángulos en estéreo: 14°, 28°, 42°.	12 arrays CCDs lineales: - 2 CCD pancromáticos simples. - 1 x 2 CCD lineal pancromático. - 8 CCD multiespectrales: 2 Rojos, 2 Verdes, 2 Azules y 2 Infrarrojos. - Ángulos en estéreo: 18°, 25°, 45°.
Tamaño del array	12000 píxeles	12000 píxeles
Focal	62.70 mm	62.70 mm
Tamaño del píxel	6.5 x 6.5 micras	6.5 x 6.5 micras
FOV (campo de visión)	64 °	64 °

Tabla 4.1. Parámetros del sensor ADS40 SH52 y del sensor ADS80 SH82.

Teniendo en cuenta las características orográficas de las zonas a cubrir así como el periodo del año previsto para la realización del vuelo (se establecen como

fechas óptimas desde el 1 de mayo hasta el 30 de septiembre) se tendrá especial cuidado en seleccionar para el vuelo aquellas horas del día en el que se aseguren las mejores condiciones para las tomas a objeto de reducir al máximo la presencia de sombras en las mismas. Se deberán evitar las horas que propicien reflexiones especulares y “*hot spot*”⁷ (Beisl et al., 2006), garantizando que la altura del Sol sea mayor a 40° sobre el horizonte.

4.2. APOYO Y CHEQUEO TOPOGRÁFICO

4.2.1. DISTRIBUCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS PUNTOS TOPOGRÁFICOS

Una vez realizado el vuelo y por tanto sobre los propias imágenes, se proyectan los puntos de apoyo y chequeo que deben obtenerse en campo para la aerotriangulación y el control del vuelo fotogramétrico.

Se elegirá la ubicación de ambos tipos de puntos teniendo en cuenta la geometría del bloque fotogramétrico. Se establecerá una media de seis puntos por pasada de modo que presenten una distribución homogénea en toda la zona de trabajo. Estos puntos se elegirán teniendo en cuenta las siguientes condiciones:

- Que sean detalles artificiales fácilmente localizables en las imágenes, permitiendo su identificación espacial de forma inequívoca y precisa con un error menor a un píxel.
- Que sean elementos estables en el terreno, bien definidos y fácilmente identificables en las imágenes, evitando zonas de sombras.

⁷ Los “hot spot” son puntos brillantes debido a reflexiones especulares del sol, dichas reflexiones ocurren cuando los rayos reflejados poseen una intensidad comparable a la de los rayos incidentes y la elevación del sol es mayor a 70°.

- Que no presenten ninguna ambigüedad en la posición altimétrica (superficies planas).
- Que la precisión, tanto para el chequeo como para el apoyo, sea mejor o igual al 30% del tamaño del GSD más pequeño como medida de seguridad para el control externo. Así, para un GSD de 0.100 m se tomará como precisión para chequeo y apoyo 0.030 m, precisión alcanzable con el GNSS.

Puede darse el caso en el que la zona volada no esté urbanizada, o que apenas contenga detalles fácilmente identificables en las imágenes y que cumplan las especificaciones señaladas anteriormente. En este caso será necesario preseñalizar los puntos disponiendo de tarjetas de puntería repartidas por la zona de vuelo antes de la ejecución del mismo. Dichas tarjetas (Fig. 4.5) son de forma rectangular, situadas en terreno estable y llano y de color blanco o negro, dependiendo del contraste con el fondo o suelo sobre el que estén situadas.



Fig. 4.5. Ejemplo de tarjetas de puntería usadas en vuelos fotogramétricos sin detalles fácilmente identificables sobre el terreno.

4.2.2. OBSERVACIÓN DE LOS PUNTOS TOPOGRÁFICOS

Para la toma de los puntos topográficos se utilizará el método RTK (*Real Time Kinematic*) mediante equipos GNSS de doble frecuencia, usando el sistema de observación en modo VRS (*Virtual Reference Station*) con enlace a la red de estaciones de referencia más próximas a la zona de trabajo, siempre que sea posible. El objetivo del sistema VRS es sustituir al receptor de referencia, utilizando una red de estaciones permanentes GNSS como sistema diferencial,

conectadas en tiempo real a un centro de control, el cual almacena la información para poder crear una base de datos siendo capaz de generar un modelo de errores con las correcciones de la zona donde funciona el sistema. Es decir, se debe transformar las medidas hechas en estaciones de referencia reales a la localización de las VRS, es decir, a una localización diferente.

Partiendo del modelo matemático para las medidas de fase y considerando los términos que cambian al variar la localización, se podrá determinar la medida en la estación de referencia virtual.

Recuérdese que el modelo matemático para las medidas de fase es (4.2):

$$\phi_r^s(t) = \frac{1}{\lambda^s} \epsilon_r^s(t) + N_r^s + f^s \Delta\delta_r^s(t) \quad (4.2)$$

Donde $\phi_r^s(t)$ es la medida de la fase portadora expresada en ciclos, λ^s es la longitud de onda, N_r^s es la ambigüedad de fase que generalmente es un número entero, $\epsilon_r^s(t)$ es la distancia geométrica entre el punto observado (r) y el satélite (s), el término f^s es la frecuencia, que puede sustituirse por $f^s = \frac{c}{\lambda^s}$ donde c es la velocidad de la luz, y el término $\Delta\delta_r^s(t)$ es el error de reloj del satélite y el receptor.

Recuérdese que la distancia geométrica entre el punto observado y el satélite puede calcularse como:

$$\epsilon_r^s(t) = \sqrt{(X^s(t) - X_r)^2 + (Y^s(t) - Y_r)^2 + (Z^s(t) - Z_r)^2} \quad (4.3)$$

Donde $X^s(t), Y^s(t), Z^s(t)$ son las componentes del vector posición geocéntrico del satélite en la época t , y X_r, Y_r, Z_r son las coordenadas del punto observado

con el receptor.

Ahora bien, suponiendo que el receptor r está situado en la estación de referencia real A representada por el vector de coordenadas \mathbf{X}_A y a continuación se sitúa en la estación de referencia virtual (VRS) representada por \mathbf{X}_V . Los resultados de las dos situaciones vienen dadas por las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned}\phi_r^s(X_A, t) &= \frac{1}{\lambda^s} \varepsilon_r^s(X_A, t) + N_r^s + f^s \Delta \delta_r^s(t) \\ \phi_r^s(X_V, t) &= \frac{1}{\lambda^s} \varepsilon_r^s(X_V, t) + N_r^s + f^s \Delta \delta_r^s(t)\end{aligned}\tag{4.4}$$

Formando la diferencia entre ambas ecuaciones tenemos:

$$\phi_r^s(X_V, t) - \phi_r^s(X_A, t) = \frac{1}{\lambda^s} \varepsilon_r^s(X_V, t) - \frac{1}{\lambda^s} \varepsilon_r^s(X_A, t)\tag{4.5}$$

Donde la ambigüedad y el error del reloj se anulan ya que sus valores no cambian al variar la localización (Hofmann et al., 2008). Reagrupando términos se obtiene:

$$\phi_r^s(X_V, t) = \phi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda^s} [\varepsilon_r^s(X_V, t) - \varepsilon_r^s(X_A, t)]\tag{4.6}$$

Donde $\phi_r^s(X_V, t)$ es la medición de fase en la estación de referencia virtual. Por tanto, en el momento en que todos los términos del lado derecho de la ecuación (4.6) se puedan medir, se podrá determinar esta sin problema. Una vez que las coordenadas de la estación virtual se conocen, permanecerán invariantes en las épocas posteriores (a menos que el receptor usuario se desplace demasiado lejos de la VRS).

Esta ecuación es el modelo idealizado, ya que no se ha tenido en cuenta errores como el error de la órbita satelital y la refracción ionosférica y troposférica. Al utilizar estos errores en una estación de referencia real, se puede escribir:

$$\phi_r^s(X_v, t) = \phi_r^s(X_A, t) + \frac{1}{\lambda^s} [\varepsilon_r^s(X_v, t) - \varepsilon_r^s(X_A, t)] + \Delta_r^s(X_v, t) \quad (4.7)$$

Donde:

$$\Delta_r^s(X_A, t) = \Delta^{Orbit}(X_A, t) + \Delta^{Iono}(X_A, t) + \Delta^{Trop}(X_A, t) \quad (4.8)$$

Sin embargo, para determinar estos errores en la estación de referencia virtual $\Delta_r^s(X_v, t)$ se debe tomar los errores residuales $\Delta_r^s(X_A, t)$, $\Delta_r^s(X_B, t)$, $\Delta_r^s(X_C, t)$ de tres estaciones de referencia *A*, *B* y *C*, que rodeen a la estación de referencia virtual y calcular $\Delta_r^s(X_v, t)$ como la media ponderada cuyos pesos dependan inversamente de la distancia entre la estación de referencia virtual y la respectiva estación de referencia real.

Con este método es necesario que el usuario esté intercomunicado con el centro de control a través de un servidor para poder acceder a la red de estaciones permanentes. Esta comunicación puede realizarse a través de los estándares de comunicación GSM (*Groupe Speciale System*) o GPRS (*General Packet Radio System*).

Cuando se utiliza esta tecnología, los errores sistemáticos son reducidos o eliminados en la estación de referencia. Esto, no sólo permite al usuario incrementar la distancia entre los receptores móviles y la estación de referencia sino que también incrementa la fiabilidad del sistema y reduce el tiempo de inicialización.

Los resultados de esta técnica muestran precisiones planimétricas menores a 5 cm cuando las distancias entre las estaciones de referencia son de 35 km mientras que la componente altimétrica, suele mostrar precisiones entre 1.5 y 2 veces la precisión planimétrica (Retscher, 2002).

La mejor manera de minimizar el efecto del GDOP (Dilución de la Precisión Geométrica) es observar tantos satélites como sean posibles. No obstante, hay que recordar que las señales de satélites con poca elevación generalmente tienen una gran influencia de las fuentes de error. Como regla general, lo mejor es observar satélites con un ángulo de elevación superior a 15° sobre el horizonte. Las posiciones más precisas se calculan cuando el GDOP tiene un valor bajo, generalmente menor que 8.

Para cada punto de apoyo y chequeo se entregará un croquis junto con la toma de dos fotografías (situación y detalle) indicando el elemento tomado como tal, con indicación expresa del lugar al cual se le han referido las coordenadas, sus coordenadas, y la información de la pasada donde se ha materializado su identificación (Anexo III).

4.3. SISTEMAS DE COORDENADAS. TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS

A la hora de trabajar con el sensor de barrido de la ADS40/80 se manejan tres sistemas cartesianos y tres tipos de coordenadas diferentes (ADS Infokit, 2007 y 2009). Una vez vistos estos sistemas, se explicará la transformación de un sistema a otro. El conocimiento de estos sistemas es de vital importancia ya que son la base del procesamiento de las imágenes ADS40/80.

4.3.1. SISTEMA DE COORDENADAS IMAGEN

El primero de los sistemas de coordenadas es el sistema imagen, el cual abarca para cada una de las pasadas el número total de líneas de escaneo (sentido de las X) y los 12000 píxeles que componen cada uno de los CCD en el sentido de las Y , tal y como muestra la Figura 4.6. Las unidades en este sistema imagen son píxeles y será un sistema único para cada una de las imágenes.

El origen del sistema se sitúa en la esquina superior izquierda. La dirección de las X sigue la dirección de vuelo, computando cada una de las líneas de escaneo de cada pasada: líneas (*lines*). Y la dirección de las Y , hacia abajo, computan cada uno de los píxeles a lo largo de la línea escaneada: columnas (*samples*).

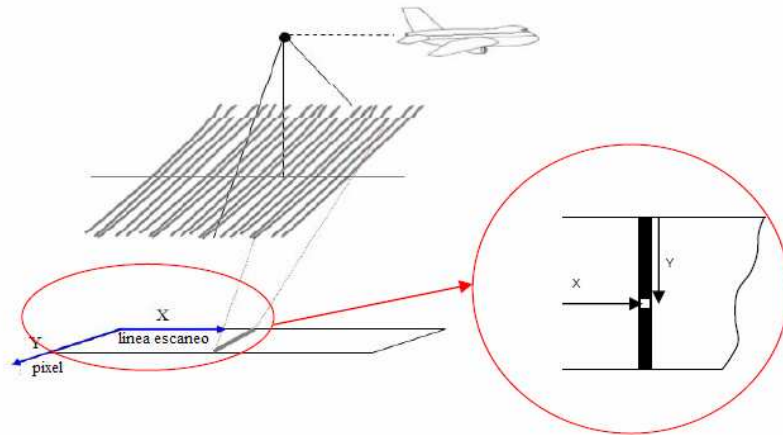


Fig. 4.6. Sistema de coordenadas imagen para la ADS40/80.

4.3.2. SISTEMA DE FOTOCOORDENADAS

El siguiente sistema coincide con el plano focal de la cámara, sus unidades son mm y tiene el origen en el punto principal. Recibe el nombre de sistema de fotocoordenadas, sistema focal o sistema de calibración y queda representado según la Figura 4.7. Queda definido con el certificado de calibración mediante la posición de cada uno de los píxeles de la línea de escaneo dentro de este plano focal para el que el sistema cartesiano es único y se almacenan en un fichero único para cada sensor.

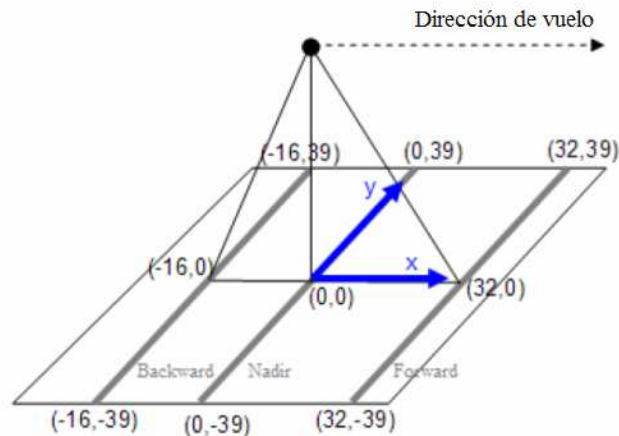


Fig. 4.7. Sistema de fotocoordenadas, focal o de calibración. Coordenadas aproximadas para los CCD pancromáticos de la ADS40/80. Unidades en mm.

La coordenada X expresa la posición de la línea de escaneo desde el punto principal (paralelo a la dirección de vuelo) y la coordenada Y registra la posición del píxel dentro de cada línea desde la posición central del plano focal (perpendicular a la dirección del vuelo).

Así se tendrá que para cada uno de los sensores pancromáticos la fotocoordenada X queda aproximadamente: línea de la vista hacia delante (Forward, PANF), 32 mm; línea de la vista nadiral (Nadir, PANN), 0 mm; línea de la vista hacia atrás (Backward, PANB), -16 mm. La fotocoordenada Y toma valores desde -39 mm a 39 mm aproximadamente (Fig. 4.7).

Estos valores pueden variar debido a que las líneas CCD están ligeramente curvadas sobre el plano focal, tal y como se citó en el apartado correspondiente a los parámetros relativos a la línea CCD, en el capítulo III de esta Tesis Doctoral, o bien a la distorsión radial de la lente. De esta manera, la coordenada X puede llegar a discrepar hasta 250 micras de su valor teórico para el CCD pancromático correspondiente a la vista hacia delante (PANF), situándose este valor máximo en el centro de la línea CCD. En cuanto a la coordenada Y obtenemos discrepancias de hasta 600 micras para el sensor nadiral pancromático (PANN). El resto de discrepancias obtenidas para los CCD pancromáticos son presentadas en el apartado correspondiente en el capítulo V de resultados experimentales.

4.3.3. SISTEMA DE COORDENADAS OBJETO

El tercer y último sistema de coordenadas es el sistema objeto. Este sistema es un sistema de coordenadas particular (LSR-Local Space Rectangular) (Fig. 4.8) consistente en un sistema geodésico local referido al ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*) con origen en el punto fundamental (o de anclaje) sobre el elipsoide con altitud elipsoidal nula. Este sistema es único para cada pasada y sus coordenadas geodésicas (latitud y longitud) figuran en los ficheros suministrados por el fabricante. En el LSR el eje Z es coincidente con la dirección de la vertical geodésica del punto de anclaje y sentido hacia el cénit, el eje Y se sitúa en el plano horizonte geodésico en la dirección de la meridiana geodésica y sentido hacia el norte, completando el eje X una terna dextrógira.

Es importante reseñar que este sistema es el utilizado en el procesamiento fotogramétrico. De hecho, la imagen L1 no es sino una rectificación de la imagen L0 sobre un plano horizonte geodésico paralelo al del LSR a una altitud elipsoidal media del terreno en la zona de la imagen.

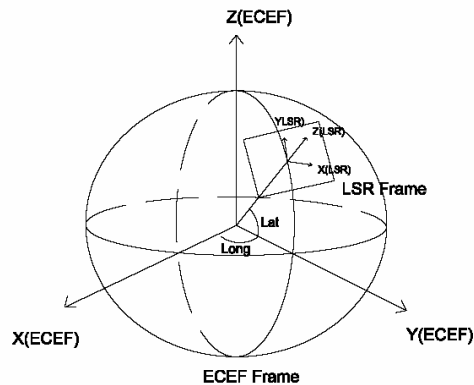


Fig. 4.8. Definición del sistema de coordenadas objeto LSR de una imagen de barrido de la ADS40. ECEF: Earth Centered, Earth Fixed.

4.3.4. TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS

A continuación, se citarán las transformaciones necesarias entre estos sistemas cartesianos para operar con las imágenes lineales ADS40/80 (Fig. 4.9):

De coordenadas píxel a fotocoordenadas.

- Directo
- Inverso

De fotocoordenadas a coordenadas objeto.

- Directo
- Inverso

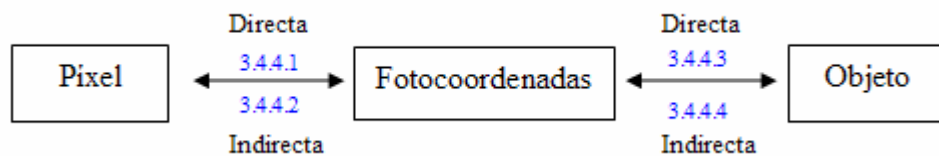


Fig. 4.9. Figura esquemática de las transformaciones entre sistemas de coordenadas.

4.3.4.1. Transformación de las coordenadas píxel a las fotocoordenadas.

Esta transformación es necesaria para poder aplicar la condición de colinealidad clásica relacionando las fotocoordenadas con las coordenadas terreno.

Siendo (x',y') las fotocoordenadas e Y la coordenada píxel a transformar, se tiene que $(x'[Y],y'[Y])$ serán las fotocoordenadas correspondientes a la coordenada Y (Fig. 4.10) tal y como aparecen recogidas en el certificado de calibración. La coordenada X píxel expresa el número de la línea escaneada a lo largo de una determinada pasada, y no se considera dato necesario para la transformación entre las coordenadas píxel a las fotocoordenadas.

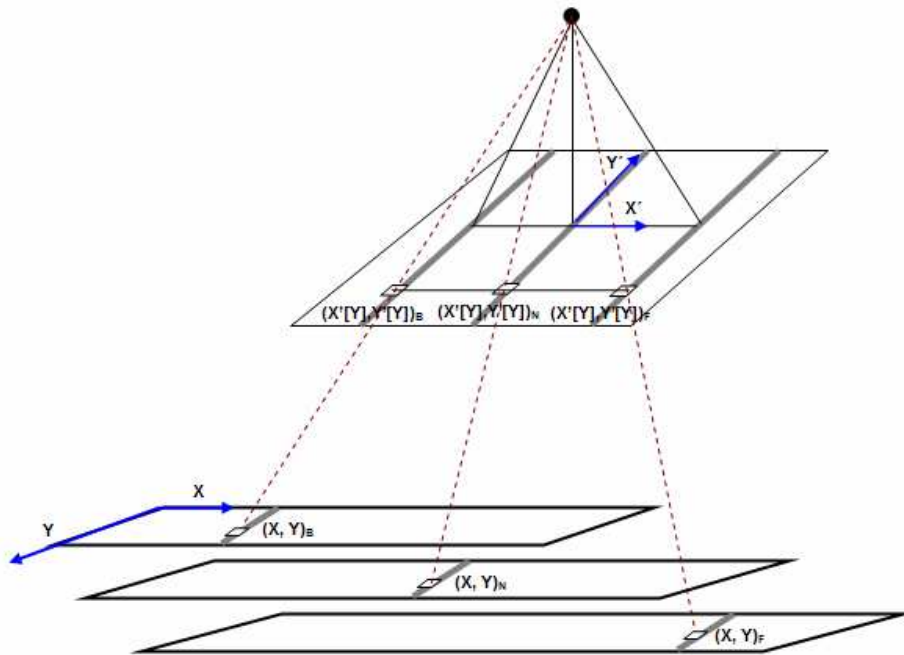


Fig. 4.10. Figura esquemática de la transformación entre el sistema imagen y el sistema de fotocoordenadas de la ADS40/80.

$$\begin{aligned} x' &= x'[Y] + D(x'[Y+1] - x'[Y]) \\ y' &= y'[Y] + D(y'[Y+1] - y'[Y]) \end{aligned} \quad (4.10)$$

El término D , tanto para la fotocoordenada x' como para la fotocoordenada y' , expresa la parte decimal de la coordenada píxel en caso de una resolución subpíxel. Por tanto, el término $D(x'[Y+1] - x'[Y])$ expresa una interpolación lineal entre un píxel y el siguiente en función de la parte decimal de la coordenada X y el término $D(y'[Y+1] - y'[Y])$ expresa la interpolación lineal entre un píxel y el siguiente en función de la parte decimal de la coordenada Y .

4.3.4.2. Transformación de fotocoordenadas a coordenadas píxel.

No es exactamente recíproca de la anterior pues debe pasarse de un sistema de fotocoordenadas, que depende de cada uno de los distintos sensores de captura, a un sistema único para toda la pasada. Es decir, hay tantos sistemas de fotocoordenadas por pasada como sensores de captura de la cámara ADS40/80.

En definitiva, la coordenada píxel Y (coordenada imagen Y) se obtiene a partir de las relaciones recogidas en el certificado de calibración, mediante una interpolación lineal entre fotocoordenadas, pero la coordenada píxel X (coordenada imagen X) depende de la línea de escaneo.

Denominando Y a la coordenada píxel; y' a su correspondiente fotocoordenada; $[Y_0, Y_n]$ al intervalo en el que se encuentra la coordenada píxel Y ; y $y'[Y_0]$ e $y'[Y_n]$ a las fotocoordenadas de Y_0 e Y_n , se obtiene que la interpolación que se plantea para la coordenada píxel Y , se realiza entre dos píxeles consecutivos de fotocoordenadas conocidas, $y'[Y_0]$ e $y'[Y_n]$, de tal modo que la coordenada píxel Y a conocer se encuentre comprendida ente ambas (Fig. 4.11).

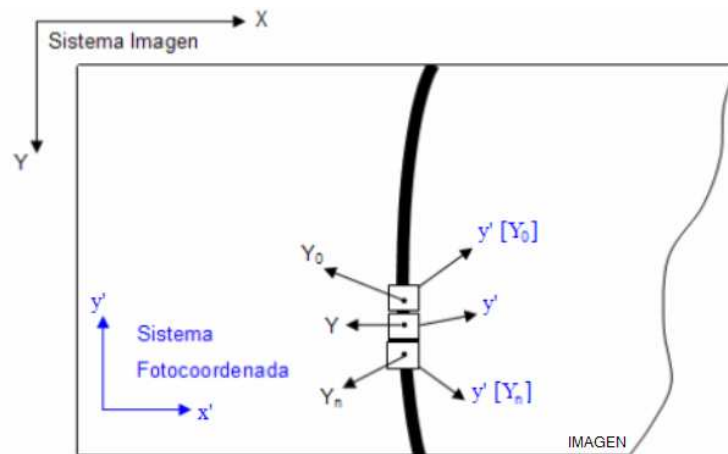


Fig. 4.11. Figura esquemática de la transformación entre el sistema de fotocoordenadas y el sistema imagen de la ADS40/80.

Por tanto para una fotocoordenada conocida y' cuya coordenada píxel Y queremos conocer, tendríamos:

$$\frac{Y - Y_0}{Y_n - Y_0} = \frac{y' - y'[Y_0]}{y'[Y_n] - y'[Y_0]} \quad (4.11)$$

De manera que la transformación queda:

$$X = \text{Numero de linea}$$

$$Y = Y_0 + (Y_n - Y_0) \frac{y' - y'[Y_0]}{y'[Y_n] - y'[Y_0]} \quad (4.12)$$

4.3.4.3. Transformación de fotocoordenadas a coordenadas objeto.

Esta transformación se plantea por el procedimiento convencional según la condición de colinealidad.

Denominando $(x, y, -f)$ las fotocoordenadas referidas al punto principal; (X', Y', Z') las coordenadas objeto; (X'_s, Y'_s, Z'_s) las coordenadas terreno del punto de vista; \mathbf{R} la matriz de rotación (3x3); y λ el factor de escala, se obtiene que:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} = \lambda \mathbf{R} \begin{bmatrix} X' - X'_s \\ Y' - Y'_s \\ Z' - Z'_s \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

La matriz de rotación \mathbf{R} , muestra las rotaciones de los tres ejes del sistema de coordenadas objeto con respecto al sistema de fotocoordenadas (Fig. 4.12), por lo que se obtiene que:

$$R = R(\chi) \cdot R(\varphi) \cdot R(\omega) \quad (4.14)$$

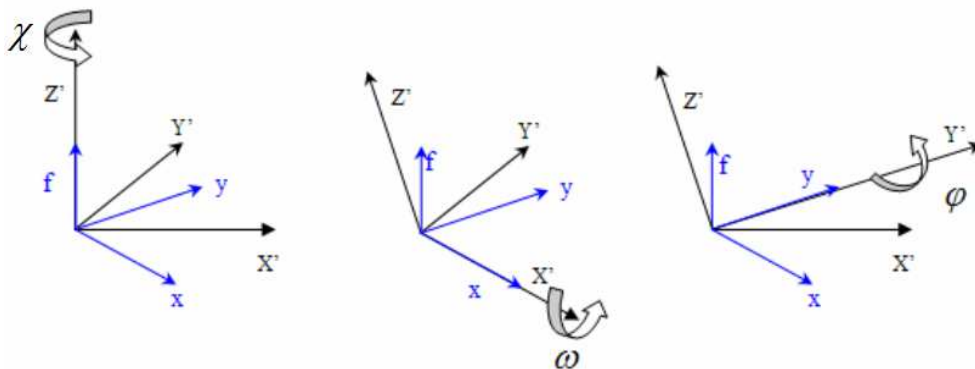


Fig. 4.12. Rotaciones entre los ejes de los sistemas de fotocoordenadas y el sistema objeto de la ADS40/80.

Llamando χ al ángulo de rotación del plano $X'Y'$ sobre el eje Z' , ω al ángulo de rotación del plano $Z'Y'$ sobre el eje X' , y φ al ángulo de rotación alrededor del eje Y' (Fig. 4.11), se puede escribir las matrices de rotación como:

$$R(\chi) = \begin{bmatrix} \cos \chi & \text{sen} \chi & 0 \\ -\text{sen} \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$R(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega & \text{sen} \omega \\ 0 & -\text{sen} \omega & \cos \omega \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

$$R(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & -\text{sen} \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (4.17)$$

Por tanto, se tiene que la matriz de rotación \mathbf{R} es:

$$R = \begin{bmatrix} \cos \chi \cdot \cos \varphi & \text{sen} \chi \cdot \cos \omega + \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \varphi \cdot \cos \chi & \text{sen} \chi \cdot \text{sen} \omega - \cos \omega \cdot \cos \chi \cdot \text{sen} \varphi \\ -\text{sen} \chi \cdot \cos \varphi & \cos \omega \cdot \cos \chi - \text{sen} \omega \cdot \text{sen} \chi \cdot \text{sen} \varphi & \cos \chi \cdot \text{sen} \omega + \cos \omega \cdot \text{sen} \chi \cdot \text{sen} \varphi \\ \text{sen} \varphi & -\cos \varphi \cdot \text{sen} \omega & \cos \varphi \cdot \cos \omega \end{bmatrix} \quad (4.18)$$

Es conveniente reseñar que no es necesario aplicar corrección sobre las fotocoordenadas (correcciones referentes al punto principal y a la distorsión), pues las fotocoordenadas se almacenan corregidas en el fichero de calibración de la cámara. Por tanto, y a partir de la ecuación (4.13), para la transformación directa (de fotocoordenadas a coordenadas objeto) tenemos:

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix} + \lambda^{-1} R^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

Para poder resolver se necesita, como es habitual, las fotocoordenadas de al menos dos puntos homólogos (cuatro ecuaciones para tres incógnitas). Lo natural será trabajar con puntos homólogos para las tres líneas (hacia atrás, nadir y hacia delante) y por tanto plantear seis ecuaciones.

Es decir, para un punto del terreno, P , se obtienen las fotocoordenadas en cada uno de los sensores pancromáticos que barren dicho terreno (Fig. 4.12).

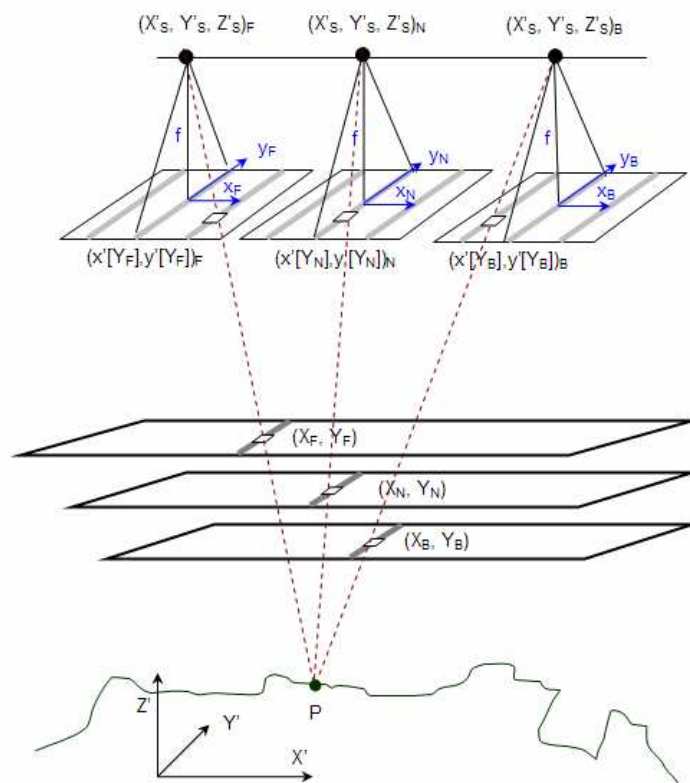


Fig. 4.13. Figura esquemática de la transformación entre fotocoordenadas y coordenadas objeto.

4.3.4.4. Transformación de coordenadas objeto a fotocoordenadas.

Del mismo modo que la transformación anterior, el paso de coordenadas objeto a fotocoordenadas se plantea por el procedimiento convencional según la condición de colinealidad. La ecuación (4.20) expresa esta transformación, donde del mismo modo que ocurre anteriormente, las fotocoordenadas son referidas al punto principal.

$$\begin{aligned} x &= -f u' / w' \\ y &= -f v' / w' \end{aligned} \quad \begin{bmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} X' - X'_s \\ Y' - Y'_s \\ Z' - Z'_s \end{bmatrix} \quad (4.20)$$

En el caso de imágenes digitales de formato matricial, los parámetros de orientación interna y externa son los mismos para todos los puntos de la imagen e incluso para todas las bandas de la imagen, pero en el caso de sensores barredores, como es el caso de la ADS40/80, los parámetros de orientación externa son diferentes para cada línea de barrido que conforman la imagen y dentro de cada línea de barrido las fotocoordenadas serán distintas para cada píxel.

De ahí que la transformación entre estos dos sistemas de coordenadas no sea trivial ya que para poder aplicar los parámetros de la Orientación Externa se debe determinar el instante de captura de dicho punto para cada uno de los sensores pancromáticos y/o multiespectrales. Es decir, un punto en el terreno tendrá asociado tres puntos de vista, uno por cada sensor pancromático de la ADS40/80. De otra manera podríamos decir que, a cada punto del terreno se le asocia un par de coordenadas píxel por imagen (Fig. 4.13), y cada par de coordenadas píxel tendrá sus correspondientes fotocoordenadas.

4.3.5. APLICACIONES DE LAS TRANSFORMACIONES ENTRE SISTEMAS

Como aplicaciones de las transformaciones entre los sistemas de coordenadas explicadas en el punto anterior, cabe desatacar dos (Fig. 4.14).

1. El primero de ellos consiste en la intersección espacial y podría formularse como el cálculo de las coordenadas objeto de un punto a partir de las coordenadas píxel. Esta transformación permite:
 - Cálculo de la huella de una imagen sobre el terreno (MDT) o sobre un plano de referencia mediante la intersección de los rayos proyectivos de las cuatro esquinas de la imagen.

- Cálculo del MDT mediante la intersección de los rayos proyectivos de una muestra de puntos de dos o más imágenes, por ejemplo vista hacia delante y hacia atrás del sensor pancromático.
2. El segundo de ellos consiste en una resección espacial y podría formularse como el cálculo de las coordenadas píxel a través de las coordenadas objeto. La aplicación de esta transformación es la generación de ortofotos, la generación de L1 o la obtención de las coordenadas imagen de un punto de apoyo o chequeo medido por técnicas GNSS en el terreno como medida de control para las imágenes aerotrianguladas.

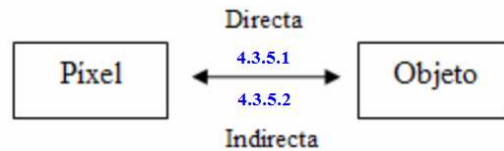


Fig. 4.14. Figura esquemática de las aplicaciones de las transformaciones entre sistemas de coordenadas.

4.3.5.1. Transformación de coordenadas píxel a coordenadas objeto.

Tal y como se ha comentado, la transformación de coordenadas píxel a coordenadas objeto permite obtener la huella de la imagen sobre un MDT (Fig. 4.15). Este procedimiento se resuelve al encontrar la intersección sobre el MDT de los rayos proyectivos de los puntos del marco de la imagen. Es decir, se dispone de los rayos proyectivos de cada uno de los puntos del marco de la imagen pero no se conoce su coordenada Z' sobre el MDT.

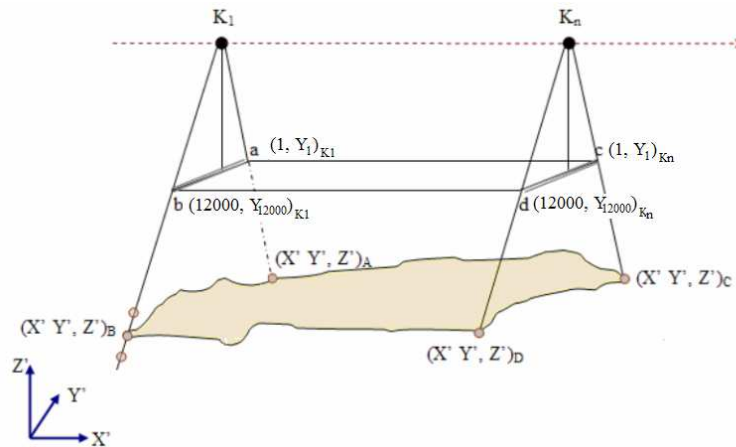


Fig. 4.15. Proyección de la huella de la imagen sobre el MDT.

La solución (Kraus, 1997) se plantea a partir de la ecuación de colinealidad (4.21):

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{pmatrix} + \lambda \cdot \mathbf{R} \cdot \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \\ -f \end{pmatrix} \quad (4.21)$$

Donde $(X' Y' Z')_i$ representa las coordenadas objeto, $(x_i y_i -f)$ las fotocoordenadas de dicho punto, $(X'_s Y'_s Z'_s)$ las coordenadas del punto de vista, λ el factor de escala y \mathbf{R} la matriz de rotación que da cuenta de las discrepancias entre los ejes cartesianos entre el sistema de fotocoordenadas y el sistema objeto.

Si estimamos la altura inicial del punto objeto a calcular como la altura máxima del MDT, podremos situar a dicho punto sobre el rayo proyectivo (Fig. 4.16) calculando sus correspondientes coordenadas planimétricas (4.22).

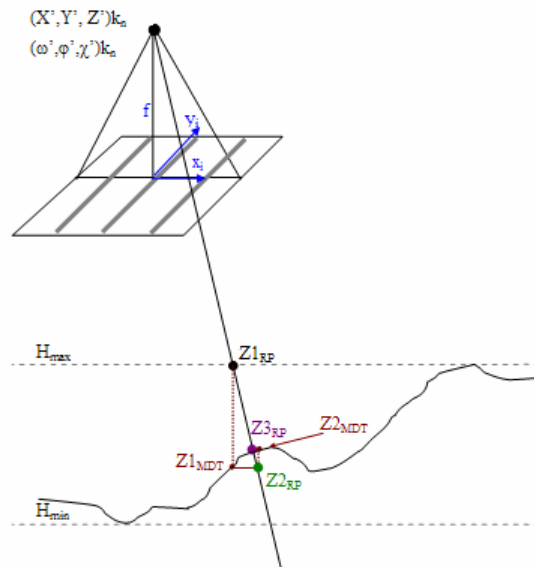


Fig. 4.16. Determinación de un punto sobre el rayo proyectivo.

$$\begin{aligned}
 Z'_i &= Z_{\max} \text{ del MDT} \\
 X'_i &= X'_S + \left[\frac{(Z'_i - Z'_S)(r_{11}x_i + r_{12}y_i - r_{13}f)}{(r_{31}x_i + r_{32}y_i - r_{33}f)} \right] \\
 Y'_i &= Y'_S + \left[\frac{(Z'_i - Z'_S)(r_{21}x_i + r_{22}y_i - r_{23}f)}{(r_{31}x_i + r_{32}y_i - r_{33}f)} \right]
 \end{aligned} \tag{4.22}$$

Estas coordenadas (4.22) tendrán asociadas una altura conocida sobre el MDT (Z_{1MDT}). Si la diferencia entre esta altitud y la correspondiente altitud sobre el rayo proyectivo Z_{1RP} es menor a una tolerancia establecida a priori el proceso ha finalizado (4.23).

$$\begin{aligned}
 \Delta Z &= Z_{1RP} - Z_{1MDT} \\
 |\Delta Z| < \text{Tolerancia} &\rightarrow \text{Solución} \equiv (X'_i \quad Y'_i \quad Z_{1RP})
 \end{aligned} \tag{4.23}$$

En caso contrario y utilizando como altura del punto objeto a calcular la altura sobre el MDT obtenida en el paso anterior (Z_{1MDT}), se volverán a calcular las coordenadas planimétricas de la nueva estimación del punto sobre el rayo proyectivo (4.22).

De esta manera entraremos en un proceso iterativo consistente en ir calculando las coordenadas planimétricas del punto imagen sobre el rayo proyectivo utilizando como coordenada altimétrica del punto la altura del MDT de la iteración anterior. El proceso finalizará cuando el incremento de altura entre el punto objeto y el MDT esté dentro de la tolerancia establecida a priori. En caso de que la altura del punto objeto calculada fuese menor a la interpolada se debería volver a la iteración anterior ya que se busca la primera y única intersección (Felipe, 2010).

4.3.5.2. Transformación de coordenadas objeto a coordenadas imagen.

Tal y como se ha visto en las transformaciones entre sistemas de coordenadas, dadas las coordenadas píxel de un punto es sencillo obtener sus correspondientes fotocoordenadas. Sin embargo, si se parte de las coordenadas objeto, para obtener las coordenadas píxel correspondientes se necesita conocer los parámetros de orientación externa, los cuales dependen a su vez de la solución del problema, lo que exigirá incorporar un proceso iterativo consistente en una resección espacial (Hernández et al., 2011).

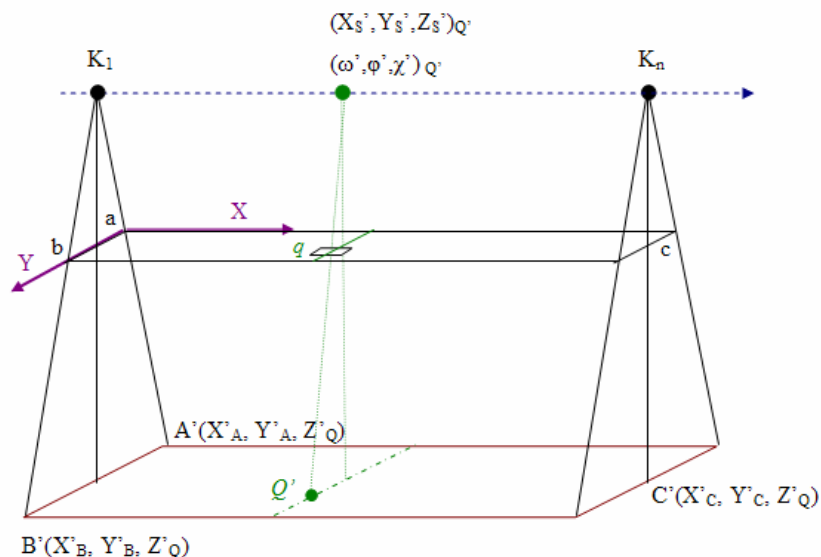


Fig. 4.17. Resección espacial de un punto sobre el MDT.

La solución al problema se concreta en los siguientes pasos:

1. Comprobar que la imagen contiene al punto objeto. Es decir, determinar si el punto se encuentra en el interior de la huella sobre el MDT de la imagen.
2. Establecer una ventana imagen de búsqueda.
3. Establecer la correspondiente ventana objeto de búsqueda.
4. Relacionar ambas ventanas de búsqueda a través de una transformación afín.
5. Redefinir la ventana imagen.
6. Entrar en un proceso iterativo recalculando la correspondiente ventana objeto hasta que el tamaño de la ventana de búsqueda sea 20 píxeles o menor.

A continuación se mostrará con mayor detenimiento el proceso.

Una vez comprobado que el punto objeto Q' se encuentra en el interior de la huella sobre el MDT de la imagen (Kraus, 1997) se establecerá una ventana de búsqueda sobre dicha imagen $\{a, b, c\}$. Inicialmente se hará corresponder el punto a con la esquina superior izquierda del marco de la imagen, el b con la esquina inferior izquierda y el c con el punto medio de la última línea de escaneo (4.24).

$$a = (0, 0), b = (0, \text{píxel} - 1) \text{ y } c = \left(\text{línea} - 1, \frac{\text{píxel} - 1}{2} \right) \quad (4.24)$$

A continuación se calculará la correspondiente ventana objeto $\{A', B', C'\}$. Para ello se calculará la huella de la ventana imagen $\{a, b, c\}$ sobre un plano de altura constante igual al valor de la coordenada altimétrica del punto objeto Q' (Fig. 4.17).

Considerando un caso ideal de toma, ambas ventanas quedan relacionadas considerando que existe una transformación afín entre el plano definido por los

puntos A , B y C de la huella de la imagen con el plano definido por los puntos a , b y c sobre la imagen. De esta manera podremos ir del plano en el espacio objeto al plano en el espacio imagen. Encontrada esta transformación, si se aplica al punto objeto Q' se puede obtener una posición aproximada de q en la imagen (Fig. 4.17).

Para deducir la expresión matemática correspondiente a la transformación afín hay que considerar una rotación entre ambos planos (α), un factor de escala tanto para las coordenadas X (λ_x) como para las coordenadas Y (λ_y) y una translación entre los orígenes de ambos planos (X_T , Y_T).

$$\begin{aligned} X' &= \lambda_x \cdot (X \cdot \cos \alpha + Y \cdot \sin \alpha) + X_T \\ Y' &= \lambda_y \cdot (Y \cdot \cos \alpha - X \cdot \sin \alpha) + Y_T \end{aligned} \quad (4.25)$$

Donde (X' , Y') son las coordenadas del sistema objeto y (X , Y) son las correspondientes coordenadas imagen.

Se debe de tener presente que se ha considerado un caso de toma ideal y en un caso de vuelo real, con presencia de vibraciones en la plataforma giroestabilizadora y movimientos del avión, el error en la aproximación de la transformación determinada disminuirá a medida que lo hagan sus dimensiones, es decir a medida que se trabaje en un entorno más reducido en torno al punto buscado.

Por tanto, y calculada la posición aproximada del punto Q' sobre la imagen (q), se determina el tamaño de la ventana de búsqueda para la siguiente aproximación. Las nuevas coordenadas imagen de los puntos a , b y c se obtienen según la siguiente expresión (4.26):

$$a = \left(X_q + \frac{v}{4}, Y_q - \frac{v}{4} \right), b = \left(X_q - \frac{v}{4}, Y_q - \frac{v}{4} \right) \text{ y } c = \left(X_q + \frac{v}{4}, Y_q \right) \quad (4.26)$$

Donde v es el tamaño de la ventana de búsqueda.

El proceso finaliza cuando las dimensiones de la ventana de búsqueda sean tales que su ancho y alto sean inferiores a un valor (en píxeles) establecido a priori.

Estableciendo las dimensiones de la ventana de búsqueda en 20 píxeles se garantiza que la posición del punto Q' en coordenadas imagen se encuentre dentro de esta ventana. De esta manera se podría extraer los parámetros de orientación de cada una de las líneas de escaneo que conforman la ventana imagen y determinar a través de los rayos proyectivos que forman dichos parámetros de orientación con el punto objeto Q' , cada una de las posibles soluciones de q en dicha ventana (Fig. 4.18).

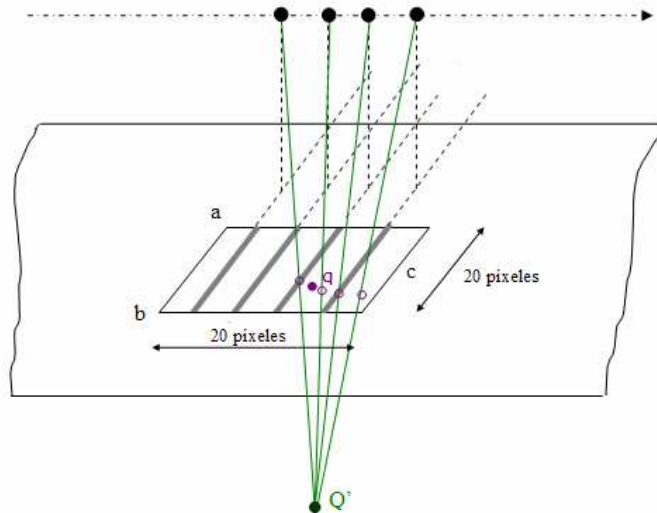


Fig. 4.18. Cálculo de posibles puntos imagen q a través de los rayos proyectivos de Q' y los parámetros de orientación para cada línea de escaneo dentro de la ventana imagen.

A continuación y resolviendo cada uno de los rayos proyectivos para cada punto q obtenido a través de las ecuaciones de colinealidad, podremos comprobar cual de los puntos imagen obtenidos se corresponde al punto Q' objeto (Fig. 4.19).

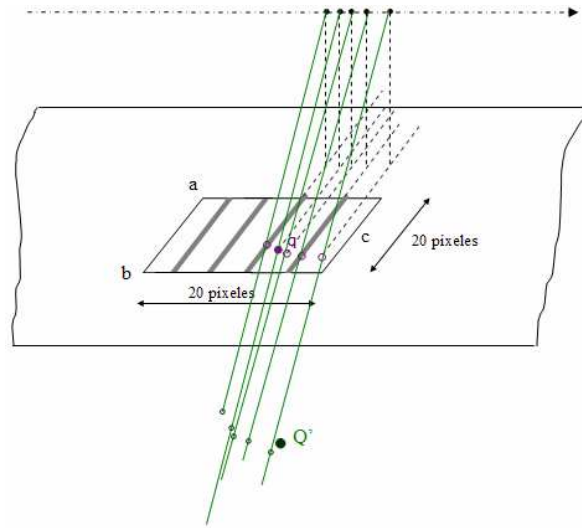


Fig. 4.19. Cálculo de posibles puntos objeto Q' a través de los rayos proyectivos de los puntos imagen q y los parámetros de orientación para cada línea de escaneo dentro de la ventana imagen.

4.4. CALIBRACIÓN/AUTOCALIBRACIÓN DEL SENSOR LINEAL

En el capítulo II de esta Tesis Doctoral se ha explicado la metodología a seguir para llevar a cabo la calibración de la ADS40/80. Recuérdese que además del procedimiento de laboratorio se hace necesario un procedimiento de calibración in situ basado en un proceso de autocalibración en el que se determina el desalineamiento (*boresight*) entre el sistema inercial y la cámara. Además se hace necesario conocer el vector de excentricidad (*lever arm*) entre el centro de la antena GNSS y la cámara (Fig. 4.20).

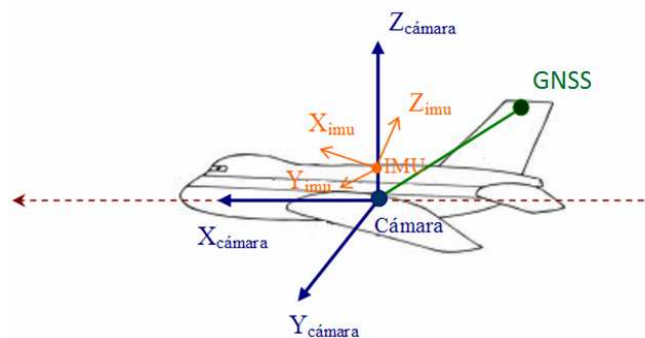


Fig. 4.20. Esquema del triple sensor: ADS40/80 + GNSS/IMU.

El vector entre el GNSS, situado en la parte superior de avión, y la cámara, en la parte inferior, suele ser determinado topográficamente con el avión en tierra y es un vector solidario con el cuerpo del avión con lo que el sistema cartesiano más adecuado para su representación es el propio de la cámara, especialmente si esta permaneciera inmóvil respecto del avión.

En la medida en que la cámara está dotada de un dispositivo basculante compensatorio de los giros del avión (alabeo, cabeceo y deriva) se hará necesario introducir una matriz adicional que dé cuenta de la relación entre el sistema de fotocoordenadas y el sistema del avión.

La plataforma IMU se adjunta al cuerpo de la cámara registrando valores angulares que intervienen en el cálculo de la orientación externa. Sin embargo, existirá una pequeña desviación entre los ejes de la cámara y los ejes del IMU, es decir, existe una desalineación entre los ejes. En el momento en el que los ejes del IMU están rotados con respecto a los ejes del sistema de fotocoordenadas se hace necesario calibrar dicho desalineamiento (*boresight*). Para ello se emplea una matriz de rotación \mathbf{R}_M (3x3) que da cuenta de la diferencia entre los valores angulares obtenidos por el IMU y los valores angulares correspondientes a la orientación externa directa.

El cuanto a la determinación de la geometría interna del sensor, y a pesar de la calibración realizada en el laboratorio, se recalculan los valores de: la distancia principal o focal, del punto principal, del punto de mejor simetría, de la distorsión radial simétrica y de los desplazamientos y rotaciones de cada una de las líneas CCD sobre el plano focal. Estos parámetros entran en el modelo de autocalibración dado que pueden sufrir alteraciones con el tiempo que se traducen en errores sistemáticos en las coordenadas píxel de manera que deben ser calibrados de nuevo.

Una vez calibrado el triple sensor se recogen los valores referentes a las fotocoordenadas del primer y último píxel de cada uno de los CCD lineales, además de para el píxel central, junto con el valor de la focal y los ángulos del desalineamiento entre el IMU y la cámara en el certificado de calibración del sensor. (Anexo I).

4.4.1. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL VUELO DE AUTOCALIBRACIÓN

Con el fin de realizar una aceptable autocalibración se requiere un patrón especial de vuelo. Este patrón está formado por dos vuelos a distinta altura en el que se capturan dos líneas en forma de cruz. Cada una de estas líneas debe ser volada en los dos sentidos sumando así un total de cuatro pasadas para cada uno de los vuelos (Fig. 4.21). Se hace necesario que el segundo vuelo tenga como mínimo una altura sobre el terreno 1.5 veces mayor que el primero (Fuchs y Adigüzel, 2010). Esta configuración resulta ser especialmente robusta y permite (Tempelmann et al., 2007):

- Prescindir de los puntos de apoyo dando el factor de escala necesario para determinar el valor de la focal gracias a las dos alturas.
- Reducir las correlaciones ente el punto principal y los parámetros del desalineamiento (boresight) gracias al bloque en cruz.
- Reducir las correlaciones ente el punto principal y los desplazamientos de cada una de las líneas CCD mediante el bloque en cruz.

En caso de no disponer de dos vuelos a distinta altura se dispondrá de un único vuelo en cruz, incorporando puntos de apoyo que nos permitan determinar dicho factor de escala (Fig. 4.21). De esta manera podríamos reducir igualmente las correlaciones entre parámetros expuestas anteriormente.

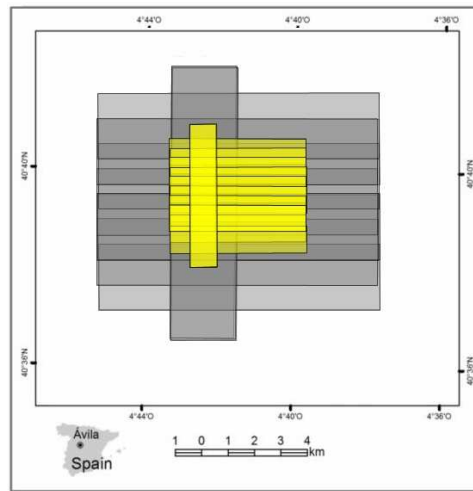


Fig. 4.21. Vuelos en cruz para la autocalibración del sensor ADS40/80. En amarillo: vuelo a menor altura. En gris: vuelo con altura 2.5 veces mayor al vuelo bajo.

En cualquier caso, la disposición del vuelo en cruz es imprescindible al igual que una gran densidad de puntos de paso que conecten las imágenes. Es decir, es de vital importancia disponer de una distribución y extracción de puntos de interés de calidad. Para ello se deben de seguir las siguientes indicaciones a la hora de elegir la zona de vuelo (Leica Geosystems, 2010):

- Evitar zonas con agua (océanos, lagos, ríos...).
- Evitar zonas con patrones repetitivos, como puedan ser zonas agrícolas.
- Evitar zonas con pobreza radiométrica. Las superficies con patrones de alto contraste generalmente dan mejores resultados (especialmente en las bandas del infrarrojo cercano y del azul).
- Evitar pendientes pronunciadas y/o líneas de ruptura ya que dan lugar a deformaciones de las máscaras de correlación utilizadas para la generación de los puntos de interés.

Del mismo modo se han de considerar también las siguientes indicaciones, condiciones establecidas por Leica Geosystems (2010), para realizar un vuelo de autocalibración:

- Para un vuelo en cruz con una altura media sobre el terreno de 1500 m, la longitud de la pasada ha de ser de unos 4000 m.
- Si el vuelo en cruz se realiza a 2500 m, la longitud de la pasada ha de ser de 6400 m.
- Para un vuelo en cruz con una altura media sobre el terreno de 3000 m, la longitud de la pasada ha de ser de unos 8000 m.
- Para un vuelo en cruz con una altura media sobre el terreno de 4000 m, la longitud de la pasada ha de ser de unos 10240 m.
- Y si el vuelo en cruz se realiza a una altura media sobre el terreno de 5000 m, la longitud de la pasada ha de ser de unos 12800 m.

A través de estas condiciones se podría determinar que la longitud de las pasadas en un vuelo de calibración debe ser entre 2 y 3 veces la altura de vuelo.

En relación con las opciones de cálculo para la autocalibración del sensor lineal, se procederá del siguiente modo:

- Para los dos vuelos en cruz a dos alturas diferentes, dado que podremos resolver sin puntos de apoyo, podrá utilizarse el modelo matemático que permite modelizar la excentricidad espacial entre la antena del GNSS y el punto de vista de la cámara (4.41) ya que el empleo del Helmert 3D requiere de puntos de apoyo para su resolución (véase apartado referente al ajuste de haces de esta Tesis Doctoral).
- Para un único vuelo en cruz y dado que se requiere puntos de apoyo, se realizará una transformación de Helmert 3D de manera que se pueda dar cuenta de posibles discrepancias entre el sistema cartesiano del GNSS y el sistema cartesiano fotogramétrico (4.42).

4.4.2. MODELO MATEMÁTICO

El modelo matemático de autocalibración para la ADS40/80 utiliza los siguientes parámetros que determinan la geometría interna del sensor (Tempelmann y Hinsken, 2007):

- Distancia principal o focal.
- Coordenadas del punto principal.
- Desplazamiento del punto de mejor simetría.
- Distorsión radial simétrica de la lente.
- Desplazamiento y rotación de cada una de las líneas CCD.

Para un sistema de lentes tal y como el de la ADS40/80, en el cual ha sido optimizada su resolución, telecentricidad⁸ y estabilidad térmica, debe introducirse la distorsión radial simétrica (Kocaman y Gruen, 2008). Sin embargo, como las imágenes deben ser remuestreadas para eliminar los movimientos del avión, la distorsión radial no es un obstáculo en el flujo de trabajo digital (Fuchs y Adigüzel, 2010). Esta distorsión es modelada mediante la introducción del polinomio de coeficientes ($e_1 - e_6$) de hasta sexto grado, con términos tanto pares como impares, y su punto de mejor simetría (x_s, y_s) (4.27) (Tempelmann et al., 2007):

⁸ La telecentricidad es una propiedad de las lentes que permite que los rayos de luz provenientes de todos los puntos del objeto se mantengan (muy cercanamente) paralelos al eje óptico del sensor.

$$\begin{aligned} dx_g(r, x) &= (x - x_s) \cdot (e_1 r + e_2 r^2 + e_3 r^3 + e_4 r^4 + e_5 r^5 + e_6 r^6) \\ dy_g(r, y) &= (y - y_s) \cdot (e_1 r + e_2 r^2 + e_3 r^3 + e_4 r^4 + e_5 r^5 + e_6 r^6) \end{aligned} \quad (4.27)$$

Donde:

$(dx_g, dy_g) \equiv$ Corrección en la distorsión radial.

$r = \sqrt{(x - x_s)^2 + (y - y_s)^2} \equiv$ Distancia radial para cada fotocoordenada medida.

$(x_s, y_s) \equiv$ Coordenadas del punto de mejor simetría.

Debido a que el plano focal está formado por varias líneas CCD, deben ser tenidos en cuenta desplazamientos y distorsiones adicionales. La distancia principal es fija y única para todos los sensores, con lo que un residuo en esa distancia se traduce en un desplazamiento de la línea CCD sobre el plano focal.

Tal y como citamos al hablar del sistema de fotocoordenadas o de calibración, la fotocoordenada X puede llegar a discrepar hasta 250 micras de su valor teórico (sensor pancromático hacia delante de la ADS40 SH52), mientras que la fotocoordenada Y puede discrepar hasta 600 micras (sensor nadiral pancromático de la ADS40 SH52). Por tanto se considerará tanto la traslación $(X_0(l), Y_0(l))$ como la rotación de cada línea CCD $(\alpha(l))$, donde l hace referencia a cada una de estas líneas CCD.

Así pues, se obtiene que la corrección en $X(dx)$ a aplicar a las fotocoordenadas es la suma de la corrección debido a la traslación y rotación del sensor (dx_l) y a la corrección debido a la distorsión (dx_g) :

$$dx = dx_g + dx_l \quad (4.28)$$

Donde $dx_l = X_0(l) + \alpha(l) \cdot Y$ (Fig. 4.22)

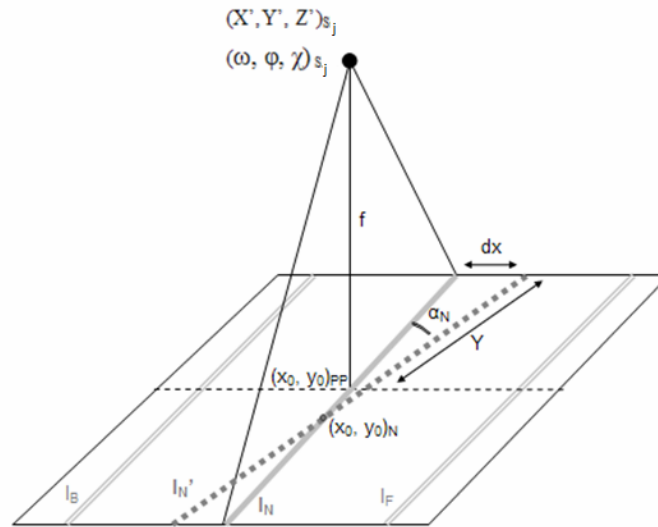


Fig. 4.22. Representación de las correcciones debido a la rotación y desplazamiento de los CCDs lineales sobre el plano focal.

Para la fotocoordenada Y se procedería de la misma manera, teniendo en cuenta que para esta fotocoordenada afecta muy poco el ángulo de rotación de la línea CCD, por lo que se desprecia en el cálculo de la corrección dy :

$$dy = dy_g + dy_l \quad (4.29)$$

Donde $dy_l = Y_0(l)$

Para limitar los grados de libertad relativos a los movimientos dentro del plano focal, se añaden las siguientes restricciones adicionales al ajuste (Fuchs y Adigüzel, 2010):

$$\sum x_0(l) = \sum y_0(l) = 0 \quad (4.30)$$

$$\sum \alpha(l) = 0 \quad (4.31)$$

Estas restricciones adicionales eliminan la fuerte correlación entre el desplazamiento del punto principal y el desplazamiento y rotación de cada una de las líneas CCD.

Por último, para modelizar la falta de alineamiento existente entre el IMU y la cámara (*boresight misalignment*) se emplea una matriz de rotación \mathbf{R}_M (3x3) adicional de manera que se verifica la relación:

$$\mathbf{R}_E = \mathbf{R}_{IMU} \times \mathbf{R}_M \quad (4.32)$$

en la que \mathbf{R}_E es la matriz de rotación (3x3) correspondiente a la orientación externa de cada imagen; \mathbf{R}_{IMU} es la matriz de rotación (3x3) correspondiente a los valores angulares obtenidos por el IMU y \mathbf{R}_M es la matriz de rotación (3x3) correspondiente al desalineamiento entre ambos sensores.

Mientras que las dos primeras son diferentes para cada imagen que compone el bloque, la última es constante para todo el vuelo o para diferentes pasadas del mismo.

El software de autocalibración ofrece la posibilidad de calcularlo para todo el vuelo o para cada pasada.

4.5. ORIENTACIÓN DIRECTA (GNSS/IMU)

La cámara ADS40/80 va equipada siempre con un sistema GNSS/IMU que proporciona la Orientación Directa registrando los movimientos del sensor durante el vuelo. Las especificaciones de este sistema son tales que los resultados de la orientación son apropiados para ciertos tipos de productos. Pero para obtener la máxima precisión y la máxima fiabilidad será necesario acometer un proceso adicional de aerotriangulación donde se integrarán los datos procedentes de esta Orientación Directa (véase punto 4.7). Por tanto, la solución encontrada como ideal no es emplear un sistema inercial demasiado sofisticado (y, por tanto, caro y preciso) sino uno de una gama algo inferior y suplir esta falta de precisión en el ajuste del bloque (Tempelmann et al., 2007). A esta combinación entre el proceso de aerotriangulación y el de referenciación directa mediante GNSS/IMU es lo que se denomina ISO (Integrated Sensor Orientation).

Para poder integrar los datos procedentes de la Orientación Directa en el ajuste del bloque o aerotriangulación, se trabaja con puntos fijos de orientación (*orientation fixes*) espaciados cada cierto tiempo. Tal y como se reseñó en el capítulo III, al hablar del modelo funcional del sensor lineal, las mejores condiciones geométricas son obtenidas cuando la distancia entre dos “*orientation fixes*” es igual a la base corta del sensor, siendo esta la distancia en el terreno que proyecta el menor ángulo de los tres generados por la disposición de los sensores pancromáticos (Hinsken et al., 2002). En el caso de la ADS40, la distancia en el terreno entre la proyección de la vista trasera y la vista nadiral.

Para cada uno de estos puntos fijos, K , se dispone de observaciones relativas a la posición del punto y a la orientación del sensor.

Los datos GNSS/IMU son procesados inicialmente de manera que la orientación de los seis parámetros de cada línea del sensor son dados en un sistema cartesiano local, LSR (*Local Space Rectangular*). Se puede describir de forma esquemática y resumida el procedimiento seguido para la obtención de los parámetros de orientación externa de las fotografías tanto para la ADS40 como para la ADS80:

- Obtención del fichero de observaciones de la estación de referencia GNSS junto con el fichero de efemérides de los satélites.
- Extracción y chequeo de los datos registrados por la unidad de medida inercial, (relaciones angulares y aceleraciones lineales) y de las observaciones GNSS.
- Conversión de los datos obtenidos en la fase anterior a un formato legible por el software de proceso y nueva comprobación de los datos registrados por la IMU y ambos receptores GNSS.
- Obtención de la trayectoria GNSS en sentido directo e inverso. A partir de los datos GNSS del receptor móvil y el receptor terrestre se ha obtenido una

trayectoria GNSS en postproceso con registro de coordenadas cada segundo. Se consideran dos trayectorias, una en sentido directo desde que el avión despegue realiza la toma fotográfica y vuelve al aeropuerto; y otra en sentido inverso, aterriza, realiza la toma fotográfica y despegue. Se tomara como trayectoria simple final la combinación de ambas.

- Obtención de la trayectoria final suavizada. Para ello se compara la trayectoria generada mediante GNSS diferencial por combinación de los dos receptores, móvil y terrestre y a un segundo de secuencia temporal con la trayectoria generada por las observaciones tomadas por la IMU de relaciones angulares y aceleraciones lineales con 0.005 segundos de secuencia de registro. La primera trayectoria quedará marcada por tres coordenadas en el espacio, mientras que esta última quedara definida por tres coordenadas en el espacio más tres valores angulares. De tal comparación, resultará una trayectoria final suavizada procesada a través del filtro Kalman⁹ y definida por 6 grados de libertad en la que se conserva la precisión absoluta de la técnica de GNSS diferencial y la precisión relativa proporcionada por los giróscopos y acelerómetros del IMU.

Los valores de orientación ($X, Y, Z, \omega, \phi, \kappa$) para cada una de las líneas escaneadas se almacenan en un fichero binario (*.odf) donde además se almacena el tiempo y las precisiones asociadas a cada uno de los valores de orientación.

⁹ El filtro Kalman es un proceso en dos pasos: “corrección” y “predicción” basado en la estimación, cuyos parámetros se corrigen en cada iteración dependiendo del error de predicción que se haya cometido en la iteración anterior. Es un estimador lineal y óptimo desde el punto de vista de mínimos cuadrados. (Mohinder et al., 2001) .

4.6. PRE-PROCESAMIENTO

Una vez suavizada la trayectoria se georreferencian las imágenes y se extraen y distribuyen los puntos de interés de manera automática sobre las tres imágenes pancromáticas (backward, nadir y forward).

La georreferenciación de las imágenes lleva asociada cuatro niveles de procesamiento (Leica Geosystems, 2009):

- Nivel 0: Son las imágenes tal y como las captura el sensor.
- Nivel 1: Imágenes georreferenciadas directamente desde los datos GNSS/IMU del avión y rectificadas sobre un plano, llamado plano de rectificación. Estas imágenes contienen distorsiones debido a los movimientos del avión y no tienen una orientación apropiada para la vista en estéreo. El desalineamiento entre el IMU y la cámara, y los errores de calibración pueden afectar negativamente al resultado de las imágenes de este nivel de procesamiento. Denominamos L0 a las imágenes resultantes de este nivel 1.
- Nivel 1 de precisión: Este nivel se emplea para generar imágenes estereoscópicas óptimas, la imagen se gira para situarla en dirección a la línea epipolar de visión estéreo. La imagen vuelve a sufrir una rectificación, esta vez sobre un plano en el que la altura generalmente será la altura media del terreno. Se produce un nuevo remuestreo de los píxeles de la imagen por lo que se aconseja trabajar por defecto con la L0. En este nivel de procesamiento son corregidos los movimientos del avión y la imagen obtenida se denomina L1.
- Nivel 2: Este nivel constituye la generación de las ortofotos.

Georreferenciadas las imágenes, y por tanto generadas las L0 y L1, se procede, tal y como se cita anteriormente, a la extracción y distribución de los puntos de

interés de calidad sobre las tres imágenes pancromáticas (backward, nadir y forward). Esta extracción de puntos puede realizarse o sobre las L0 o sobre las L1. En cualquier caso todo proceso de cálculo subyacente en el proceso de aerotriangulación se basa en las imágenes L0 y por ello se generan tablas de conversión de manera que desde el nivel 1 de precisión se tiene acceso inmediato a los niveles inferiores.

A continuación mostraremos con más detenimiento la generación de las imágenes L0 y L1. Si bien, se ha de señalar previamente, que tal y como cita Hernández et al., (2011), y aunque las pasadas no sean de gran longitud, el tamaño máximo del formato TIFF (4 Gbytes) no es suficiente para almacenarlas, lo que obliga a recurrir a una estrategia de almacenamiento en bloques que se almacena en el fichero ASCII.ads. La estructura en bloques de estas imágenes puede variar según el nivel de procesamiento de que se trate. Tal y como indica el autor (Hernández et al., 2011) la división a bloques para imágenes L0 se realiza en estructura vector mientras que para imágenes L1, las cuales pueden almacenar varias bandas (RGB y NIR), la división a bloques se realiza en forma matricial.

4.6.1. FORMACIÓN DE LA IMAGEN L0

Tal y como se citó al hablar del Nivel 1 de procesamiento, las imágenes L0 se obtienen tras la rectificación sobre un plano, de altura conocida constante H , y son georreferenciadas directamente con los datos GNSS/IMU capturados durante el vuelo (Leica Geosystems, 2009). Dado que, debido a esto, ni los movimientos del avión ni el desalineamiento entre el IMU y la cámara son corregidos, las imágenes contienen distorsiones tal y como se puede apreciar en la Figura 4.23.



Fig. 4.23. A la derecha imagen de la L1. A la izquierda la misma imagen sobre la L0 (Tempelmann et al., 2000).

Estas imágenes son las empleadas para cualquier cálculo del proceso fotogramétrico y su rectificación se realiza mediante la condición de colinealidad particularizando el modelo para el caso de una altura constante H , a la que se le denomina altura del plano de rectificación y que suele ser, aproximadamente, la altura del terreno de las imágenes, siempre que se conozca esta (Leica Geosystems, 2009).

$$\begin{bmatrix} X' \\ Y' \\ H \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X'_s \\ Y'_s \\ Z'_s \end{bmatrix} + \lambda^{-1} R^T \begin{bmatrix} x \\ y \\ -f \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

Por tanto, operando tendríamos que:

$$\begin{aligned} X' &= X'_s + (H - Z'_s) \frac{r_{11}x + r_{21}y - r_{31}f}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}f} \\ Y' &= Y'_s + (H - Z'_s) \frac{r_{12}x + r_{22}y - r_{32}f}{r_{13}x + r_{23}y - r_{33}f} \end{aligned} \quad (4.34)$$

Donde (X', Y') serán las coordenadas píxel del plano de rectificación de la L0 del punto de vista (X'_s, Y'_s, Z'_s) , cuyas fotocoordenadas referidas al punto principal son (x, y, f) . H es la altura del plano de rectificación y \mathbf{R} es la matriz de rotación (3x3) que da cuenta de las diferencias angulares entre los ejes cartesianos del sistema de fotocoordenadas y el sistema LSR.

Es fundamental, por tanto, que las coordenadas del punto de vista, es decir, los parámetros de la orientación directa estén dados en el sistema local cartesiano, LSR.

4.6.2. FORMACIÓN DE LA IMAGEN L1

En base al manual de usuario del GPro (Leica Geosystems, 2000), la imagen L1 se genera a partir de un remuestreo epipolar rectificando sobre un plano cuya altura generalmente será la altura media del terreno. De ahí que el método a seguir pueda ser el presentado a continuación (Fig. 4.24).

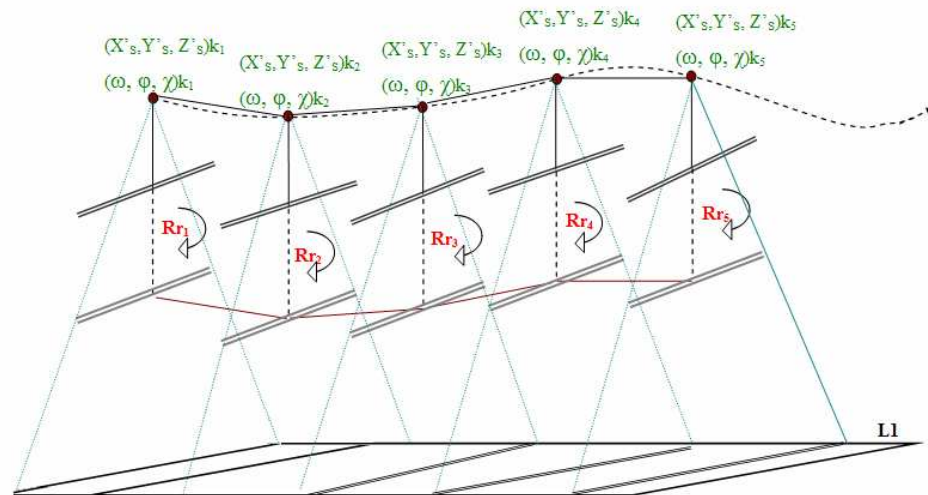


Fig. 4.24. Esquema de la generación de imágenes L1 del sensor ADS40/80.

Dado que se tiene resuelta la orientación externa, se dispone de las coordenadas objeto de los puntos de vista además de sus correspondientes matrices de rotación. Estas matrices dan cuenta de las discrepancias angulares entre los sistemas de fotocoordenadas y el sistema objeto. Una vez que estos dos sistemas son paralelos debemos encontrar las matrices de la Orientación Relativa que indiquen las discrepancias de los sistema de fotocoordenadas con el sistema de la base (Fig. 4.25). Una vez epipolarizadas cada una de las líneas CCD se remuestrearán sobre el plano L1, cuya altura, tal y como se citó anteriormente, suele corresponderse con la altura media del terreno.

Es decir, el proceso consiste en los siguientes pasos (Fig. 4.25):

1. Hacer los sistemas de fotocoordenadas concordantes con el terreno (**Re**).
2. Hacer el sistema resultante concordante con la base (**Rr**), por lo que se calculará el giro kappa y el giro phi que hay que aplicar al sistema terreno para hacerlo paralelo a la base, es decir, se deberá resolver la Orientación Relativa por el Método de la Base Fija (Kraus, 1997).

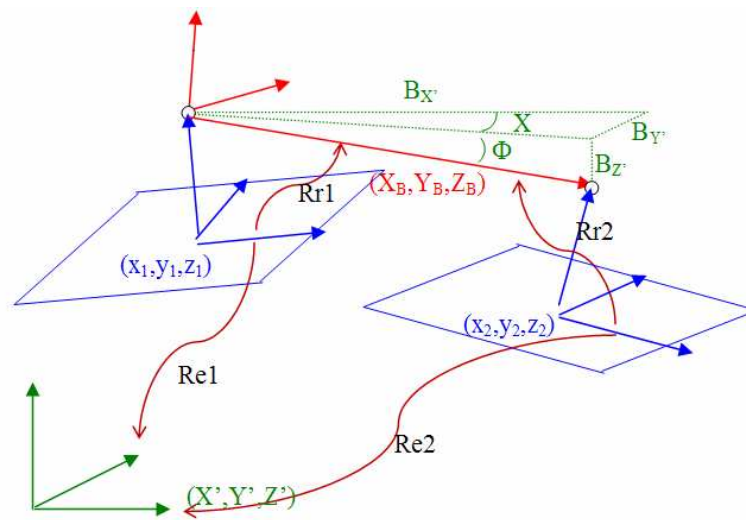


Fig. 4.25. Orientación Relativa por el Método de la Base Fija para imágenes aéreas lineales de barrido.

De la Figura 4.25 pueden deducirse fácilmente las correcciones en χ y en ϕ :

$$\tan \chi = \frac{B_{Y'}}{B_{X'}} = \frac{Y'_{s2} - Y'_{s1}}{X'_{s2} - X'_{s1}} \Rightarrow \mathbf{R}_{\chi} = \begin{bmatrix} \cos \chi & \text{sen} \chi & 0 \\ -\text{sen} \chi & \cos \chi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.35)$$

$$\tan \Phi = \frac{B_{Z'}}{\sqrt{B_{X'}^2 + B_{Y'}^2}} = \frac{Z'_{s2} - Z'_{s1}}{\sqrt{(X'_{s2} - X'_{s1})^2 + (Y'_{s2} - Y'_{s1})^2}} \Rightarrow \mathbf{R}_{\Phi} = \begin{bmatrix} \cos \Phi & 0 & -\text{sen} \Phi \\ 0 & 1 & 0 \\ \text{sen} \Phi & 0 & \cos \Phi \end{bmatrix}$$

(4.36)

De esta manera a cada punto fijo le corresponderá una matriz de rotación \mathbf{R}'_E tal

que $\mathbf{R}'_E = \mathbf{R}_\phi \cdot \mathbf{R}_\chi \cdot \mathbf{R}_E$. Donde \mathbf{R}_E es la matriz de rotación asociada a la orientación externa en el punto fijo i , y \mathbf{R}_ϕ y \mathbf{R}_χ son las matrices correspondientes a la orientación relativa entre líneas CCD contiguas.

Con esta matriz de rotación se remuestreará cada uno de los CCD desde su punto de vista sobre el plano L1 (Fig. 4.26).

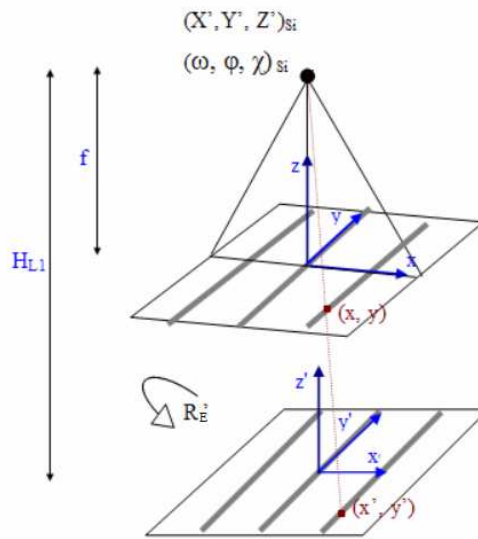


Fig. 4.26. Remuestreo epipolar de imágenes aéreas lineales de barrido sobre el plano de la L1.

Por tanto, en base a la ecuación de colinealidad podremos obtener las fotocoordenadas remuestreadas en función de las fotocoordenadas iniciales de cada uno de los píxeles de la línea CCD,

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -f \end{pmatrix} = \lambda \cdot \mathbf{R}'_E \begin{pmatrix} x' \\ y' \\ -H'_{L1} \end{pmatrix} \quad (4.37)$$

$$\begin{aligned} x' &= -f \frac{r'_{11}x + r'_{12}y - r'_{13}H_{L1}}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}H_{L1}} \\ y' &= -f \frac{r'_{21}x + r'_{22}y - r'_{23}H_{L1}}{r'_{31}x + r'_{32}y - r'_{33}H_{L1}} \end{aligned} \quad (4.38)$$

Donde (x', y') serán las coordenadas píxel del plano de rectificación de la L1 del punto de vista (X'_s, Y'_s, Z'_s) cuyas fotocoordenadas son (x, y, f) . H_{Li} es la altura del plano de rectificación y r_{ij}' los elementos de la matriz de rotación asociada a la orientación externa en el punto fijo i , calculada tras el remuestreo epipolar.

4.7. AEROTRIANGULACIÓN. AJUSTE DE HACES

A la hora de tratar la relación entre los sensores cámara/GNSS el software de aerotriangulación trabaja con los siguientes modelos matemáticos (Hinsken, 2008): el más elemental, el cual se denomina “Basic” (4.41), que modeliza la excentricidad espacial entre la antena GNSS y la cámara; el que se denomina “Datum” (4.42), que corrige las discrepancias entre el sistema cartesiano del GNSS y el sistema cartesiano de la cámara; y el último, que en adelante se citará como “Drift” (4.44), el cual incorpora parámetros de corrección a la trayectoria del GNSS.

Para entender cada uno de estos modelos matemáticos se parte del caso ideal en el que las coordenadas del centro de la antena GNSS obtenidas tras la trayectoria suavizada GNSS/IMU mediante el filtro de Kalman, coinciden con las coordenadas de los centros de proyección tras la aerotriangulación. De esta idealización se puede escribir la ecuación:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{cámara} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{GNSS/IMU} \quad (4.39)$$

Donde el subíndice indica el sistema de coordenadas.

Como físicamente es imposible que el centro de la cámara sea el mismo que el centro de la antena se debe modelizar la excentricidad espacial $(\Delta X', \Delta Y', \Delta Z')$. Es decir, corregir de la distancia existente entre la antena del GNSS y el punto de vista, para así disponer de las coordenadas GNSS en el sistema de la cámara.

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{cámara}} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{GNSS/IMU}} + \begin{pmatrix} \Delta X' \\ \Delta Y' \\ \Delta Z' \end{pmatrix}_{\text{GNSS}} \quad (4.40)$$

Teniendo en cuenta que el vector excentricidad puede haber sido determinado topográficamente (por ejemplo) y que de ser así lo habrá sido en el sistema del avión, se llega a la relación:

$$\begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{cámara}} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{GNSS/IMU}} + R_E R_C \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{\text{avión}} \quad (4.41)$$

donde \mathbf{R}_C es la matriz de rotación (3x3) que corresponde al giro de la plataforma giro-estabilizadora de la cámara (que da cuenta de la orientación de la cámara respecto del cuerpo del avión) y \mathbf{R}_E es la matriz de rotación (3x3) de la Orientación Externa (que da cuenta de la orientación de la cámara respecto del objeto).

Este modelo inicial puede hacerse más sofisticado mediante la introducción de una transformación de “datum” o de Helmert 3D de manera que se pueda dar cuenta de posibles discrepancias entre el sistema cartesiano del GNSS y el sistema cartesiano fotogramétrico. Los siete parámetros de esta transformación (factor de escala λ , rotación \mathbf{R} (3x3) y traslación (X_0, Y_0, Z_0)) pueden ser introducidos en cualquiera de las dos partes de la ecuación (4.41). Así se podrá escribir:

$$\lambda R \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{cámara}} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{cámara}} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{GNSS/IMU}} + R_E R_C \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{\text{avión}} \quad (4.42)$$

Finalmente, en el caso más complejo, se puede introducir dos parámetros de corrección de la trayectoria del GNSS: una traslación o desviación absoluta (A_x, A_y, A_z) y una deriva función del propio tiempo GNSS (B_x, B_y, B_z).

$$\lambda R \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{cámara}} + \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}_{\text{cámara}} + \left(\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \cdot t \right)_{GNSS} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{GNSS/IMU} + R_E R_C \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{\text{avión}} \quad (4.43)$$

Estos parámetros pueden ser introducidos para todo el bloque o para cada una de las pasadas. En cualquier caso, en la medida que las traslaciones correspondientes a estos términos correctores son redundantes respecto de la traslación del cambio de datum anterior, esta última ecuación (4.43) se puede reescribir obteniendo:

$$\lambda R \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{\text{cámara}} + \left(\begin{pmatrix} A_x \\ A_y \\ A_z \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{pmatrix} \cdot t \right)_{GNSS} = \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix}_{GNSS/IMU} + R_E R_C \begin{pmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{pmatrix}_{\text{avión}} \quad (4.44)$$

4.8. MEDICIONES AUTOMÁTICAS Y MANUALES

4.8.1. MEDICIONES AUTOMÁTICAS

La medición automática de puntos sobre las imágenes lineales de barrido se obtienen a través de una estrategia piramidal basada en patrones y estrategias de búsqueda específica de correspondencia basada en áreas, ABM (*Area Based Matching*) (Leica Geosystems, 2009).

Este proceso de mediciones automáticas puede llevarse a cabo tanto en el nivel 1 como en el nivel 1 de precisión del procesamiento de imágenes lineales de barrido. Debido a que en el nivel 1 de precisión, se genera un nuevo remuestreo, en esta Tesis Doctoral, tanto la correspondencia de puntos como cualquier otro proceso fotogramétrico ha sido realizado sobre las imágenes L0, nivel 1.

La correspondencia ABM entre dos píxeles se establece a partir de la correlación (grado de semejanza) de los niveles de gris. El método consiste en comparar los niveles de gris de una pequeña subimagen a la que se denomina ventana (o máscara) patrón, con su correspondiente en otra imagen (ventana o máscara de correspondencia) que se mueve por un espacio de búsqueda previamente acotado.

La decisión sobre el tamaño de la máscara de correspondencia es una solución de equilibrio entre la mayor capacidad de discriminación de las máscaras grandes (en principio) y el mayor tiempo de cálculo y la mayor sensibilidad a distorsiones (si las hay) que presentan estas. Por defecto suele utilizarse un tamaño de 7x7 píxeles.

La posición de la ventana de búsqueda es crucial, ya que la correspondencia por áreas necesita aproximaciones muy buenas. Su tamaño no obstante, no juega un papel importante porque las restricciones geométricas impuestas limitan el tamaño a unos pocos píxeles. Las restricciones que limitan esta zona de búsqueda son: por un lado la línea epipolar acotada por un máximo (Z_{max}) y un mínimo (Z_{min}) del MDT, el paralaje horizontal, s_x , (Fig. 4.27) y la magnitud de paralaje vertical debido a la incertidumbre en el cálculo de la línea epipolar, s_y , cuyo umbral son 11 píxeles.

Para determinar una aproximación a la magnitud de paralaje horizontal en píxeles, s_x , se puede utilizar la siguiente ecuación (4.45):

$$s_x = \frac{(Z_{max} - Z_{min}) \cdot tg \alpha}{GSD} \quad (4.45)$$

Donde α es el ángulo de inclinación del sensor (vista hacia atrás, nadiral o hacia delante), Z_{max} es la cota máxima del MDT, Z_{min} la cota mínima y GSD es la huella del píxel sobre el terreno.

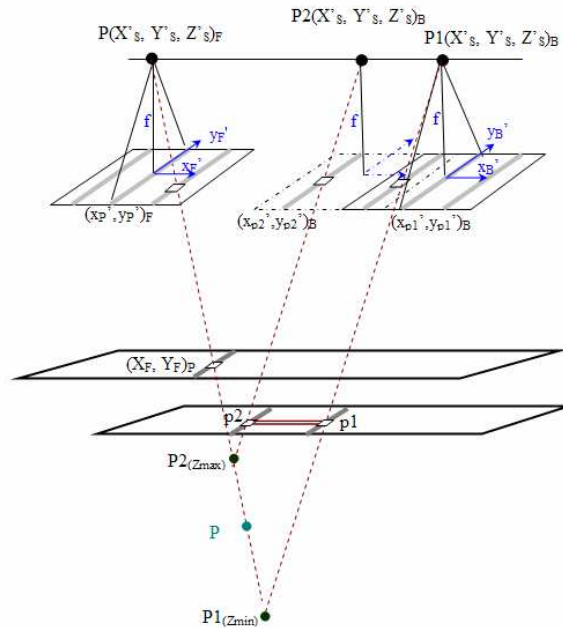


Fig. 4.27. Epipolarización de imágenes aéreas lineales de barrido para la correspondencia de puntos homólogos.

El problema en la determinación de la línea epipolar por la cota máxima y mínima del MDT radica en encontrar el rayo proyectivo de estos dos puntos (Z_{max} y Z_{min}) sobre la imagen de correspondencia ya que no conocemos los parámetros de orientación de dichos puntos sobre esta última imagen. Si tomamos como imagen patrón la vista hacia delante del sensor pancromático, podrá actuar como imagen de correspondencia la vista hacia atrás (situación representada en la Figura 4.27) o nadiral de dicho sensor.

Para resolver dicha cuestión se propone utilizar el algoritmo desarrollado por Hernández et al., (2011), recogido en el apartado correspondiente a la transformación de coordenadas objeto a coordenadas imagen de esta Tesis Doctoral.

Finalmente, el valor de correspondencia se calcula a través del factor de correlación cruzado (Leica Geosystems, 2009). Este coeficiente se define como:

$$\rho = \frac{\sigma_{LR}}{\sigma_L \sigma_R} \text{ con } -1 \leq \rho \leq 1 \quad (4.46)$$

Donde σ_{LR} es la covarianza de las ventanas de correlación izquierda (L) y derecha (R), σ_L es la desviación típica o estándar de la ventana patrón y σ_R es la desviación típica o estándar de la ventana de correspondencia.

El factor de correlación cruzado se determina dentro del espacio de búsqueda para cada posición de la ventana de correspondencia. Los puntos cuyo valor de correlación es menor a 0.6 son descartados. Si el límite del umbral del factor de correlación es muy elevado se encontrarán puntos con poco error pero serán menos puntos los encontrados, por lo que el valor límite de correlación se fija en 0.8.

4.8.2. MEDICIONES MANUALES

Las mediciones manuales sólo se llevarán a cabo en los puntos de apoyo y chequeo. Estas mediciones pueden realizarse a través de dos tipos de estrategias: monoscópicas y estereoscópicas.

Del mismo modo que para las mediciones automáticas, toda medición manual, ya sea monoscópica o estereoscópica, se realizará sobre el nivel 1, imágenes L0.

En las mediciones monoscópicas podrán situarse cada uno de los puntos medidos (apoyo y chequeo) en todas aquellas imágenes pancromáticas que contengan dicho punto. Es decir, la medición consiste en ir identificando la situación del punto en cada una de las imágenes de manera individual, no se generan modelos estereoscópicos.

En el caso de medidas estereoscópicas, las mediciones pueden realizarse sobre los tres modelos estereoscópicos que conforman las combinaciones de las imágenes pancromáticas: hacia atrás/hacia delante; hacia atrás/nadir; nadir/hacia delante. De esta manera se dispondría de tres mediciones por pasada y por punto. Si un punto aparece en tres pasadas, podrían realizarse sobre él 9 mediciones.

Es fundamental para un buen control tridimensional del punto la precisión del

operador. A esta precisión afectan los siguientes factores: la experiencia del propio operador y sus condiciones psico-fisiológicas, las características de los elementos a medir, la resolución de la imagen (tamaño del píxel) y el tamaño del cursor (Arias, 2008).

4.9. CONTROL DE CALIDAD

El objetivo del método fotogramétrico no es sólo determinar las coordenadas terreno a partir de las fotocoordenadas sino también determinar con qué precisión se obtienen estas coordenadas terreno. Para ello se evalúa tanto la precisión interna como externa del ajuste del bloque.

Estas precisiones, interna y externa, se evalúan mediante distintos parámetros. La precisión interna se expresa en términos de desviación estándar de los diferentes parámetros que intervienen en el ajuste dando una idea de la bondad del propio ajuste, mientras que la precisión externa es evaluada usando datos de referencia (verdad terreno) y por tanto queda expresada en términos de discrepancia, dando idea de la exactitud del ajuste realizado.

A continuación veremos con más detenimiento una y otra.

4.9.1. CONTROL DE CALIDAD INTERNO. PRECISIÓN INTERNA

Recuérdese, tal y como se citó en el modelo estocástico del ajuste (capítulo III) que \mathbf{W} se corresponde con la matriz de pesos asociada a las observaciones. Debido a que los pesos se relacionan de manera inversa con las desviaciones estándar, se puede escribir \mathbf{W} como:

$$W_l = \begin{bmatrix} p_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & p_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & p_{m-1} & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & p_m \end{bmatrix} = \sigma_0^2 \begin{bmatrix} 1/\sigma_1^2 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 1/\sigma_2^2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 1/\sigma_{m-1}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \dots & 0 & 1/\sigma_m^2 \end{bmatrix} \quad (4.47)$$

Siendo σ_0^2 la varianza a priori de peso unidad o varianza de referencia.

Dado que la matriz de cofactores \mathbf{Q} se define como la inversa de \mathbf{W} , y la matriz de varianzas–covarianzas de las observaciones Σ_l es la matriz de cofactores dividida por el valor de la varianza de referencia, se tiene que $\mathbf{W}_l = \mathbf{Q}_l^{-1} = \sigma_0^2 \Sigma_l^{-1}$, donde la matriz de varianzas–covarianzas de las observaciones puede ser definida como una medida de precisión de las observaciones de cara al ajuste (Gruen, 1982).

El objetivo en el control de calidad interno es determinar la precisión de las incógnitas a partir de la precisión de las observaciones. Según la ley de propagación de errores, si se tiene una serie de parámetros (incógnitas) dependientes de otros (observaciones), de los que conocemos su matriz de varianzas–covarianzas, la matriz de varianzas–covarianzas asociada a las incógnitas (Σ_x) resulta ser:

$$\Sigma_x = \mathbf{A} \cdot \Sigma_l \cdot \mathbf{A}^T \quad (4.48)$$

Siendo \mathbf{A} la matriz jacobiana asociada a las incógnitas, que expresa la relación funcional entre las incógnitas y las observaciones.

Los términos de la diagonal principal de la matriz de varianzas–covarianzas asociada a las incógnitas (Σ_x) (4.49) indican la precisión relativa de cada una de estas incógnitas.

$$\Sigma_X = \begin{bmatrix} \hat{\sigma}_{11} & \hat{\sigma}_{12} & \dots & \hat{\sigma}_{1n-1} & \hat{\sigma}_{1n} \\ \hat{\sigma}_{21} & \hat{\sigma}_{22} & \dots & \dots & \hat{\sigma}_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \hat{\sigma}_{m-1n-1} & \hat{\sigma}_{m-1n} \\ \hat{\sigma}_{m1} & \hat{\sigma}_{m2} & \dots & \hat{\sigma}_{mn-1} & \hat{\sigma}_{mn} \end{bmatrix} \quad (4.49)$$

Por otro lado se sabe que $Q_X = 1/\hat{\sigma}_0^2 \cdot \Sigma_X$. Para obtener el valor de la varianza a posteriori del ajuste, $\hat{\sigma}_0^2$, se utiliza la siguiente ecuación (4.50):

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{V^T W V}{r} \quad (4.50)$$

con $V = W^{-1} B^T [B W^{-1} B]^{\dagger} [A X + L]$ ¹⁰ y r el número de redundancias del ajuste.

Por tanto, se podrá escribir las desviaciones estándar asociada a las incógnitas como:

$$\hat{\sigma}_{x_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\hat{\sigma}_{x_i x_i}}; \hat{\sigma}_{y_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\hat{\sigma}_{y_i y_i}}; \hat{\sigma}_{z_i} = \hat{\sigma}_0 \sqrt{\hat{\sigma}_{z_i z_i}} \quad (4.51)$$

La media de estas desviaciones estándar son utilizadas como parámetros de medición de la precisión interna del ajuste (Kocaman y Gruen, 2008). Estos parámetros se calculan por separado para cada tipo de incógnita que interviene en el ajuste, por ejemplo para los puntos utilizados como apoyo y para los puntos empleados como puntos de paso.

Es decir, si se denomina n_x , n_y y n_z al número de puntos con coordenadas

¹⁰ Véase el apartado correspondiente al modelo estocástico de la ADS40/80.

utilizados para el cálculo, y $\hat{\sigma}_x, \hat{\sigma}_y, \hat{\sigma}_z$ al promedio de las desviaciones estándar de las coordenadas X, Y, Z, se podrá escribir:

$$\hat{\sigma}_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} \hat{\sigma}_{x_i}^2}{n_x}}; \hat{\sigma}_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_y} \hat{\sigma}_{y_i}^2}{n_y}}; \hat{\sigma}_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_z} \hat{\sigma}_{z_i}^2}{n_z}} \quad (4.52)$$

La precisión interna de las coordenadas se combina en un único parámetro al que se denomina precisión interna, cuyo valor viene dado por la ecuación:

$$\hat{\sigma}_{XYZ} = \sqrt{\frac{\hat{\sigma}_x^2 + \hat{\sigma}_y^2 + \hat{\sigma}_z^2}{3}} \quad (4.53)$$

4.9.2. CONTROL DE CALIDAD EXTERNO. PRECISIÓN EXTERNA

Como se cita anteriormente, la precisión externa es evaluada a través de unos datos de referencia (verdad terreno), constituidos por los puntos de chequeo.

La toma de estos puntos de chequeo es realizada a través de técnicas RTK (*Real Time Kinematic*) mediante equipos GNSS de doble frecuencia, usando el sistema de observación en modo VRS (*Virtual Reference Station*) con enlace a la red de estaciones de referencia más próximas a la zona de trabajo.

La distribución y características de dichos puntos se especificada en el apartado 4.2 correspondiente al apoyo y chequeo topográfico.

Las diferencias entre las coordenadas medidas en modo VRS y las derivadas del ajuste fotogramétrico son calculadas para obtener las discrepancias de dichos puntos de chequeo.

Si denominamos $\hat{X}_i, \hat{Y}_i, \hat{Z}_i$ a las coordenadas estimadas tras el ajuste de los puntos de chequeo, y X_i^r, Y_i^r, Z_i^r las coordenadas de referencia o medidas topográficamente, se obtiene que:

$$\Delta\hat{X}_i = \hat{X}_i - X_i^r; \Delta\hat{Y}_i = \hat{Y}_i - Y_i^r; \Delta\hat{Z}_i = \hat{Z}_i - Z_i^r \quad (4.54)$$

A partir de estas discrepancias calculamos los errores medios cuadráticos, RMSE, correspondientes a cada una de las componentes tanto planimétricas como altimétricas. Así se tiene que:

$$RMSE_X = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_x} \Delta\hat{X}_i^2}{n_x}}; RMSE_Y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_y} \Delta\hat{Y}_i^2}{n_y}}; RMSE_Z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_z} \Delta\hat{Z}_i^2}{n_z}} \quad (4.55)$$

Donde n_x , n_y , n_z , son los puntos de chequeo utilizados para el cálculo del error medio cuadrático en X , Y , y Z respectivamente.

Para evaluar la precisión externa planimétrica, la precisión en X e Y se combinan en un único parámetro. Para el cálculo de este valor se emplea la ecuación (4.56):

$$RMSE_{XY} = \sqrt{\frac{RMSE_X^2 + RMSE_Y^2}{2}} \quad (4.56)$$

A la hora de analizar los resultados obtenidos para la precisión externa de los puntos de chequeo se ha de analizar igualmente la fiabilidad externa obtenida para los mismos. La fiabilidad externa es consecuencia de la fiabilidad interna sobre las incógnitas que intervienen en el ajuste mínimo – cuadrático. Esta fiabilidad determina el valor que ha de tener una observación para ser detectado como equivocación. Por ello, la fiabilidad externa nos indica la capacidad de enmascarar errores groseros en los puntos de chequeo.

CAPÍTULO V

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y CONTROL DE CALIDAD

A través de estos resultados experimentales y análisis de los mismos, se da coherencia y estabilidad al método seguido para aerotriangular y autocalibrar imágenes aéreas de barrido.

Recuérdese las conclusiones obtenidas en el capítulo II de esta Tesis Doctoral sobre las precisiones externas logradas en procesos de aerotriangulación para cada una de las generaciones de la cámara de barrido ADS40 de Leica. Dichas conclusiones se recogían en la Tabla 2.21 mostrando el caso más favorable y menos favorable de todos los análisis experimentales realizados hasta la actualidad. Promediando dichos valores se observa que en los procesos de aerotriangulación para la ADS40 SH40 (primera generación) se obtienen valores de precisión externa de 0.91 el GSD para planimetría y 0.53 el GSD para altimetría. Para la ADS40 SH51/52 (segunda generación), los valores promedios obtenidos son de 0.89 el GSD para la componente planimétrica y 0.66 el GSD para la altimetría. Y finalmente, para la ADS80 SH81/82 (tercera generación), se obtienen valores de 0.54 el GSD para planimetría y 0.60 el GSD para altimetría.

En cuanto a los procesos de autocalibración, e independientemente de la generación del sensor lineal ADS40/80 utilizado, se obtiene una mejora en las precisiones externas para la componente planimétrica, siendo esta mejora menos significativa para la altimétrica (Tabla 2.22). Dichas mejoras varían de un caso a otro en función de la configuración y calibración inicial del vuelo por lo que no se pueden obtener con los datos disponibles unos valores promedios del mismo

modo que se obtienen para la aerotriangulación.

Por tanto, y dado que hay pocos trabajos experimentales realizados para este tipo de cámara, y los que hay no se realizan bajo las mismas condiciones, no se puede determinar qué precisiones se han de obtener para proyectos de vuelo con las cámaras de barrido de Leica Geosystems. De ahí la necesidad de réplicas de trabajos para refinar los análisis y métodos existentes.

Antes de presentar los resultados experimentales, junto con sus análisis, se abordará una serie de aspectos que caracterizan los datos empleados y su modo de procesamiento. Estos aspectos son los siguientes:

- Prescripciones técnicas de los vuelos empleados.
- Observación del apoyo y chequeo en campo.
- Análisis de la calibración inicial del sensor.
- Software y parámetros de entrada en los procesos de aerotriangulación y autocalibración.

Una vez presentados estos aspectos se mostrarán los resultados referentes a la aerotriangulación y autocalibración de los distintos vuelos. En cuanto a estos ajustes se debe destacar que han sido realizados sobre el nivel 1 de procesamiento (imágenes L0) y utilizando mediciones manuales monoscópicas tanto para los puntos de chequeo como para los puntos de apoyo.

La elección del nivel 1 de procesamiento se debe a un estudio previo sobre las precisiones obtenidas en mediciones sobre este nivel y su correspondiente nivel 1 de precisión. Dichas mediciones muestran un claro empeoramiento de las mediciones sobre el nivel 1 de precisión debido al doble remuestreo que sufre la imagen en su generación.

Por otro lado, y tras varias mediciones estereoscópicas realizadas por varios

operadores con menor y mayor experiencia, se opta por las mediciones monoscópicas dado que los resultados en estero no arrojan una mejora significativa y conllevan un mayor tiempo de medición. Incluso en algunos casos, las mediciones estereoscópicas han mostrado peores resultados que las mediciones monoscópicas.

Dichos análisis son recogidos en el Anexo IV.

5.1. VUELO A DOS ALTURAS ADS40 SH52. PRESCRIPCIONES TÉCNICAS

En el marco de un proyecto de investigación en geotecnologías, propuesto por la Universidad de Salamanca y el Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León, se realiza un vuelo fotogramétrico a dos alturas independientes con la ADS40 SH52.

En la Figura 5.1 se muestra el avión utilizado para la adquisición de datos con la ADS40 SH52, aeronave utilizada por Stereocarto para la adquisición de dichos datos. Hifsa es la compañía de Stereocarto, especializada en vuelos fotogramétricos, con licencia para realización de trabajos de fotografía aérea expedida por Aviación Civil de España (Ministerio de Fomento) y es la responsable del vuelo fotogramétrico ADS40 SH52 de este estudio experimental.



Fig. 5.1. Aeronave de Stereocarto para la adquisición de las imágenes ADS40 SH52 (Stereocarto, 2010a).

Se realizan dos vuelos a distinta altura (Fig. 5.2) sobre la ciudad de Ávila, España.

El primero, realizado el 8 de Abril del 2010 entre las 12:05 UTC y las 13:10 UTC, capturó imágenes con un GSD de 10 cm sobre una superficie de 22 km² a una altura media sobre el terreno de 1000 m. Se capturaron un total de 13 pasadas, 10 longitudinales y las otras 3 formando un vuelo en cruz con pasada de ida y vuelta para la autocalibración del sensor. El recubrimiento trasversal de este vuelo, GSD de 10 cm, es del 25.8% y la longitud media de cada pasada de 6400 m.

El segundo, realizado el 9 de Abril del 2010 entre las 10:05 UTC y las 11:25 UTC, capturó imágenes con un GSD de 25 cm sobre una superficie de 75 km² a una altura media sobre el terreno de 2500 m. Se capturaron un total de 12 pasadas, 9 longitudinales y las otras 3 formando un vuelo en cruz con pasada de ida y vuelta para la autocalibración del sensor. El recubrimiento trasversal de este vuelo, GSD de 25 cm, es del 40% y la longitud media de cada pasada de 13280 m.

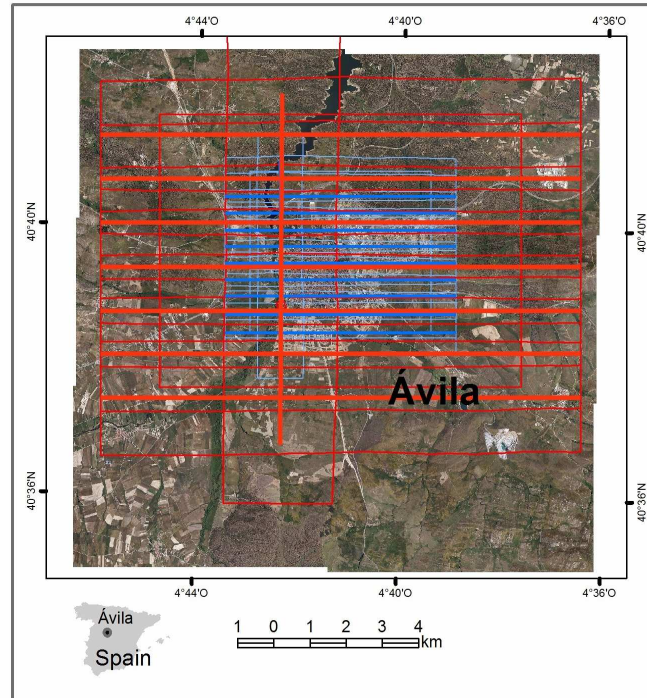


Fig. 5.2. Vuelos ADS40 SH52. En rojo, vuelo con GSD de 25 cm, en azul vuelo con GSD de 10 cm.

Los parámetros del sensor utilizado para la captura de ambos vuelos, SH52, son mostrados en la Tabla 4.1, por lo que no serán citados nuevamente aquí.

El Sistema Geodésico de Referencia utilizado es ETRS89 (*European Terrestrial Reference System 1989*). La proyección cartográfica es la proyección conforme Universal Transversal Mercator (UTM), huso 30, con altitudes elipsoidales.

Para el cálculo de las trayectorias de las imágenes, y para el apoyo de campo, se emplearon las estaciones GNSS permanentes de: Arenas de San Pedro, Ávila, Guijuelo y Peñaranda de Bracamonte (Fig. 5.3).

Arenas de San Pedro (arsp) - RtcM 3.1 GRX1200 GG Pro		Ávila (avil) - RtcM 3.1 GRX1200 GG Pro	
			
Equipo instalado			
Receptor	Leica GRX1200GGPro	Receptor	Leica GRX1200GGPro
Antena	LEIAX1202GG NONE	Antena	LEIATS04GG LEIS
Altura de la antena	0,0 m Base del soporte de la antena	Altura de la antena	0,0 m Base del soporte de la antena
Coordenadas (ETRS89)			
Latitud	40° 12' 24,279678" N	Latitud	40° 39' 04,040191" N
Longitud	5° 4' 57,979503" W	Longitud	4° 40' 45,575594" W
Altura elipsoidal	638,162 m	Altura elipsoidal	1176,910 m
Fecha de cálculo	30-05-2008	Fecha de cálculo	30-05-2008
Título de la base			
			

Fig. 5.3. Ilustración de algunas estaciones de referencia utilizadas (Stereocarto, 2010b).

5.2. OBSERVACIÓN EN CAMPO: APOYO Y CHEQUEO TOPOGRÁFICO

Siguiendo las especificaciones expuestas para los puntos de apoyo y chequeo en el apartado correspondiente a la distribución y características de dichos puntos del capítulo IV de esta Tesis Doctoral, se observaron un total de 84 puntos (Fig. 5.4), de entre los que se seleccionaron hasta un total de 24 para que actuaran como puntos de apoyo en el proceso fotogramétrico. El resto de puntos fueron utilizados como puntos de chequeo.

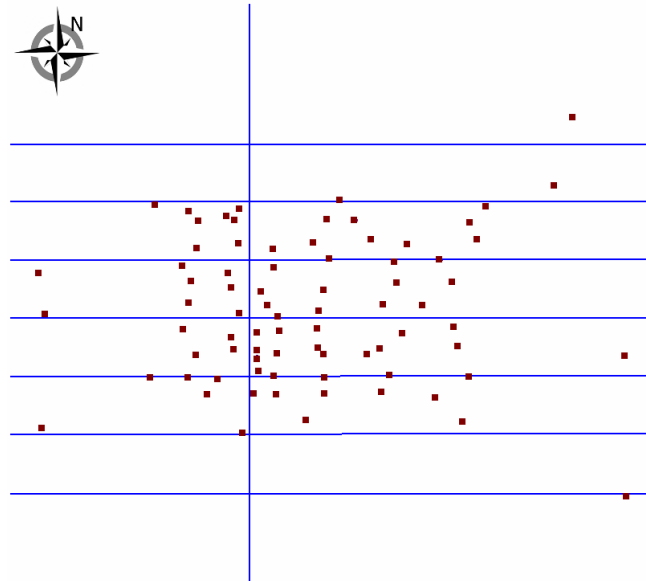


Fig. 5.4. Distribución de los puntos de apoyo y chequeo para los vuelos ADS40 SH52.

En concreto, se seleccionaron para el vuelo bajo, vuelo con GSD de 10 cm (Fig. 5.5), 52 puntos como chequeo y 8 como puntos de apoyo. Mientras que para el vuelo alto, vuelo con GSD de 25 cm (Fig. 5.6), se seleccionaron 50 puntos como chequeo y 24 como puntos apoyo.

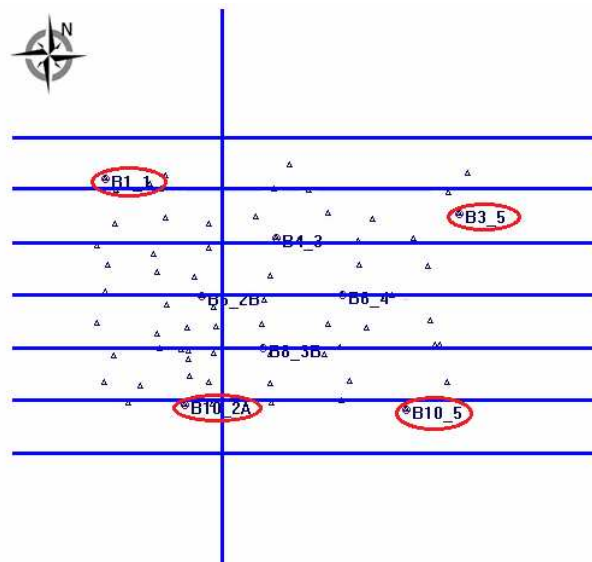


Fig. 5.5. Distribución de los 8 puntos de apoyo utilizados para el vuelo bajo, GSD de 10 cm. Puntos junto con su ID, utilizados para los casos con 8 puntos de apoyo. Puntos en rojo seleccionados para la resolución con 4 puntos de apoyo.

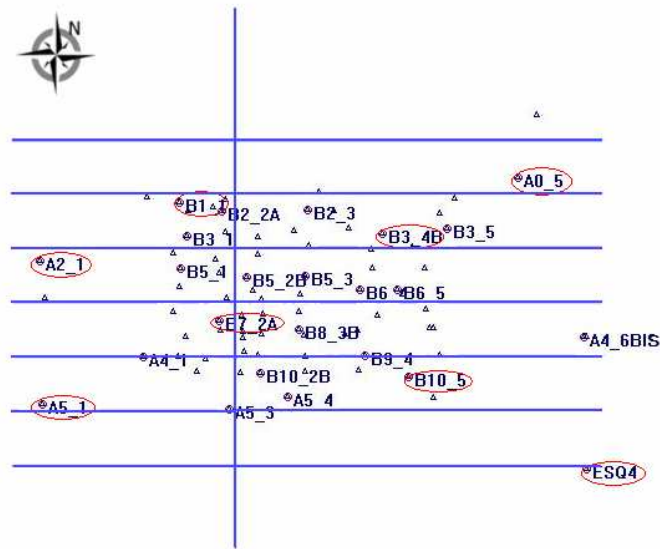


Fig. 5.6. Distribución de los 24 puntos de apoyo utilizados para el vuelo alto, GSD de 25 cm. Puntos junto con su ID, utilizados para los casos con 24 puntos de apoyo. Puntos en rojo seleccionados para la resolución con 8 puntos de apoyo.

En el Anexo III se muestran los croquis con las coordenadas y posición de todos y cada uno de los puntos tomados en campo, junto con el fichero de coordenadas donde se listan todos ellos a través del formato: ID, X, Y, Z.

5.3. CALIBRACIÓN INICIAL DEL SENSOR O CALIBRACIÓN DEL FABRICANTE

Antes de proceder a las aerotriangulaciones y autocalibraciones de los datos capturados con la cámara ADS40 SH52, se analiza la geometría de los sensores pancromáticos de su plano focal junto con los valores de desalineamiento de dicha cámara con el IMU y el valor de excentricidad (GNSS/Cámara).

5.3.1. PLANO FOCAL ADS40 SH52

El primer análisis es la representación gráfica de las fotocoordenadas de cada uno de los CCD pancromáticos del sensor SH52 (Fig. 5.7). Debido a los efectos de escala, rotación y curvatura sobre cada uno de los CCD (véase parámetros relativos a la línea CCD, capítulo III), estos no se presentan como líneas rectas

sobre el plano focal. A estos efectos se une una clara manifestación de la distorsión radial. Es decir, las discrepancias obtenidas entre la posición teórica de cada uno de los píxeles con la posición registrada en el fichero de calibración es la suma de todas estas correcciones.

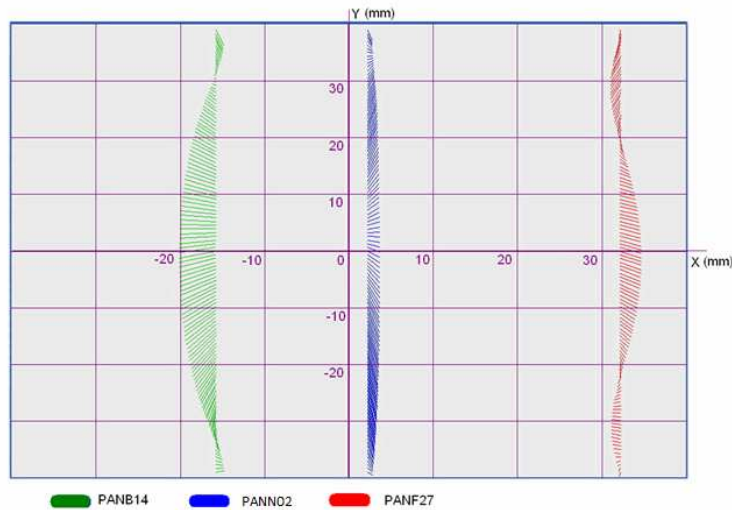


Fig. 5.7. Discrepancias entre la posición teórica de cada uno de los píxeles con la posición registrada en el fichero de calibración de la ADS40 SH52.

Para la representación de estos datos fue necesario listar las 12000 fotocoordenadas que componen cada uno de los CCD del fichero de calibración y calcular su valor teórico. En la Tabla 5.1 se muestra un ejemplo de este listado para el sensor pancromático nadiral, donde x , y son los valores teóricos de las fotocoordenadas y dx , dy sus discrepancias con respecto al valor calibrado.

Sensor pancromático nadiral. ADS40 SH52 [mm]					
Nº píxel	x	y	dx	dy	Tamaño del píxel
1	2.21	-38.99675	0.063352	-0.059935	0.006751
2	2.21	-38.35325	0.064642	-0.085146	0.006761
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
5999	2.21	-0.00975	0.146253	-0.11523	0.00625
6000	2.21	-0.00325	0.146253	-0.11498	0.00624
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
12000	2.21	38.99675	0.054539	-0.191209	0.006763

Tabla 5.1. Fotocoordenadas teóricas del sensor nadiral de la ADS40 SH52 y sus discrepancias con respecto a sus valores calibrados. Datos en milímetros.

A continuación se muestran los intervalos de discrepancia obtenidos tanto para las fotocoordenadas x como para las fotocoordenadas y de cada uno de los sensores pancromáticos: hacia atrás (PANB14), nadiral (PANN02) y hacia delante (PANF27) (Tabla 5.2). Estos intervalos muestran la oscilación de los valores calibrados de las fotocoordenadas con respecto a sus valores teóricos.

Discrepancias máximas y mínimas para las fotocoordenadas ADS40 SH52 [mm]						
	PANB14		PANN02		PANF27	
	dx	dy	dx	dy	dx	dy
Intervalos	[-0.44;0.11]	[-0.47;0.22]	[0.05;0.15]	[-0.61;0.37]	[-0.12;0.25]	[-0.27;0.03]
Promedio	-0.21	-0.12	0.11	-0.12	0.05	-0.12
RMSE	0.28	0.26	0.11	0.36	0.14	0.14

Tabla 5.2. Discrepancias entre las fotocoordenadas teóricas y calibradas de la ADS40 SH52. Datos en milímetros.

Como ya se sabe, la distancia focal se considera fija y tiene un valor único para todos los sensores del plano focal. Su valor es estimado a través de la calibración en laboratorio obteniendo un valor de 62.70 mm. El valor de este parámetro es recalculado junto con las coordenadas del punto principal y punto de mejor simetría en las autocalibraciones realizadas sobre los datos de los vuelos realizados sobre Ávila. Los resultados de dichos parámetros son mostrados en el apartado correspondiente a la autocalibración en cruz.

5.3.2. DESALINEAMIENTO ANGULAR IMU/CÁMARA. BORESIGHT

Otro parámetro a tener en cuenta en la calibración de la ADS40 SH52 es el desalineamiento (*boresight*) entre el IMU y la cámara. El 27 de abril del 2010, momento en el que se adquieren los datos del vuelo sobre Avila, caso experimental, se realiza una corrección para el desalineamiento entre el IMU/Cámara generado con el software ORIMA cuyos datos se muestran en la Tabla 5.3.

Desalineamiento IMU/Cámara (27/04/2010) [rad]					
ω	φ	χ	$d\omega$	$d\varphi$	$d\chi$
0.0001561739	0.0001290594	-0.0008190379	0.0000062846	0.0000058854	0.0000112696

Tabla 5.3. Desalineamiento IMU/Cámara con fecha del 27/04/2010. Donde ω , φ y χ son las rotaciones con respecto a X, Y y Z del sistema de coordenadas del IMU y $d\omega$, $d\varphi$ y $d\chi$ las desviaciones asociadas a cada uno de los valores angulares. Unidades en radianes.

Si bien su certificado de calibración data del 5 noviembre del 2009 donde se obtuvo para el desalineamiento IMU/Cámara los siguientes datos (Tabla 5.4):

Desalineamiento IMU-Cámara (05/11/2009) [rad]					
ω	φ	χ	$d\omega$	$d\varphi$	$d\chi$
0.0001696063	0.0001424968	-0.0006726985	0.0000073487	0.0000071627	0.0000147415

Tabla 5.4. Desalineamiento IMU/Cámara con fecha del 05/11/2009. Donde ω , φ y χ son las rotaciones con respecto a X, Y y Z del sistema de coordenadas del IMU y $d\omega$, $d\varphi$ y $d\chi$ las desviaciones asociadas a cada uno de los valores angulares. Unidades en radianes.

Las diferencias observadas en estas tablas (Tabla 5.3 y Tabla 5.4) dan cuenta de los movimientos del sistema inercial con respecto a la cámara con el paso del tiempo, movimientos que deben ser conocidos para poder obtener los datos de la Orientación Externa con la precisión requerida, de ahí que en las aerotriangulaciones de nuestros datos se tenga en cuenta la calibración IMU/Cámara más actual.

5.3.3. EXCENTRICIDAD ESPACIAL GNSS/CÁMARA. LEVER-ARM

La excentricidad espacial está definida como el vector entre el GNSS, situado en la parte superior del avión, y la cámara, en la parte inferior. Este vector solidario con el cuerpo del avión suele ser medido topográficamente en tierra y su valor es almacenado en los ficheros de procesamiento de las imágenes.

La excentricidad es almacenada como incremento de coordenadas del GNSS con respecto a la cámara y sus valores son: 0.278 m para la coordenada X, -0.039 m para la coordenada Y, y -1.175 m para la coordenada Z, dados en el sistema cámara.

5.4. SOFTWARE Y PARÁMETROS DE ENTRADA EN LOS PROCESOS DE AEROTRIANGULACIÓN Y AUTOCALIBRACIÓN

A continuación, y antes de citar los resultados obtenidos tras la aerotriangulación y tras la autocalibración de los datos, se señalan las características generales de dichos procesos en base al software utilizado, ORIMA, CAP-A (Hinsken, 2008):

- La obtención de la trayectoria suavizada de los datos provenientes del GNSS y del IMU ha sido realizada con el software GPro, obteniendo un fichero binario¹¹ que contiene tanto los parámetros de orientación de cada uno de los puntos fijos (ω, φ, χ) junto con las precisiones a priori para los procesos de aerotriangulación y autocalibración $(d\omega, d\varphi, d\chi)$.
- La extracción de los puntos de paso de cada uno de los vuelos se ha realizado sobre el nivel L1 con el software de procesamiento GPro (Leica Geosystem, 2008).
- Las medidas de los puntos de chequeo y de los puntos de apoyo se han realizado monoscópicamente sobre las tres vistas de los CCDs pancromáticos del sensor ADS40 SH52, introduciendo para los puntos de apoyo como desviación a priori 0.050 m.

¹¹ Fichero de orientación de cada línea CCD, .odf (*orientation data format*).

5.5. AEROTRIANGULACIÓN DE LA CÁMARA ASD40 SH52

Siguiendo los modelos matemáticos expuestos en el apartado 4.8 del capítulo IV de esta Tesis Doctoral, se realizan las aerotriangulaciones para el vuelo con GSD de 10 cm, para el vuelo con GSD de 25 cm, y para el proyecto con ambos vuelos combinados, testeando las siguientes variables:

- Número de puntos de apoyo utilizados: 0, 4, y 8 puntos de apoyo para el vuelo bajo (GSD de 10 cm) y 0, 8 y 24 puntos de apoyo para el vuelo alto (GSD de 25 cm).
- Modelo matemático: Basic, Datum, Drift (véase apartado 4.8, capítulo IV).
- Calibración o no del boresight o desalineamiento entre el IMU/Cámara. En caso de aplicarlo: por pasada o por sensor¹².

La siguiente tabla (Tabla 5.5) muestra un resumen de los casos realizados, donde se denomina PA al número de puntos de apoyo utilizados, y PCh al número de puntos utilizados como chequeo.

Configuraciones de las distintas aerotriangulaciones realizadas con la ADS40 SH52.				
		GSD 10 cm	GSD 25 cm	GSD 10 + 25 cm
		PA/PCh	PA/PCh	PA/PCh
Basic	Sin desalineamiento	0 /52	0/50	---
		4/52	8/50	8/52
		8/52	24/50	23/50
	Desalineamiento por pasada	4/52	8/50	8/52
		---	24/50	24/52
	Desalineamiento por sensor	4/52	8/50	8/52

¹² La calibración por sensor implica el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara para todo el vuelo, mientras que por pasada implica el cálculo del desalineamiento entre el IMU/Cámara para cada una de las pasadas que conforman el vuelo.

		---	24/50	24/52
Datum	Sin desalineamiento	4/52	8/50	8/52
		8/52	---	24/52
	Desalineamiento por pasada	4/52	8/50	8/52
		---	24/50	24/52
	Desalineamiento por sensor	4/52	8/50	8/52
		---	24/50	24/52
Drift	Sin desalineamiento	4/52	8/50	8/52
		8/52	24/50	23/52
	Desalineamiento por pasada	4/52	8/50	8/52
		---	24/50	23/52
	Desalineamiento por sensor	4/52	8/50	8/52
		---	24/50	23/52

Tabla 5.5. Distintas aerotriangulaciones realizadas con la ADS40 SH52 sobre los vuelos realizados en Ávila en Abril del 2010.

A continuación, y para facilitar la comprensión de los mismos, se mostrará por separado los resultados correspondientes a cada uno de los vuelos analizando la influencia de los puntos de apoyo, la precisión interna (σ_0), la necesidad de la calibración del IMU/Cámara (bien por sensor o por pasada) y la precisión externa en términos de errores medios cuadráticos de las discrepancias en las coordenadas de los puntos de chequeo para cada uno de los modelos matemáticos utilizados en la resolución del ajuste de haces.

5.5.1. AEROTRIANGULACIÓN DEL VUELO BAJO: GSD 10 CM

La siguiente tabla (Tabla 5.6) resume los datos obtenidos tras la aerotriangulación del vuelo con GSD de 10 cm. En ella se presenta tanto los puntos de apoyo (PA) y puntos de chequeo (PCh) utilizados para el ajuste como la precisión interna obtenida (σ_0) y la precisión externa para la componente planimétrica ($RMSE_{XY}$) y para la componente altimétrica ($RMSE_Z$).

Resultados de la aerotriangulación. Vuelo bajo. GSD = 10 cm						
Configuración		PA/PCh	σ_0 [μm]	$RMSE_{XY}$ [m]	$RMSE_Z$ [m]	Conf.
Basic	Sin desalineamiento	0 / 52	1.9	0.087	0.084	C1
		4 / 52	1.9	0.081	0.077	C2
		8 / 52	1.9	0.087	0.083	C3
	Desalineamiento por pasada	4 / 52	1.9	0.081	0.076	C4
		8 / 52	---	---	---	C5

	Desalineamiento	4 / 52	1.9	0.080	0.079	C6
	por sensor	8 / 52	---	---	---	C7
Datum	Sin	4 / 52	1.9	0.138	0.098	C8
	desalineamiento	8 / 52	1.9	0.131	0.097	C9
	Desalineamiento	4 / 52	1.9	0.093	0.039	C10
	por pasada	8 / 52	---	---	---	C11
	Desalineamiento	4 / 52	1.9	0.092	0.063	C12
	por sensor	8 / 52	---	---	---	C13
Drift	Sin	4 / 52	1.9	0.148	0.095	C14
	desalineamiento	8 / 52	1.9	0.132	0.088	C15
	Desalineamiento	4 / 52	1.9	0.096	0.036	C16
	por pasada	8 / 52	---	---	---	C17
	Desalineamiento	4 / 52	1.9	0.092	0.066	C18
	por sensor	8 / 52	---	---	---	C19

Tabla 5.6. Resultados obtenidos para el vuelo bajo con GSD de 10 cm tras la aerotriangulación. La columna Conf. enumera las distintas configuraciones realizadas.

Tal y como se muestra en la Tabla 5.6, la precisión interna del ajuste (σ_0) se mantiene invariable según la configuración empleada para la resolución de la aerotriangulación. Este resultado pone de manifiesto que internamente el ajuste se comporta bien. El número de puntos de paso es elevado (alrededor de 8000 puntos), está homogéneamente distribuido (Fig. 5.8) y las desviaciones obtenidas en sus fotocoordenadas tras el ajuste son pequeñas, de ahí que, dado que el tamaño del píxel de nuestras imágenes es de $6.5 \mu\text{m}$, obtenemos una precisión interna próxima a 0.3 veces el tamaño del píxel. Recuérdese que la distribución de puntos de paso para resolver el ajuste es un factor fundamental y que la precisión interna de las coordenadas se resuelve según la ecuación (4.53).

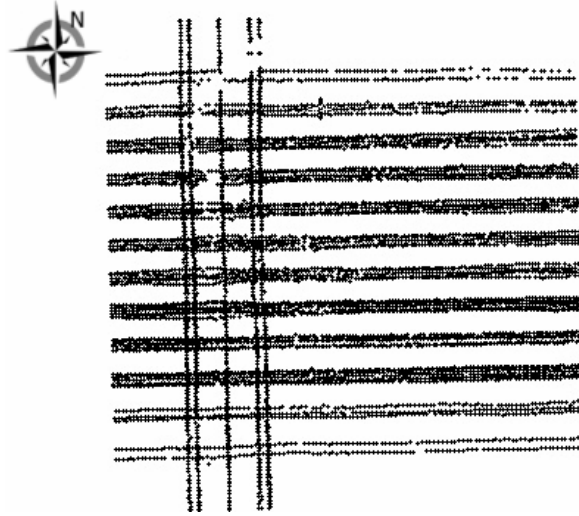


Fig. 5.8. Distribución de los puntos de paso en el vuelo bajo, vuelo con GSD de 10 cm. Escala 1:5000.

Para determinar qué modelo matemático es más favorable para la resolución del ajuste de haces, se analizarán los errores medios cuadráticos obtenidos para las discrepancias de los puntos de chequeo utilizados como auditoria externa. Se analizará por un lado la componente planimétrica, y por otro lado la altimétrica y se compararán dichos resultados con el tamaño teórico del GSD.

Recuérdese que para la planimetría la precisión a priori esperable viene determinada por el valor teórico del GSD cuya magnitud se calcula a través de la ecuación (3.1), mientras que para la precisión a priori altimétrica (Fig. 5.9) se debe de considerar, además de la altura del vuelo y la focal, el ángulo estereoscópico del sensor (ángulo formado entre la vista hacia delante y la vista hacia atrás).

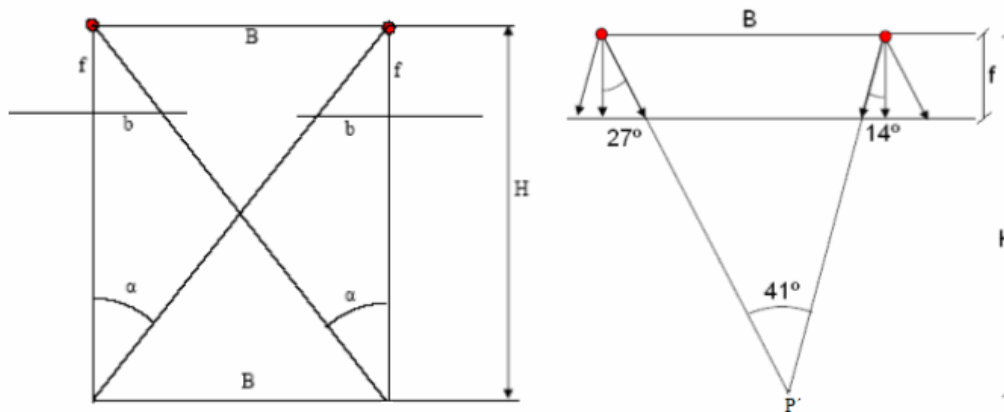


Fig. 5.9. Calidad altimétrica. A la izquierda se muestra la interpretación clásica; a la derecha, adaptada para un sensor barredor, ADS40.

Si denominamos σ_{xy} a la precisión a priori con la que medimos los puntos imagen, H la altura de vuelo, f la focal y B la base se puede escribir:

$$\sigma_z = \frac{H}{f} \cdot \frac{H}{B} \cdot \sigma_{xy} \quad (5.1)$$

Donde la relación H/B es el factor de calidad altimétrico y puede estimarse como la cotangente del ángulo de intersección de los rayos perspectivas conjugados. Este factor de calidad altimétrico se deriva de la geometría de la cámara (Fig. 5.9) por lo que su valor es de 1.15. Por tanto, para nuestro vuelo bajo, cuya altura media es de 1000 m, la focal es de 62.70 mm y el tamaño del GSD es de 0.10 m, se obtiene una precisión altimétrica esperada de 0.12 m.

Se analizará en primer lugar la componente planimétrica. Para ello se representa en un gráfico los resultados obtenidos cuyo eje X expresa las distintas configuraciones empleadas y el eje Y el error medio cuadrático obtenido para las discrepancias de los puntos de chequeo utilizados en cada una de las configuraciones (Fig. 5.10).

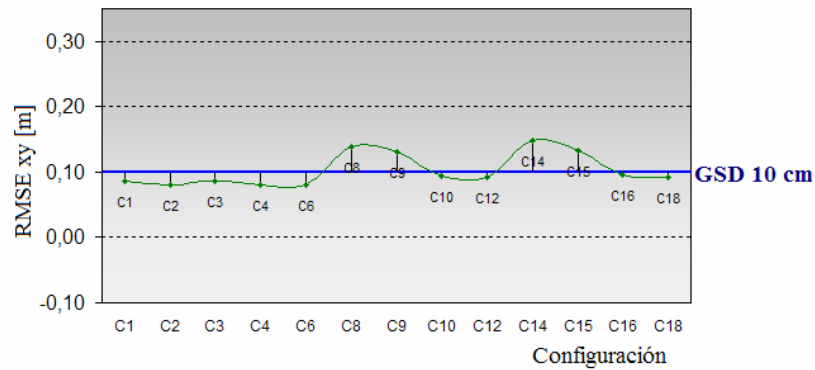


Fig. 5.10. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricas (RMSEXY) de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm.

De este gráfico se observa como las configuraciones C8, C9, C14 y C15 están por encima del tamaño del GSD, 0.10 m. Estas configuraciones corresponden a los casos cuyo modelo matemático involucra un Helmert 3D entre el sistema de la cámara y el GNSS (modelos Datum y Drift) y además no se corrige la calibración IMU/Cámara. Por otro lado, el modelo matemático más simple (Basic) parece comportarse de manera más regular.

A continuación se analiza los resultados referentes a la componente planimétrica para cada uno de los modelos matemáticos de manera individual, comenzando desde el más simple (Basic) hasta el más complejo (Drift).

La siguiente tabla (Tabla 5.7) recoge la composición cuadrática de las discrepancias (RMSE) obtenidas para el chequeo de los puntos involucrados en los casos resueltos con el modelo matemático Basic. Se muestra por un lado la discrepancia para la componente planimétrica X ($RMSE_X$) y por otro la discrepancia para la componente planimétrica Y ($RMSE_Y$).

BASIC	Puntos de Chequeo			
	Conf.	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _{XY} [m]
C1		0.051	0.071	0.087
C2		0.050	0.064	0.081
C3		0.050	0.071	0.087
C4		0.058	0.056	0.081
C5		---	---	---
C6		0.057	0.056	0.080
C7		---	---	---

Tabla 5.7. Composición cuadrática de los discrepancias obtenidos en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Basic en el vuelo bajo.

En cuanto al uso de 0, 4 y 8 puntos de apoyo no hay diferencias significativas en la componente planimétrica de los puntos de chequeo (Tabla 5.7). Además los vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (Fig. 5.11) muestran un comportamiento sistemático debido a la mayor discrepancia en la coordenada X de cada uno de los puntos de chequeo, dirección de vuelo.

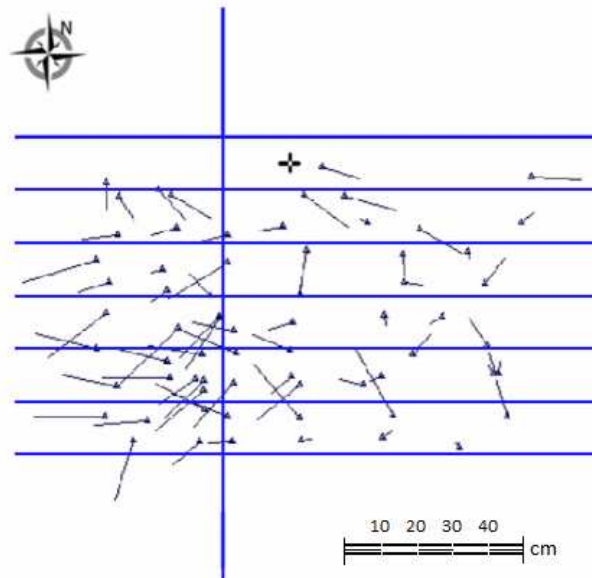


Fig. 5.11. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Basic. Escala 1:5000. Escala gráfica para los vectores de discrepancias.

Por otro lado y a pesar de que se obtienen valores planimétricos en torno a 0.8 veces el tamaño del GSD (Tabla 5.7), se debe cuestionar estos resultados ya que al analizar los gráficos correspondientes a las elipses de error y a la fiabilidad externa de las discrepancias de los puntos de chequeo (Fig. 5.12), la representación gráfica de esta última es mayor a la de la elipse de error, lo que indica que los resultados hay que tomarlos con cautela ya que pueden estar enmascarando errores groseros.

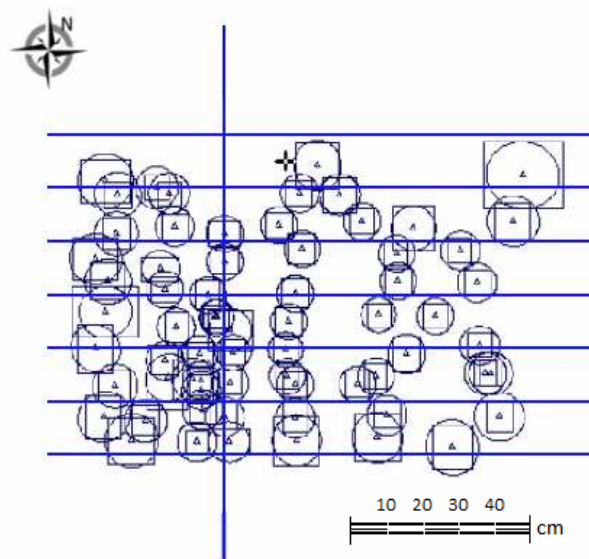


Fig. 5.12. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Basic. Escala 1:5000. Escala gráfica para las elipses de error.

A continuación se procede a analizar la composición cuadrática de las discrepancias (RMSE) de los puntos de chequeo para los casos resueltos con el modelo matemático Datum (Tabla 5.8). Al igual que en los casos resueltos con el modelo Basic, se muestra por un lado la componente planimétrica X ($RMSE_X$) y por otro la componente planimétrica Y ($RMSE_Y$). Además, y debido a que el modelo Datum, involucra un Helmert 3D entre el sistema de coordenadas terreno (definido por los puntos de apoyo) y el sistema cámara, se mostrarán los mismos resultados obtenidos para los puntos de apoyo involucrados en el ajuste.

DATUM	Puntos de Chequeo			Puntos de Apoyo		
	RMSE _X	RMSE _Y	RMSE _{XY}	RMSE _X	RMSE _Y	RMSE _{XY}
C8	0.076	0.116	0.138	0.050	0.161	0.169
C9	0.074	0.108	0.131	0.051	0.114	0.125
C10	0.079	0.062	0.093	0.061	0.041	0.073
C11	---	---	---	---	---	---
C12	0.087	0.060	0.092	0.053	0.032	0.062
C13	---	---	---	---	---	---

Tabla 5.8. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo y apoyo en los casos resueltos como el modelo matemático Datum en el vuelo bajo. Unidades en metros.

Tal y como se observó en la Figura 5.10 las configuraciones C8 y C9 están por encima del tamaño del GSD, 0.10 m. Estas configuraciones corresponden a los casos cuyo modelo matemático involucra un Helmert 3D entre el sistema de la cámara y el GNSS sin calcular el desalineamiento IMU/Cámara. Según se observa en la Tabla 5.8 al aumentar el número de puntos de apoyo (de la configuración C8 con 4 puntos de apoyo a la configuración C9 con 8 puntos de apoyo) disminuyen las discrepancias obtenidas para los puntos de chequeo. Esto se debe a que a mayor número de puntos de apoyo, mejor será la determinación del Helmert 3D tal y como se muestra a continuación.

Para la configuración C8, caso resuelto con 4 puntos de apoyo, se obtiene un valor de 1.7 veces el tamaño del GSD para la componente cuadrática de las discrepancias planimétricas de dichos puntos de apoyo (Tabla 5.8) cuya mayor manifestación está en la coordenada Y. Dichos resultados se propagan al chequeo debido a la mala determinación del Helmert 3D tal y como se muestra en la Tabla 5.9 donde se observa cómo los valores obtenidos para las desviaciones a posteriori de los parámetros de traslación del Helmert son mayores a los valores obtenidos para dichos parámetros.

DATUM	Traslación del Helmert 3D			Desviación Estándar a Posteriori			
	Conf.	ΔX	ΔY	ΔZ	$\sigma_{\Delta X}$	$\sigma_{\Delta Y}$	$\sigma_{\Delta Z}$
C8		0.0095	0.0072	-0.0079	0.0268	0.0265	0.0301
C9		-0.0115	-0.0521	-0.0054	0.0191	0.0190	0.0220
C-12 PA		-0.0159	-0.0325	0.0494	0.0159	0.0154	0.0172

Tabla 5.9. Parámetros de traslación del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo. Unidades en metros. C-12 PA: Caso resuelto con 12 puntos de apoyo (ver infra).

A medida que se aumenta el número de puntos de apoyo que intervienen en la determinación de dicho Helmert 3D, disminuyen los valores obtenidos en la desviación estándar de los parámetros de traslación lo que da cuenta de la mejor determinación de dichos parámetros.

Para una mayor comprobación de estos resultados se realiza un nuevo ajuste con 12 puntos de apoyo (configuración C-12 PA). Las discrepancias que se obtienen para los puntos de chequeo en el ajuste con 12 puntos de apoyo son 0.063 m para la coordenada X y 0.096 m para la coordenada Y ($RMSE_{XY} = 0.115$ m) y para los puntos de apoyo 0.057 m para la coordenada X y 0.124 m para la coordenada Y ($RMSE_{XY} = 0.159$ m), con lo que se refuerza los análisis anteriores.

Las siguientes tablas (Tabla 5.10, Tabla 5.11) muestran el resto de parámetros asociados a la transformación del Helmert 3D donde se puede observar, exceptuando las configuraciones C10 y C12, que a diferencia de lo que ocurría con los parámetros relativos a la traslación el Helmert 3D, estos se resuelven correctamente. Nótese como en las configuraciones C10 y C12, correspondientes a los casos resueltos con desalineamiento IMU/Cámara, el giro χ se anula como consecuencia de la calibración de este desalineamiento.

DATUM	Factor de Escala	
	λ	$d\lambda$
C8	1.0000079	0.0000088
C9	1.0000084	0.0000080
C-12 PA	1.0000157	0.0000067
C10	1.0000099	0.0000089
C12	1.0000087	0.0000089

Tabla 5.10. Parámetros de escala del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo. Unidades en metros. C-12 PA: Caso resuelto con 12 puntos de apoyo.

DATUM	Rotación del Helmert 3D			Desviación Estándar a		
	$\Delta\omega$	$\Delta\phi$	$\Delta\chi$	$\sigma_{\Delta\omega}$	$\sigma_{\Delta\phi}$	$\sigma_{\Delta\chi}$
C8	0.0011	-0.0013	0.0034	0.0002	0.0002	0.0003
C9	0.0011	-0.0013	0.0034	0.0001	0.0001	0.0003
C-12 PA	0.0011	-0.0012	0.0026	0.0001	0.0001	0.0003
C10	-0.0002	0.0012	0.0000	0.0009	0.0007	0.0005
C12	0.0010	-0.0011	0.0000	0.0002	0.0002	0.0005

Tabla 5.11. Parámetros de rotación del Helmert 3D obtenidos tras aplicar el modelo matemático Datum en el vuelo bajo. Unidades en metros. C-12 PA: Caso resuelto con 12 puntos de apoyo.

Aún así, estas configuraciones siguen siendo insuficientes ya que, tal y como se ve en la Tabla 5.8, las discrepancias en el chequeo son mayores del tamaño del GSD.

Si de las configuraciones C8, C9 y C-12 PA, analizamos los resultados de la componente planimétrica individualmente para la coordenada X y para la coordenada Y , observamos como el error medio cuadrático de las discrepancias es superior para la coordenada Y ocasionando un error sistemático en esta dirección (dirección N-S, perpendicular a la dirección de vuelo) tal y como puede apreciarse en la Figura 5.13.

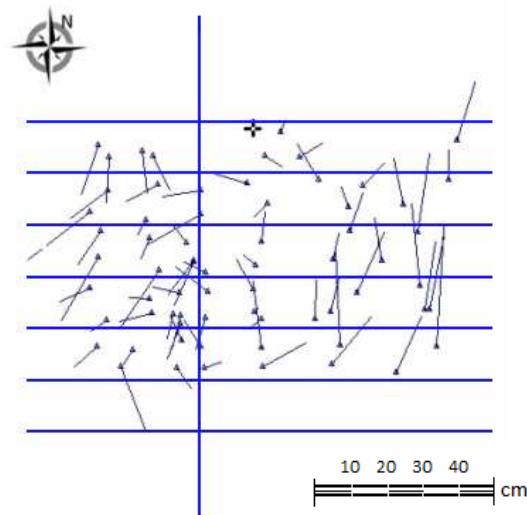


Fig. 5.13. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum sin desalineamiento IMU/Cámara. Escala 1:5000. Escala gráfica para los vectores de discrepancias.

Dicho sistematismo pone de manifiesto una mala determinación del ángulo χ . Debido a que la dirección de vuelo es E-W, prácticamente los valores registrados para el ángulo χ son 0° o 180° , por lo que un error en dicho ángulo influirá de manera más notoria en la coordenada planimétrica Y . De ahí, que al introducir en el ajuste el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara se corrija el valor observado para el ángulo χ y con ello el sistematismo asociado al chequeo reduciendo las discrepancias obtenidas en los mismos (Fig. 5.14).

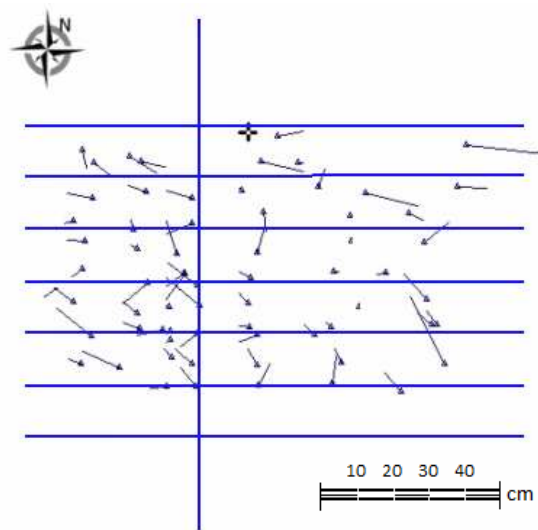


Fig. 5.14. Vectores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo ADS40 con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum con desalineamiento IMU/Cámara. Escala 1:5000. Escala gráfica para los vectores de discrepancias.

Antes de analizar la componente planimétrica para los casos resueltos con el modelo matemático Drift, se muestran las elipses de error y la fiabilidad externa de los puntos de chequeo resueltos con el modelo matemático Datum (Fig. 5.15), donde de manera contraria a como ocurría en el caso anterior, la representación gráfica de la fiabilidad externa se muestra menor a la representación gráfica de su correspondiente elipse de error, lo que garantiza una mejor interpretación de los resultados.

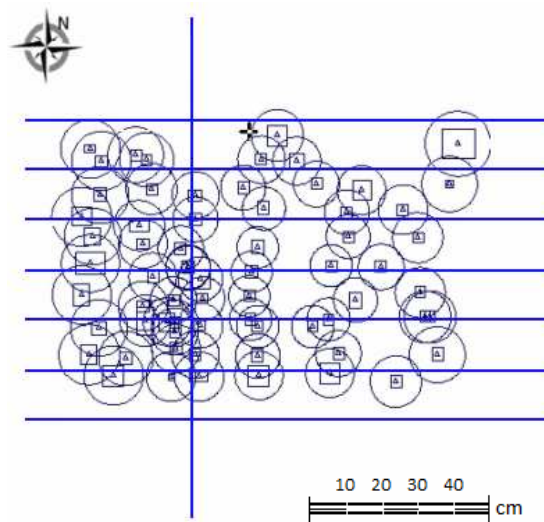


Fig. 5.15. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Datum. Escala gráfica para las elipses de error.

En cuanto al modelo matemático Drift, y al igual que en los casos anteriores, se muestra por un lado la componente planimétrica X ($RMSE_X$) y por otro la componente planimétrica Y ($RMSE_Y$) (Tabla 5.12). Además, y debido a que el modelo Drift, al igual que el modelo Datum, modela las discrepancias entre el sistema de coordenadas terreno (definido por los puntos de apoyo) y el sistema cámara, se mostrarán los mismos resultados obtenidos para los puntos de apoyo involucrados en el ajuste.

DRIFT Conf.	Puntos de Chequeo			Puntos de Apoyo		
	$RMSE_X$	$RMSE_Y$	$RMSE_{XY}$	$RMSE_X$	$RMSE_Y$	$RMSE_{XY}$
C14	0.090	0.118	0.148	0.062	0.163	0.174
C15	0.072	0.111	0.132	0.048	0.128	0.137
C16	0.059	0.076	0.096	0.087	0.084	0.121
C17	---	---	---	---	---	---
C18	0.054	0.075	0.092	0.070	0.068	0.098
C19	---	---	---	---	---	---

Tabla 5.12. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo y apoyo en los casos resueltos con el modelo matemático Drift en el vuelo bajo. Unidades en metros.

A medida que se aumenta el número de puntos de apoyo disminuyen ligeramente las discrepancias obtenidas para la componente planimétrica de dichos puntos, y

con ello la discrepancia de los puntos de chequeo. Del mismo modo que se hizo para los casos resueltos con el modelo matemático Datum, se incorpora una configuración más en la que se realiza el ajuste del bloque con 12 puntos de apoyo sin calcular el desalineamiento IMU/Cámara. Los resultados obtenidos para los puntos de apoyo de esta configuración son 0.060 m para la coordenada X y 0.115 m para la coordenada Y ($RMSE_{XY} = 0.130$), y para los puntos de chequeo son 0.062 m para la coordenada X y 0.107 m para la coordenada Y ($RMSE_{XY} = 0.124$), por lo que se refuerzan los análisis de las configuraciones C14 y C15 (Tabla 5.12).

Además, esta mejora aumenta al modelar el desalineamiento entre el IMU/Cámara ya que se produce un error sistemático en la coordenada Y de los puntos de chequeo (a la izquierda de la Figura 5.16) que se minimiza en las configuraciones C18 y C20, cuando el desalineamiento IMU/Cámara si es modelado (ver infra). A la derecha de la Figura 5.16 se muestran las elipses de error y fiabilidad externa de los puntos chequeados. Debido a que la representación gráfica de la fiabilidad externa es menor a la de la elipse de error se garantiza la correcta interpretación de los resultados.

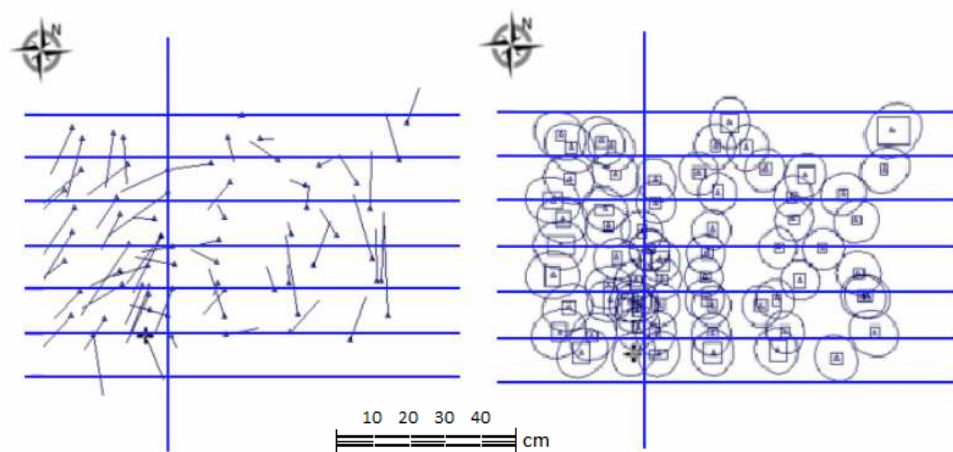


Fig. 5.16. A la izquierda vectores de errores de las discrepancias planimétricas ($RMSE_{XY}$) de los puntos de chequeo. A la derecha, representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica ($RMSE_{XY}$) de dicho chequeo en las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 10 cm utilizando el modelo Drift. Escala 1:5000.

Escala gráfica para los vectores de discrepancias y las elipses de error.

De entre las configuraciones realizadas con el modelo matemático Drift, la configuración C18 es la que muestra mejores resultados en cuanto a las discrepancias planimétricas obtenidas para los puntos de chequeo, 0.8 veces el tamaño del GSD siendo de 1.5 veces el tamaño del GSD para la configuración C15 (Tabla 5.12). Estas configuraciones difieren en el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara. Es decir, al introducir el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara en el ajuste se minimiza el efecto del sistematismo en las discrepancias de las coordenadas Y de los puntos de chequeo asociado al ángulo χ , del mismo modo que ocurría para los casos resueltos con el modelo matemático anterior (Fig. 5.17) mejorando las discrepancias obtenidas para los puntos de chequeo.

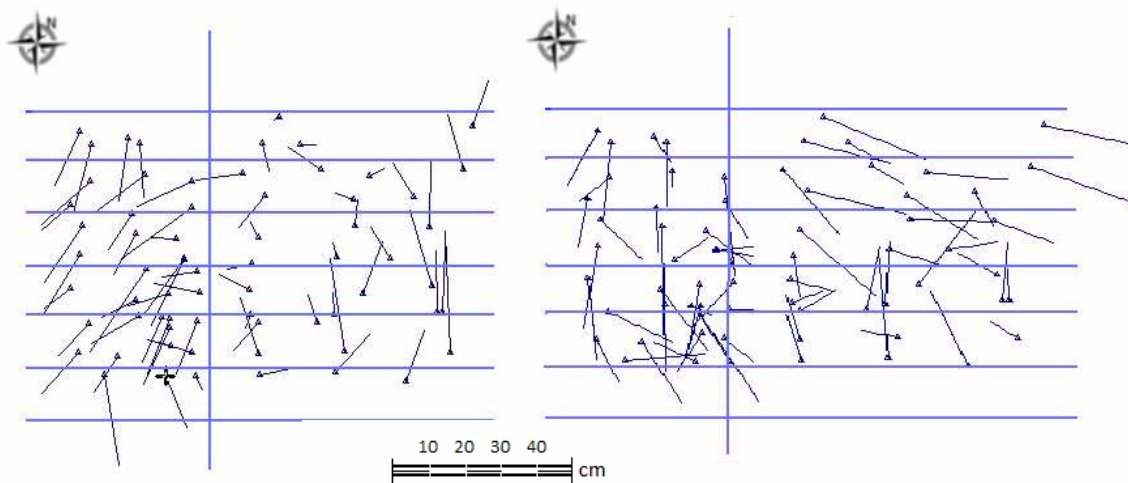


Fig. 5.17. A la izquierda vectores de errores de las discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo sin introducir el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara aplicando el modelo Drift con 4 puntos de apoyo. A la derecha, mismo caso introduciendo el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara. Escala 1:5000. Escala gráfica para los vectores de discrepancias.

Por último, se ha de tener en cuenta el error sistemático que presenta la componente planimétrica de las observaciones GNSS en comparación con los resultados del ajuste. En la Figura 5.18 se observa cómo los vectores de discrepancias planimétricas de los puntos fijos se orientan en dirección N-S, (dirección de la coordenada Y). Este comportamiento sistemático es debido a las imprecisiones asociadas al cómputo del GNSS (Figura 4.3) y como es lógico se

minimiza al emplear para la resolución del ajuste de haces el modelo Drift mostrado en la ecuación (4.44).

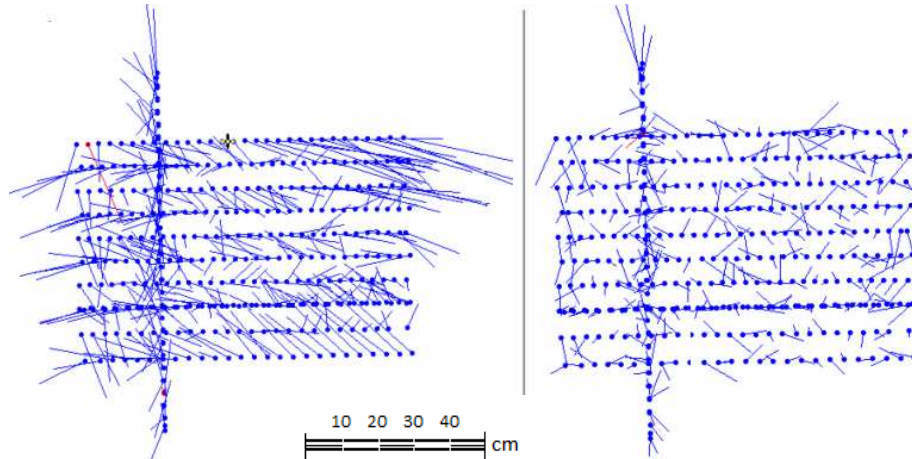


Fig. 5.18. Representación de los vectores de discrepancias planimétricas de los puntos fijos (fixes) del vuelo con GSD de 10 cm sobre la ciudad de Ávila correspondientes a las configuraciones C10, sin Drift (izquierda) y C16, con Drift (derecha). Escala 1:5000. Escala gráfica para los vectores de discrepancias.

Consecuentemente, dichas imprecisiones asociadas a las observaciones GNSS se ven reflejadas en los errores medios cuadráticos asociados a las discrepancias de los puntos fijos tras el ajuste, aunque estos resultados no se reflejan en los errores medios cuadráticos de las discrepancias de los puntos de chequeo. Es decir, tal y como muestra la Tabla 5.13, los errores medios cuadráticos asociados a los puntos fijos de los casos resueltos con el modelo matemático Datum (C11) son mayores a los obtenidos al aplicar el modelo matemático Drift (C18).

Errores medios cuadráticos asociados a los puntos fijos [m]			
Conf.	RMSE _X	RMSE _Y	RMSE _Z
C11	0.084	0.053	0.024
C18	0.031	0.030	0.020

Tabla 5.13. Errores medios cuadráticos de las discrepancias de los puntos fijos obtenidas para el vuelo bajo con GSD de 10 cm tras la aerotriangulación.

A continuación pasamos a analizar la componente altimétrica (Fig. 5.19). En cualquiera de las aerotriangulaciones realizadas el error medio cuadrático de las discrepancias de los puntos de chequeo se mantiene por debajo del tamaño del GSD, que recordemos nuevamente, es de 10 cm. Los mejores resultados

altimétricos son obtenidos para la configuración C10 ($RMSE_Z = 0.039$ m) y para la configuración C16 ($RMSE_Z = 0.036$ m), variando en el resto de los casos entre 0.6 y 0.9 veces el valor del GSD. Esto significa una variación de entre 0.32 y 0.75 veces la precisión esperada según el factor de calidad estereoscópica de la ADS40 visto según la ecuación (5.1).

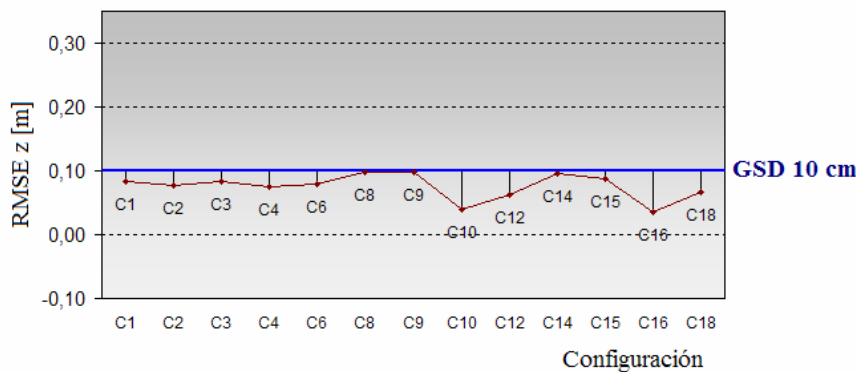


Fig. 5.19. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas ($RMSE_Z$) de las aerotriangulaciones del vuelo bajo con GSD de 10 cm.

Si observamos la Tabla 5.6, la configuración C10 y la configuración C16 tienen en común la calibración del IMU-Cámara por pasada.

A través de la componente planimétrica hemos visto como los valores angulares del IMU presentaban errores en la determinación del ángulo χ que se propagaban a los resultados planimétricos de las discrepancias de los puntos de chequeo. Una vez corregido este error nos encontramos con la situación de discernir entre una calibración para cada una de las pasadas, o una calibración del sensor única para todo el bloque.

En base a esto y a los resultados altimétricos mostrados para los casos resueltos con la calibración por pasada, se sospecha de una mejor determinación altimétrica cuando los ángulos ω (ángulo sobre el eje X) y φ (ángulo sobre el eje Y) se determinan de manera independiente para cada una de las pasadas. Es decir, al calibrar el desalineamiento IMU/Cámara por pasada se consiguen valores angulares ω y φ independientes para cada una de las pasadas que conforman el

vuelo, lo que se traduce en una mejora altimétrica de las discrepancias obtenidas en los puntos de chequeo.

En definitiva, la configuración más apropiada para resolver la aerotriangulación del vuelo bajo, vuelo con GSD de 10 cm, resultan ser la configuración C16, resuelta a través del modelo matemático Drift con 4 puntos de apoyo y calibrando el desalineamiento del IMU/Cámara por pasada. En este caso, la precisión externa planimétrica obtenida es peor en términos de errores medios cuadráticos a la precisión altimétrica, siendo la componente planimétrica 0.9 veces el tamaño del GSD y la componente altimétrica menor a 0.4 veces el GSD.

Por tanto resumiendo, tenemos que el vuelo bajo se ve afectado de una mala determinación en las mediciones angulares del IMU que se minimiza al calibrar de nuevo el desalineamiento IMU/Cámara por pasada, dando cuenta así de los ángulos asociados a cada uno de los tres ejes de su sistema cartesiano para cada una de las pasadas que componen el vuelo. Por otro lado, la captura de datos de GNSS se ve afectada por una deriva que es corregida al aplicar el modelo matemático Drift. Así pues se obtiene para el vuelo bajo, vuelo con GSD de 10 cm, precisiones externas de 0.9 veces el tamaño del GSD para la componente planimétrica y 0.4 veces el GSD para la componente altimétrica.

5.5.2. AEROTRIANGULACIÓN DEL VUELO ALTO: GSD 25 CM

A continuación presentaremos, del mismo modo que se hizo para el vuelo bajo, los resultados de la aerotriangulación para el vuelo alto, vuelo con GSD de 25 cm.

La siguiente tabla (Tabla 5.14) resume los datos obtenidos tras la aerotriangulación del vuelo con GSD de 25 cm. En ella se presenta tanto los puntos de apoyo (PA) y puntos de chequeo (PCh) utilizados para el ajuste como la precisión interna obtenida (σ_0) y la precisión externa para la componente planimétrica ($RMSE_{XY}$) y para la componente altimétrica ($RMSE_Z$).

Resultados de la aerotriangulación del vuelo alto. GSD de 25 cm						
Configuración		PA/PCh	Sigma0 [μm]	RMSE _{XY} [m]	RMSE _Z [m]	Conf.
Basic	Sin desalineamiento	0 / 50	1.8	0.170	0.130	C1
		8 / 50	1.8	0.168	0.124	C2
		24 / 50	1.8	0.165	0.114	C3
	Desalineamiento por pasada	8 / 50	1.8	0.166	0.123	C4
		24 / 50	1.8	0.167	0.112	C5
	Desalineamiento por sensor	8 / 50	1.8	0.168	0.126	C6
		24 / 50	1.8	0.164	0.112	C7
Datum	Sin desalineamiento	8 / 50	1.8	0.175	0.118	C8
		24 / 50	---	---	---	C9
	Desalineamiento por pasada	8 / 50	1.8	0.168	0.104	C10
		24 / 50	1.8	0.168	0.099	C11
	Desalineamiento por sensor	8 / 50	1.8	0.167	0.116	C12
		24 / 50	1.8	0.167	0.109	C13
	Drift	Sin desalineamiento	8 / 50	1.8	0.173	0.117
24 / 50			1.8	0.168	0.111	C15
Desalineamiento por pasada		8 / 50	1.8	0.168	0.103	C16
		24 / 50	1.8	0.168	0.099	C17
Desalineamiento por sensor		8 / 50	1.8	0.166	0.117	C18
		24 / 50	1.8	0.167	0.110	C19

Tabla 5.14. Resultados obtenidos para el vuelo alto con GSD de 25 cm tras la aerotriangulación.

Tal y como se muestra en la Tabla 5.14, la precisión interna del ajuste (σ_0) se mantiene invariable según la configuración empleada para la resolución de la aerotriangulación. Este resultado pone de manifiesto que internamente el ajuste se comporta bien. Dado que el tamaño del píxel de nuestras imágenes es de 6.5 μm , obtenemos una precisión interna próxima a 0.3 veces el tamaño del píxel. Por tanto y del mismo modo que ocurría para el vuelo bajo, podemos decir que el número de puntos de paso es elevado (en este caso contamos con 5200 puntos de paso), está homogéneamente distribuidos (Fig. 5.20) y las desviaciones obtenidas en sus fotocoordenadas tras el ajuste son pequeñas. Recordemos de nuevo que la distribución de puntos de paso para resolver el ajuste es un factor fundamental y que la precisión interna de las coordenadas se resuelve según la ecuación (4.53).

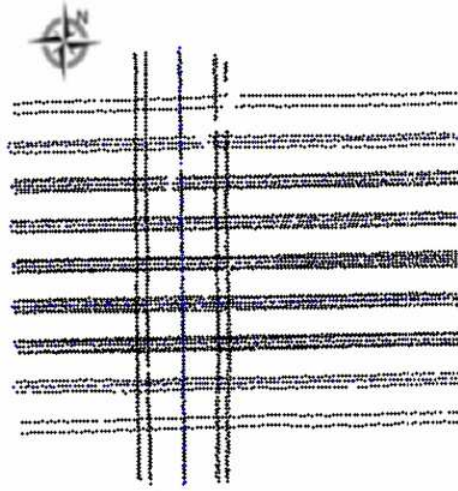


Fig. 5.20. Distribución de los puntos de paso en el vuelo alto, vuelo con GSD de 25 cm. Escala 1:12500.

Siguiendo la metodología utilizada en el vuelo bajo para analizar qué modelo matemático es más favorable para la resolución del ajuste de haces, analizaremos los errores medios cuadráticos obtenidos para las discrepancias de los puntos de chequeo utilizados como auditoria externa. Analizaremos por un lado la componente planimétrica, y por otro la altimétrica y compararemos dichos resultados con el tamaño teórico del GSD, que para el vuelo alto es de 25 cm.

Recordemos que para la planimetría el valor teórico del GSD viene determinado por la ecuación (3.1), mientras que para la altimetría utilizaremos la ecuación (5.1) obteniendo 0.30 m como precisión altimétrica esperada a priori para el vuelo con GSD de 25 cm.

Analizaremos en primer lugar la componente planimétrica. Para ello representaremos en un gráfico los resultados obtenidos cuyo eje X representa las distintas configuraciones empleadas y el eje Y el error medio cuadrático planimétrico ($RMSE_{xy}$) obtenido para las discrepancias de los puntos de chequeo utilizados en cada una de las configuraciones (Fig. 5.21).

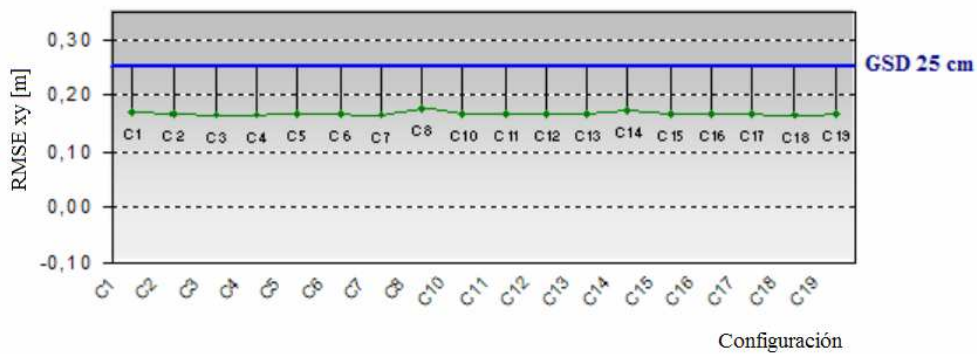


Fig. 5.21. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricas (RMSE_{XY}) de las aerotriangulaciones del vuelo alto con GSD de 25 cm.

De la Figura 5.21 podemos ver como todos los errores medios cuadráticos de la precisión externa (RMSE_{XY}) de las distintas aerotriangulaciones realizadas están por debajo del tamaño del GSD. Para esta componente se observa un comportamiento mucho más regular que el que presentaba el vuelo bajo. Todas las configuraciones obtienen precisiones externas comprendidas entre 0.66 y 0.70 veces el tamaño del GSD, errores relativos menores a los obtenidos para el vuelo bajo.

A continuación, y del mismo modo que se realizó para el vuelo bajo, analizaremos los resultados referentes a la componente planimétrica para cada uno de los modelos matemáticos utilizados de manera individual. Comenzaremos analizando los casos resueltos con el modelo matemático más simple, modelo Basic.

Tal y como se muestra en la Figura 5.22, los resultados arrojados por el vuelo alto al aplicar el modelo Basic no tienen el mismo comportamiento que los casos resueltos en el vuelo bajo (Fig. 5.11), con lo que desaparece el comportamiento sistemático que mostraba el vuelo bajo asociado a la mayor discrepancia en esta coordenada, coordenada X (Tabla 5.7). Por otro lado, y tal y como puede observarse la representación gráfica de la fiabilidad externa (a la derecha de la Figura 5.22), esta es mayor a la de la elipse de error por lo que los resultados del modelo Basic deben volver a analizarse con cautela.

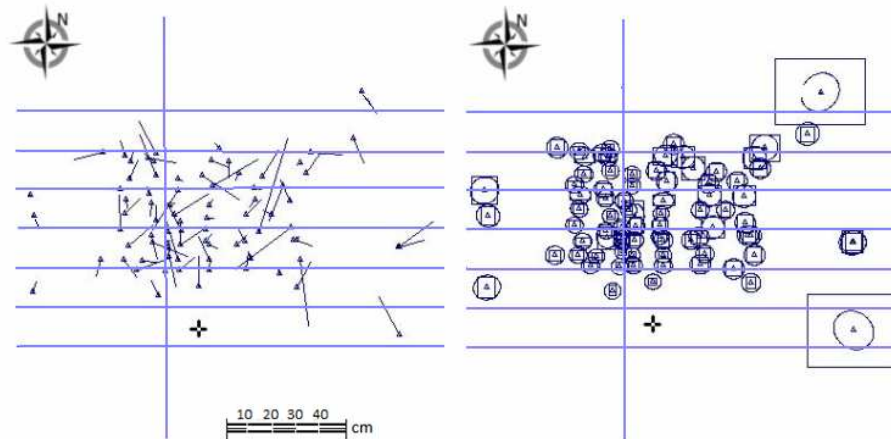


Fig. 5.22. A la izquierda vectores de discrepancias de la componente planimétrica (RMSE_{XY}) de los puntos de chequeo. A la derecha, representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSE_{XY}) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 25 cm utilizando el modelo Basic. Escala 1:12500. Escala gráfica para vectores de discrepancias y elipses de error.

BASIC	Puntos de Chequeo			
	Conf.	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _{XY} [m]
	C1	0.117	0.123	0.130
	C2	0.115	0.122	0.124
	C3	0.111	0.122	0.114
	C4	0.112	0.122	0.123
	C5	0.110	0.125	0.112
	C6	0.115	0.122	0.126
	C7	0.108	0.123	0.112

Tabla 5.15. Composición cuadrática de los discrepancias obtenidos en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Basic en el vuelo alto.

En cuanto al modelo Datum, presentamos a continuación (Tabla 5.16) la composición cuadrática de las discrepancias de los puntos de chequeo obtenidas para su coordenada X (RMSE_X) y para su coordenada Y (RMSE_Y).

DATUM	Puntos de Chequeo			
	Conf.	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _{XY} [m]
	C8	0.121	0.126	0.175
	C9	---	---	---
	C10	0.116	0.122	0.168
	C11	0.111	0.126	0.168
	C12	0.117	0.119	0.167
	C13	0.111	0.125	0.167

Tabla 5.16. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos con el modelo matemático Datum en el vuelo alto.

A la vista de estos datos podemos concluir que en el caso del vuelo alto la coordenada Y se comporta de manera más regular asimilándose más sus resultados a los obtenidos en la coordenada X . Esto pone de manifiesto que en este caso, el ángulo χ del sistema inercial presenta una mejor determinación. Hecho que se pone también de manifiesto al comprobar que el sistematismo en las discrepancias de los puntos de chequeo presentado en el vuelo bajo, no aparece en el vuelo alto (Fig. 5.23).

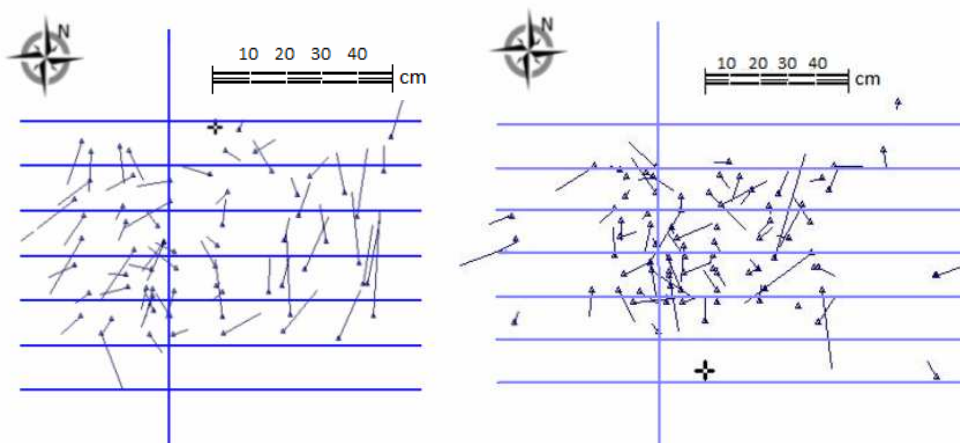


Fig. 5.23. A la izquierda, vectores de discrepancias de la componente planimétrica (RMSEXY) de los puntos de chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo bajo utilizando el modelo Datum. Escala 1:5000. A la derecha resultados obtenidos en el vuelo alto (Escala 1:12500). Escalas gráficas para vectores de discrepancias.

Antes de analizar la componente planimétrica para los casos resueltos con el modelo Drift, se muestran las elipses de error y la fiabilidad externa de los puntos de chequeo resueltos con el modelo matemático Datum (Fig. 5.24), donde la representación gráfica de la fiabilidad externa se muestra en casi todos los puntos de chequeo menor a la representación gráfica de su correspondiente elipse de error, lo que nos garantiza una mejor interpretación de los resultados que en el modelo anterior. Nótese que los puntos situados más a la esquina del bloque tiene menor fiabilidad externa (su representación gráfica es mayor a la elipse de error) y que en comparación con el vuelo bajo, las diferencias entre el modelo Basic y el modelo Datum en cuanto a esta representación gráfica de la fiabilidad externa no es tan pronunciada.

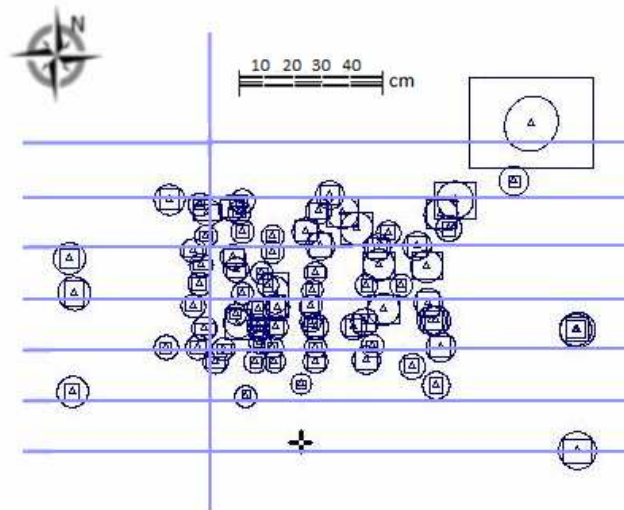


Fig. 5.24. Representación gráfica de la elipse de error (elipse) y fiabilidad externa (rectángulo) de la componente planimétrica (RMSEXY) del chequeo de las aerotriangulaciones del vuelo con GSD de 25 cm utilizando el modelo Datum. Escala 1:12500. Escala gráfica para elipses de error.

En cuanto al modelo matemático Drift, y al igual que en los casos anteriores, se muestra por un lado la componente planimétrica X ($RMSE_X$) y por otro la componente planimétrica Y ($RMSE_Y$) (Tabla 5.17).

DRIFT	Puntos de Chequeo		
	RMSE _X [m]	RMSE _Y [m]	RMSE _{XY} [m]
C14	0.120	0.124	0.173
C15	0.116	0.121	0.168
C16	0.116	0.122	0.168
C17	0.111	0.126	0.168
C18	0.116	0.119	0.166
C19	0.112	0.124	0.167

Tabla 5.17. Composición cuadrática de las discrepancias obtenidas en X e Y para los puntos de chequeo en los casos resueltos como el modelo matemático Drift en el vuelo alto.

A la vista de las configuraciones mostradas en la Tabla 5.16, al aumentar el número de puntos de apoyo (de 8 puntos de apoyo a 24) las discrepancias obtenidas para los puntos de chequeo no mejoran, al igual que tampoco mejora la introducción en el ajuste el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara. Es decir, las discrepancias de los puntos de chequeo se mantienen para todos los casos más o menos constantes, 0.46 veces el tamaño del GSD para la coordenada X y 0.49 veces para la coordenada Y .

Por último debemos de resaltar, aunque de forma menos significativa que en el vuelo bajo, el sistematismo presente en el vuelo alto relativo a los residuos obtenidos para la componente planimétrica de las coordenadas de los puntos fijos con respecto a las observaciones GNSS. En la Figura 5.25 se aprecia este comportamiento sistemático para cada una de las pasadas, el cual, tal y como comentamos para el vuelo bajo, es debido a las imprecisiones asociadas al cómputo del GNSS (Figura 4.3) y como es lógico se minimiza al emplear para la resolución del ajuste de haces el modelo Drift mostrado en la ecuación (4.44).

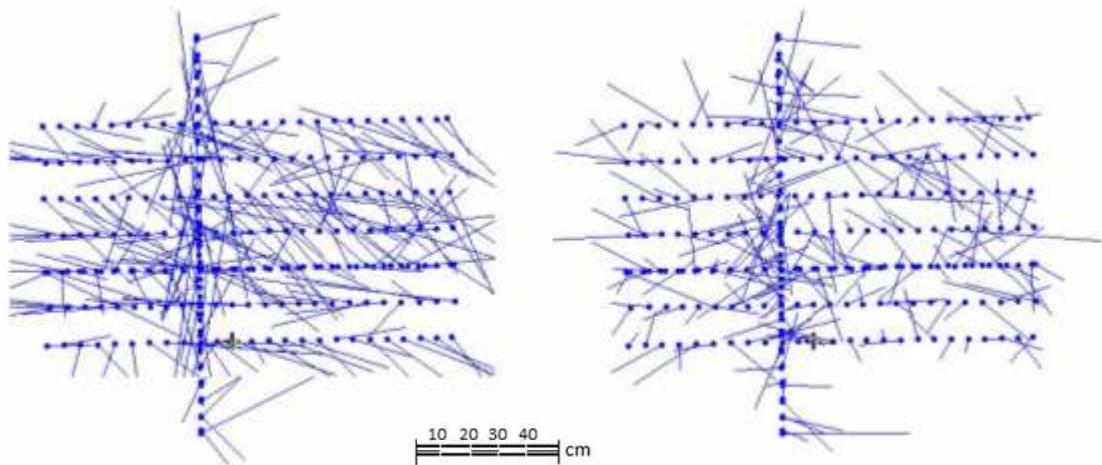


Fig. 5.25. Representación de los vectores de residuos planimétricos de los puntos fijos (*fixes*) del vuelo alto con GSD de 25 cm sobre la ciudad de Ávila después de aetrotriangular con el modelo Basic (izquierda) y modelo Drift (derecha). Escala 1:20000. Escala gráfica para vectores de residuos.

En consecuencia, dichas imprecisiones asociadas al cómputo se ven reflejadas en los errores medios cuadráticos asociados a las discrepancias de los puntos fijos tras el ajuste, aunque estos resultados no se reflejan en los errores medios cuadráticos de las discrepancias de los puntos de chequeo. Los errores en los puntos fijos (*fixes*) obtenidos tras el modelo Basic son de 0.158 m para la componente planimétrica y 0.049 m para la componente altimétrica, siendo de 0.092 m para la planimetría y 0.039 m para la altimetría al aplicar el modelo Drift (ver Anexo IV).

A continuación pasamos a analizar la componente altimétrica (Fig. 5.26). En cualquiera de las aerotriangulaciones realizadas el error medio cuadrático de las discrepancias de los puntos de chequeo se mantienen por debajo del tamaño del GSD, que recordemos nuevamente, es de 25 cm. Los mejores resultados altimétricos son obtenidos para la configuración C11 ($RMSE_Z = 0.099$ m) y para la configuración C17 ($RMSE_Z = 0.099$ m), variando en el resto de los casos entre 0.4 y 0.5 veces el valor del GSD. Esto significa una variación de entre 0.34 y 0.43 veces la precisión esperada según el factor de calidad estereoscópica de la ADS40 visto en la ecuación (5.1). Según estos datos hay una variación en los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas ($RMSE_Z$) mucho menos significativa que para el vuelo bajo.

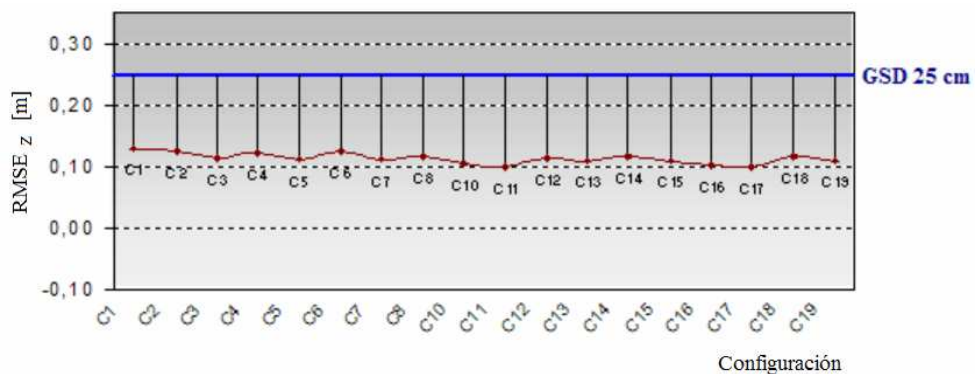


Fig. 5.26. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas ($RMSE_Z$) de las aerotriangulaciones del vuelo alto con GSD de 25 cm.

De manera contraria a como sucedía en el vuelo bajo donde al calibrar el desalineamiento IMU/Cámara por pasada se conseguían mejores resultados para los valores angulares ω y ϕ , para cada una de las pasadas, lo que se traducía en una mejora altimétrica de las discrepancias obtenidas en los puntos de chequeo, en el vuelo alto no se aprecian estas mejoras (Tabla 5.14) por lo que se vuelve a poner de manifiesto la mejor determinación en las mediciones angulares del IMU en este vuelo.

En definitiva, la configuración más apropiada para resolver la aerotriangulación del vuelo alto, vuelo con GSD de 25 cm, resulta ser las configuraciones C11 y

C17. La configuración C11 está resuelta a través del modelo matemático Datum con 24 puntos de apoyo y calibrando el desalineamiento del IMU/Cámara por pasada y la configuración C17 está resuelta a través del modelo matemático Drift con 24 puntos de apoyo y calibrando igualmente, el desalineamiento del IMU/cámara por pasada.

En ambos casos la precisión externa planimétrica obtenida es peor en términos de errores medios cuadráticos a la precisión altimétrica, siendo la componente planimétrica 0.67 veces el tamaño del GSD y la componente altimétrica menor a 0.4 veces el GSD. Comparando estos resultados con los obtenidos para el vuelo bajo (Tabla 5.6) observamos que los resultados planimétricos del vuelo con GSD de 25 cm son relativamente mejores que los obtenidos para el vuelo con GSD de 10 cm (1.3 veces mejor). Sin embargo, en cuanto a los resultados altimétricos, se obtienen valores relativamente equivalentes en ambos vuelos.

Por tanto resumiendo, tenemos que el vuelo alto no presenta errores angulares en la determinación del IMU que afecten a la componente planimétrica de los puntos de chequeo. Sin embargo la calibración del desalineamiento IMU/Cámara por pasada muestra una ligera mejora en la componente altimétrica de dichos puntos. Por otro lado, la captura de datos de GNSS se ve afectada por una deriva que es corregida al aplicar el modelo matemático Drift. Así pues, podríamos decir que la mejor configuración para resolver la aerotriangulación del vuelo alto es la misma que para el vuelo bajo aún cuando este presenta un mejor comportamiento en la determinación del IMU y en la captura de datos GNSS.

Finalmente obtenemos para el vuelo con GSD de 25 cm, precisiones externas de 0.67 veces el tamaño del GSD para la componente planimétrica y 0.4 veces el GSD para la componente altimétrica.

5.5.3. AEROTRIANGULACIÓN DEL VUELO COMBINADO: GSD 10 CM + GSD 25 CM

Una vez analizado el comportamiento del vuelo bajo (GSD de 10 cm) y del vuelo alto (GSD de 25 cm) y después de resuelto el ajuste de haces, se procede a aerotriangular conjuntamente los dos vuelos a distinta altura. Los resultados de estas aerotriangulaciones se recogen en la Tabla 5.18 donde se indican tanto los puntos de apoyo (PA) como los puntos de chequeo (PCh) utilizados para el ajuste, la precisión interna obtenida (σ_0) y la precisión externa para la componente planimétrica ($RMSE_{XY}$) y para la componente altimétrica ($RMSE_Z$) de cada una de las aerotriangulaciones.

Resultados de la aerotriangulación del vuelo a dos alturas: GSD 10 cm + GSD 25 cm						
Configuración		PA/ PCh	Sigma0 [μm]	$RMSE_{XY}$ [m]	$RMSE_Z$ [m]	Conf.
Basic	Sin	0 / 52	2.0	0.101	0.088	C1
	desalineamiento	8 / 52	2.0	0.100	0.087	C2
		24 / 50	2.0	0.102	0.084	C3
	Desalineamiento por pasada	8 / 52	2.0	0.100	0.083	C4
		24 / 52	---	---	---	C5
	Desalineamiento por sensor	8 / 52	2.0	0.100	0.087	C6
		24 / 52	---	---	---	C7
Datum	Sin	8 / 52	2.0	0.137	0.086	C8
	desalineamiento	24 / 52	2.0	0.123	0.074	C9
		8 / 52	---	---	---	C10
	Desalineamiento por pasada	24 / 52	2.0	0.106	0.052	C11
		8 / 52	---	---	---	C12
	Desalineamiento por sensor	24 / 52	2.0	0.105	0.069	C13
Drift	Sin	8/52	2.0	0.137	0.089	C14
	desalineamiento	24/52	2.0	0.131	0.077	C15
		8/52	---	---	---	C16
	Desalineamiento por pasada	24/52	2.0	0.108	0.058	C17
		8/52	2.0	0.102	0.078	C18
	Desalineamiento por sensor	24/52	---	---	---	C19

Tabla 5.18. Resultados de la aerotriangulación obtenidos para el vuelo combinado a dos alturas con GSD de 10+25 cm.

Tal y como se muestra en la Tabla 5.18, la precisión interna del ajuste (σ_0) se mantiene invariable según la configuración empleada para la resolución de la aerotriangulación (2.0 μm). Aunque este resultado empeora con respecto a la

obtenida para los dos vuelos individualmente, su valor sigue estando próximo a 0.3 veces el tamaño del píxel, por lo que se vuelve a poner de manifiesto que internamente el ajuste se comporta bien. Del mismo modo que ocurría para cada uno de los vuelos aerotriangulados de manera independiente, podemos decir que el número de puntos de paso es elevado (13300 puntos de paso), está homogéneamente distribuido (Fig. 5.27) y las desviaciones obtenidas en sus coordenadas tras el ajuste son pequeñas.

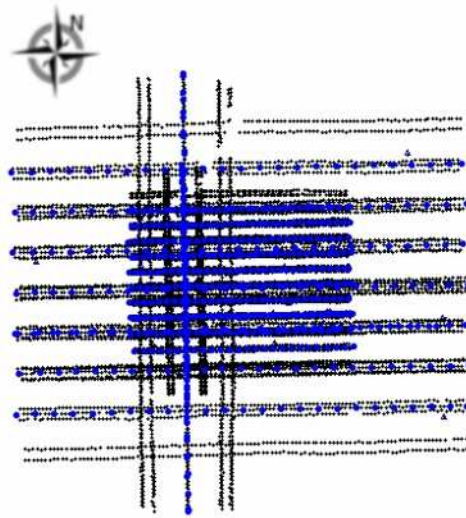


Fig. 5.27. Distribución de los puntos de paso en el vuelo combinado, vuelo con GSD de 10 cm + 25 cm. Escala 1:12500.

En cuanto al uso de 8 o 24 puntos de apoyo no hay diferencias significativas ni para la componente planimétrica, ni para la componente altimétrica (Tabla 5.18). Tomando las configuraciones C14 y C15 para analizar el comportamiento de los puntos de apoyo observamos como al aumentar el número de puntos de apoyo en un factor de 3, la componente altimétrica mejora tan sólo 1 cm. Para la planimetría esta variación es mucho menor, por lo que el hecho de introducir más puntos de apoyo en el ajuste no mejora los resultados en los errores medios cuadráticos de la precisión externa.

A continuación procederemos a analizar qué modelo matemático es más favorable para la resolución del ajuste de haces del vuelo combinado. Siguiendo

la metodología utilizada hasta ahora, analizaremos los errores medios cuadráticos obtenidos a través de las discrepancias de los puntos de chequeo. Por un lado analizaremos la componente planimétrica y por otro la altimétrica. Dichos resultados serán comparados con el tamaño del GSD máximo, que para este caso coincide con el GSD del vuelo alto, 25 cm. La altimetría será comparada también con la precisión altimétrica esperada a priori para un vuelo a 2500 m utilizando la ecuación (5.1), por lo que se obtendrá 0.30 m.

Si representamos los valores obtenidos para el error medio cuadrático de las discrepancias planimétricas recogidas en la Tabla 5.18 en un gráfico cuyo eje X representa las distintas configuraciones empleadas y el eje Y el correspondiente error medio cuadrático de dichas discrepancias planimétricas ($RMSE_{xy}$) podremos analizar la componente planimétrica (Fig. 5.28).



Fig. 5.28. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias planimétricas ($RMSE_{XY}$) de las aerotriangulaciones del vuelo combinado a dos alturas con GSD 10 cm + GSD 25 cm.

De este gráfico (Fig. 5.28) se observa como las configuraciones C8, C9, C14 y C15 presentan peor resultado planimétrico. Están en torno a 2-3 cm por encima del tamaño del GSD más pequeño del vuelo combinado, 0.10 m. Estas configuraciones corresponden a los casos cuyo modelo matemático involucra un Helmert 3D entre el sistema de la cámara y el sistema terreno y además no se corrige la calibración IMU/Cámara.

Si de estas configuraciones (C8, C9, C14 y C15) analizamos los resultados de la componente planimétrica individualmente para la coordenada X y para la coordenada Y , observamos como el error medio cuadrático se ve incrementado por el resultado obtenido en la coordenada Y (Tabla 5.19)¹³.

RMSE de los puntos de chequeo (PCh) del vuelo combinado [m]			
	$RMSE_x$	$RMSE_y$	$RMSE_z$
C8	0.073	0.116	0.086
C9	0.063	0.106	0.074
C14	0.072	0.117	0.089
C15	0.065	0.114	0.077

Tabla 5.19. Errores medios cuadráticos (RMSE) para las discrepancias de las coordenadas X , Y , Z de los puntos de chequeo de las configuraciones C9, C8, C14 y C15 del vuelo combinado (GSD 10 cm + GSD 25 cm).

De este análisis deducimos que los errores en la determinación del ángulo χ están afectando a la determinación de las coordenadas planimétricas, en concreto de la coordenada Y de los puntos de chequeo. Tal y como muestra la Figura 5.29 los vectores de error de los puntos de chequeo muestran una clara tendencia sistemática en la dirección de las Y (dirección perpendicular al vuelo) y esta es minimizada cuando se aplica el cálculo del desalineamiento IMU/Cámara, ya sea por sensor o por pasada.

¹³ Para el resto de configuraciones estos resultados se encuentran recogidos en el Anexo IV.

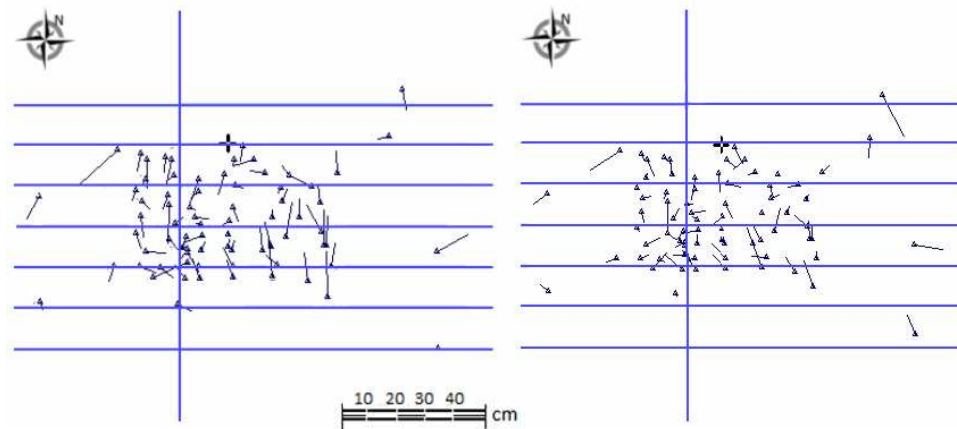


Fig. 5.29. A la izquierda, vectores de error de los errores medios cuadráticos planimétricos de las discrepancias de los puntos de chequeo para la configuración C15 del vuelo combinado a dos alturas. A la derecha, resultados de la configuración C17. Escala 1:12500. Escala gráfica de los vectores de discrepancias.

Para el resto de configuraciones, los resultados de los errores medios cuadráticos en las discrepancias de la componente planimétrica se sitúan entre 0.100 m y 0.108 m, tamaño del GSD más pequeño del vuelo.

Por último, y antes de analizar la componente altimétrica, debemos de resaltar que dado que el comportamiento del vuelo bajo y alto se traslada al vuelo combinado, debemos de tener en cuenta el error sistemático en los residuos obtenidos para la componente planimétrica de las coordenadas de los puntos fijos con respecto a las observaciones GNSS. En la Figura 5.30 se aprecia este comportamiento sistemático para cada una de las pasadas, el cual es debido a las imprecisiones asociadas al cómputo del GNSS (Figura 4.3) y como es lógico se minimiza al emplear para la resolución del ajuste de haces el modelo Drift mostrado en la ecuación (4.44). Por ello optaremos como configuración más favorable para la resolución del ajuste de haces del vuelo combinado la configuración C17: modelo matemático Drift con 24 puntos de apoyo y calibrando el desalineamiento del IMU/Cámara por pasada.

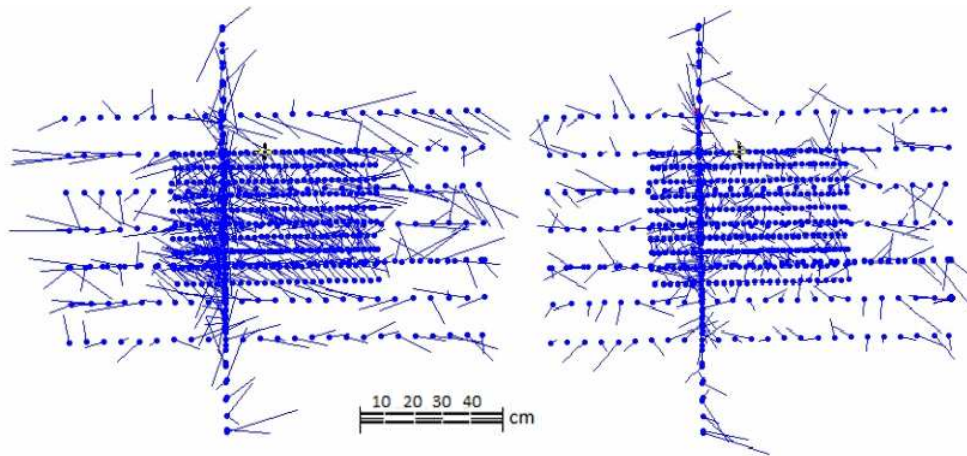


Fig. 5.30. Representación de los vectores de los residuos planimétricos de los puntos fijos (fixes) del vuelo combinado a dos alturas sobre la ciudad de Ávila después de aetrotriangular. A la izquierda la configuración C11 y a la derecha la configuración C17. Escala 1:10000. Escala gráfica para los vectores de residuos.

A continuación pasamos a analizar la componente altimétrica (Fig. 5.31). En cualquiera de las aerotriangulaciones realizadas el error medio cuadrático de las discrepancias altimétricas de los puntos de chequeo se mantienen por debajo del tamaño del GSD más pequeño del vuelo (10 cm). Los mejores resultados altimétricos son obtenidos para la configuración C11 ($RMSE_z = 0.052$ m) y para la configuración C17 ($RMSE_z = 0.058$ m), variando en el resto de los casos entre 0.7 y 0.8 veces el valor del GSD mínimo o en torno a 0.3 veces el valor del GSD máximo (25 cm).



Fig. 5.31. Representación gráfica de los errores medios cuadráticos de las discrepancias altimétricas (RMSE_Z) de las aerotriangulaciones del vuelo combinado a dos alturas: GSD 10 cm + GSD 25 cm.

La mejora altimétrica de las configuraciones C11 y C17, al igual que en el vuelo bajo, se debe a la calibración del desalineamiento IMU/Cámara por pasada. Con esta calibración del desalineamiento IMU/Cámara se consiguen mejores resultados para los valores angulares ω y φ , lo que se traduce en una mejora altimétrica de las discrepancias obtenidas en los puntos de chequeo. Es decir, el vuelo conjunto se comporta de manera similar al vuelo bajo.

En definitiva, las configuraciones más apropiadas para resolver la aerotriangulación del vuelo combinado, resultan ser las configuraciones C11 y C17. La configuración C11 está resuelta a través del modelo matemático Datum con 24 puntos de apoyo y calibrando el desalineamiento del IMU/Cámara por pasada y la configuración C17 está resuelta a través del modelo matemático Drift con 24 puntos de apoyo y calibrando igualmente, el desalineamiento del IMU/Cámara por pasada.

En ambos casos la precisión externa planimétrica obtenida es peor en términos de errores medios cuadráticos a la precisión altimétrica, siendo la componente planimétrica el tamaño del GSD mínimo y la componente altimétrica menor a 0.5 veces este GSD.

Resumiendo y comparando los resultados obtenidos en el vuelo combinado con los resultados para los vuelos individuales (Tabla 5.20), vemos como el comportamiento de los vuelos individuales se traslada del mismo modo al vuelo combinado, obteniendo tras el ajuste errores medios cuadráticos en la precisión externa en torno al valor del GSD mínimo para la componente planimétrica y en torno a 0.5 veces el GSD mínimo para la componente altimétrica.

Precisión externa de los vuelos ADS40 SH52 [m]					
	Configuración	RMSE _{XY}	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z	RMSE _Z /GSD
GSD 10 cm	C16	0.096	0.96	0.036	0.36
GSD 25 cm	C17	0.167	0.67	0.099	0.4
GSD 10 + 25 cm	C17	0.108	1.08	0.058	0.58

Tabla 5.20. Errores medios cuadráticos (RMSE) para las discrepancias de las coordenadas X, Y, Z de los puntos de chequeo de las configuraciones C9, C8, C14 y C15 de todos los vuelos.

5.6. AUTOCALIBRACIÓN DE LA CÁMARA ASD40 SH52

Con el fin de mejorar tanto la precisión interna como externa del ajuste se autocalibró cada una de las distintas aerotriangulaciones obtenidas para el vuelo bajo, para el vuelo alto y para el vuelo combinado. Si bien, y dado que los vuelos presentan cierto sistematismo en los datos GNSS, que son corregidos con el modelo Drift, nos limitaremos a presentar aquí los análisis correspondientes a estos casos ya que al ser el más favorable podrán indicarnos si la introducción o no de los parámetros internos¹⁴ en el ajuste mejoran la precisión interna y/o externa de este. El resto de los casos son recogidos en el Anexo IV y sus análisis no aportan mayores resultados a los aquí mostrados.

A continuación mostraremos por separado los resultados correspondientes a cada uno de los vuelos analizando la influencia de los parámetros internos. Para ello obtendremos los errores medios cuadráticos de las discrepancias de los puntos de chequeo una vez realizado el ajuste de haces y los compararemos con los obtenidos en su correspondiente aerotriangulación, del mismo modo analizaremos la precisión interna del ajuste (σ_0).

5.6.1. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO BAJO: GSD 10 CM

A continuación mostramos los resultados obtenidos tras la autocalibración, utilizando el modelo Drift, sobre el vuelo bajo de la ciudad de Ávila, vuelo con GSD de 10 cm. Dichos resultados quedan recogidos en la Tabla 5.21.

¹⁴ Los parámetros internos del sensor que entran en el ajuste son: la focal (f), el punto principal (x_p , y_p), el punto de mejor simetría (x_s , y_s) y los coeficientes de la distorsión radial ($e_1 - e_6$).

Autocalibración del vuelo bajo: GSD 10 cm						
		PA/ PCh	Sigma0 [μm]	RMSE _{XY} [m]	RMSE _Z [m]	Conf.
Drift	Sin	4 / 52	---	---	---	C1
	desalineamiento	8 / 52	---	---	---	C2
	Desalineamiento	4 / 52	1.5	0.092	0.043	C3
	por pasada	8 / 52	1.5	0.092	0.051	C4
	Desalineamiento	4 / 52	1.5	0.085	0.045	C5
	por sensor	8 / 52	1.5	0.079	0.048	C6

Tabla 5.21. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo bajo: GSD 10cm.

De acuerdo a estos resultados podemos concluir que al aplicar autocalibración la precisión interna mejora ligeramente. De los resultados de 1.9 μm (Tabla 5.6) al aplicar aerotriangulación, se obtiene 1.5 μm al autocalibrar. El hecho de que el ajuste interno del bloque sea bueno se justifica del mismo modo que para los casos resueltos con aerotriangulación.

En base a la metodología utilizada hasta ahora, analizaremos los errores medios cuadráticos obtenidos para las discrepancias de los puntos de chequeo tanto para la componente planimétrica como para la componente altimétrica. Dichos resultados serán comparados con los obtenidos tras la misma configuración en la aerotriangulación.

Analizaremos previamente el número de puntos de apoyo. En cuanto al uso de 4 o 8 puntos de apoyo no hay diferencias significativas ni para la componente planimétrica, ni para la componente altimétrica (Tabla 5.21).

Para analizar la influencia de los parámetros internos en la precisión externa del ajuste recogeremos los resultados obtenidos para el modelo matemático Drift tras la aerotriangulación y autocalibración en la Tabla 5.22. Cuando resolvemos la autocalibración con el desalineamiento por pasada, que recordemos es la configuración más favorable para resolver el ajuste de haces del vuelo bajo, los resultados no sufren variaciones significativas. En cambio para la autocalibración con el desalineamiento por sensor se consiguen mejoras altimétricas en torno a 2 cm frente a los resultados obtenidos para la misma configuración en aerotriangulación.

Precisión externa planimétrica del vuelo bajo: GSD 10 cm							
		Aerotriangulación			Autocalibración		
Configuración		PA/PCh	RMSE _{XY}	RMSE _Z	RMSE _{XY}	RMSE _Z	Conf.
Drift	Sin desalineamiento	4 / 52	0.148	0.095	---	---	C1
		8 / 52	0.132	0.088	---	---	C2
	Por pasada	4 / 52	0.096	0.036	0.092	0.043	C3
		8 / 52	---	---	0.092	0.051	C4
	Por sensor	4 / 52	0.092	0.066	0.085	0.045	C5
		8 / 52	---	---	0.079	0.048	C6

Tabla 5.22. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo bajo: GSD 10 cm.

En base a estos resultados, podemos concluir que la incorporación al ajuste de los parámetros internos del sensor no mejoran las precisiones externas obtenidas. Esto es debido a que la calibración geométrica inicial del sensor es óptima.

5.6.2. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO ALTO: GSD 25 CM

Del mismo modo que para el vuelo bajo, a continuación mostramos los resultados obtenidos tras la autocalibración, utilizando el modelo Drift, sobre el vuelo alto de la ciudad de Ávila, vuelo con GSD de 25 cm. Dichos resultados quedan recogidos en la Tabla 5.23. En base a los resultados obtenidos, analizaremos la precisión interna y los errores medios cuadráticos para las discrepancias de los puntos de chequeo, tanto para la componente planimétrica como para la componente altimétrica. Estos resultados serán comparados con los obtenidos tras la misma configuración en la aerotriangulación.

Autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm						
		PA/PCh	Sigma0 [μm]	RMSE _{XY} [m]	RMSE _Z [m]	Conf.
Drift	Sin desalineamiento	8 / 50	---	---	---	C1
		24 / 50	---	---	---	C2
	Desalineamiento por pasada	8 / 50	---	---	---	C3
		24 / 50	1.4	0.163	0.103	C4
	Desalineamiento por sensor	8 / 50	1.4	0.165	0.122	C5
		24 / 50	1.4	0.162	0.114	C6

Tabla 5.23. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm.

De acuerdo a estos resultados podemos concluir que al aplicar autocalibración la precisión interna mejora ligeramente. De los resultados de 1.8 μm (Tabla 5.14) al

aplicar aerotriangulación, se obtiene 1.4 μm al autocalibrar. El hecho de que el ajuste interno del bloque sea bueno se justifica del mismo modo que para los casos resueltos con aerotriangulación.

Analizaremos previamente el número de puntos de apoyo. Tomando como referencia las configuraciones C5 y C6, vemos como en cuanto al uso de 8 o 24 puntos de apoyo no hay diferencias significativas ni para la componente planimétrica, ni para la componente altimétrica (Tabla 5.23).

Al igual que se hizo para el vuelo bajo, para analizar la influencia de los parámetros internos en la precisión externa del ajuste recogeremos los resultados obtenidos para el modelo matemático Drift tras la aerotriangulación y autocalibración en la Tabla 5.24. Cuando resolvemos la autocalibración con el desalineamiento por pasada, que recordemos es la configuración más favorable para resolver el ajuste de haces del vuelo alto, los resultados no sufren variaciones significativas (configuración C4 de la Tabla 5.24). Del mismo modo ocurre cuando la autocalibración se realiza con el desalineamiento por sensor, por lo que se puede concluir que la precisión externa del ajuste no mejora al introducir en este los parámetros internos de sensor, lo que vuelve a confirmar que la calibración geométrica inicial del sensor es óptima.

Precisión externa planimétrica del vuelo alto: GSD 25 cm							
Configuración		PA/PCh	Aerotriangulación		Autocalibración		Conf.
			RMSE _{XY}	RMSE _Z	RMSE _{XY}	RMSE _Z	
Drift	Sin desalineamiento	8 / 50	0.173	0.117	---	---	C1
		24 / 50	0.168	0.111	---	---	C2
	Por pasada	8 / 50	0.168	0.103	---	---	C3
		24 / 50	0.167	0.099	0.163	0.103	C4
	Por sensor	8 / 50	0.166	0.117	0.165	0.122	C5
		24 / 50	0.167	0.110	0.162	0.114	C6

Tabla 5.24. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo alto: GSD 25 cm.

5.6.3. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO COMBINADO: GSD 10 CM + GSD 25 CM

Una vez analizadas las autocalibraciones para el vuelo bajo (GSD 10 cm) y el vuelo alto (GSD 25 cm), se procede a autocalibrar conjuntamente los dos vuelos a distinta altura. Los resultados de estas autocalibraciones se recogen en la Tabla 5.25 donde se indican tanto los puntos de apoyo (PA) como los puntos de chequeo (PCh) utilizados para el ajuste, la precisión interna obtenida (σ_0) y la precisión externa para la componente planimétrica ($RMSE_{XY}$) y para la componente altimétrica ($RMSE_Z$) de cada una de las autocalibraciones realizadas con el modelo matemático Drift, ya que es este el modelo matemático más favorable para la resolución del ajuste de haces del vuelo combinado.

Autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm						
		PA/PCh	Sigma0 [μm]	$RMSE_{XY}$ [m]	$RMSE_Z$ [m]	Conf.
Drift	Sin	8 / 52	1.7	0.112	0.062	C1
	desalineamiento	24 / 52	---	---	---	C2
	Desalineamiento	8 / 52	---	---	---	C3
	por pasada	24 / 52	1.7	0.079	0.052	C4
	Desalineamiento	8 / 52	1.7	0.081	0.063	C5
	por sensor	24 / 52	1.7	0.080	0.062	C6

Tabla 5.25. Control de calidad para los casos de autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm.

Al aplicar autocalibración en el vuelo combinado, vuelo a dos alturas, la precisión interna mejora ligeramente. De los resultados de $2.0 \mu\text{m}$ (Tabla 5.18) al aplicar aerotriangulación, se obtiene $1.7 \mu\text{m}$ al autocalibrar. Una vez más se pone de manifiesto el buen comportamiento interno del ajuste.

En cuanto al número de puntos de apoyo utilizados (8 o 24) y basándonos en las configuraciones C5 y C6 (Tabla 5.25) vemos como no hay diferencias significativas ni para la componente planimétrica, ni para la componente altimétrica.

Para analizar la influencia de los parámetros internos en la precisión externa del ajuste recogeremos los resultados obtenidos para el modelo matemático Drift tras la aerotriangulación y autocalibración en la Tabla 5.26.

Precisión externa planimétrica del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm							
		Aerotriangulación			Autocalibración		
Configuración	PA/PCh	RMSE _{XY}	RMSE _Z	RMSE _{XY}	RMSE _Z	Conf.	
Drift	Sin desalineamiento	8 / 50	0.137	0.089	0.112	0.062	C1
		24 / 50	0.131	0.077	---	---	C2
	Por pasada	8 / 50	---	---	---	---	C3
		24 / 50	0.108	0.058	0.079	0.052	C4
	Por sensor	8 / 50	1.102	0.078	0.081	0.063	C5
		24 / 50	---	---	0.080	0.062	C6

Tabla 5.26. Control de calidad para los casos de aerotriangulación/autocalibración del vuelo combinado: GSD 10 cm + GSD 25 cm.

Cuando resolvemos la autocalibración sin introducir en el ajuste el desalineamiento del IMU/Cámara (configuración C1 de la Tabla 5.26), la precisión externa del ajuste mejora tanto en la componente planimétrica como en la altimétrica, sin embargo esta mejora no es suficiente para igualar la precisión conseguida con el cálculo de la calibración del IMU/Cámara por pasada.

Si tomamos la configuración C4 por ser esta la más apropiada para la resolución del vuelo combinado, vemos como al introducir los parámetros internos en el ajuste la componente planimétrica mejora en un factor de 1.4, mientras que la altimétrica se mantiene con el mismo error medio cuadrático.

En base a estos resultados podemos concluir que la incorporación al ajuste de los parámetros internos de sensor mejora, en el caso del vuelo combinado a dos alturas, el error medio cuadrático obtenido para las discrepancias de los puntos de chequeo, mientras que para los vuelos individuales no se observa ninguna mejora.

5.7. ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS INTERNOS DEL SENSOR ADS40 SH52

Los resultados recogidos en este apartado pretenden el estudio y análisis de los parámetros internos del sensor. Para ello son necesarios vuelos configurados según las prescripciones técnicas citadas en el capítulo IV de esta Tesis Doctoral:

- Para el vuelo combinado a distinta altura y en cruz podremos resolver sin puntos de apoyo utilizando el modelo matemático que permite modelizar la excentricidad espacial entre la antena del GNSS y el punto de vista (Ecuación 4.41).
- Para un único vuelo en cruz con puntos de apoyo se realizará una transformación de Helmert 3D de manera que se pueda dar cuenta de posibles discrepancias entre el sistema cartesiano del GNSS y el sistema cartesiano fotogramétrico (Ecuación 4.42).

Por ello, y en base a los datos obtenidos con la ADS40 SH52, se realizan los casos mostrados en la Tabla 5.27.

Configuraciones de las distintas autocalibraciones realizadas con la ADS40 SH52. Vuelo en cruz.				
		GSD 10 cm	GSD 25 cm	GSD 10 + 25 cm
		PA/PCh	PA/PCh	PA/PCh
Basic	Sin desalineamiento	---	---	0/0
Datum	λ , Z_0 bloqueadas	4/0	8/8	8/0
Sin desalineamiento	λ , Z_0 libres	8/0	24/12	---
		4/0	8/8	---
		8/0	24/12	---
Drift	Sin desalineamiento	---	---	8 / 52
	Desalineamiento por pasada	---	---	---
		4/52	---	---
		8/52	---	23 / 52
	Desalineamiento por sensor	---	8/50	8 / 52
		8/52	24/50	23 / 52

Tabla 5.27. Resumen de las distintas autocalibraciones realizadas para el análisis de los parámetros internos del sensor ADS40 SH52.

Donde el valor de λ es el factor de escala y Z_0 es la traslación sobre el eje Z del Helmert 3D o modelo Datum utilizado para la autocalibración (Ecuación 4.42).

A continuación y siguiendo el esquema establecido hasta ahora, mostraremos por separado los resultados correspondientes a cada uno de los vuelos analizando los resultados obtenidos para: la focal (f), el punto principal (x_p , y_p), los coeficientes (e_1 - e_6) de la distorsión radial y las correlaciones existentes (en caso de haberlas) entre dichos parámetros, así como los valores obtenidos para la orientación

externa.

Dado que el punto de mejor simetría es solamente utilizado en calibraciones iniciales ya que para iteraciones adicionales y/o autocalibraciones las distorsiones restantes son normalmente tan pequeñas que no permiten una estimación apropiada del punto ¹⁵, no recalcularemos este parámetro en nuestras calibraciones en cruz (Tempelmann y Hinsken, 2007).

En cuanto a los coeficientes de la distorsión radial (Anexo IV) no se observan diferencias significativas al realizar la autocalibración a través de una u otra configuración, y los valores obtenidos para cada coeficiente son tan pequeños que al igual que ocurre con el punto de mejor simetría, las desviaciones estándar a posteriori que arrojan cada uno de los coeficientes son del orden del propio valor estimado.

5.7.1. PARÁMETROS INTERNOS. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO BAJO: GSD 10 CM

A continuación mostramos los resultados obtenidos tras la autocalibración, utilizando el modelo Datum, sobre el vuelo bajo de la ciudad de Ávila, vuelo con GSD de 10 cm. Dichos resultados quedan recogidos en la Tabla 5.28.

¹⁵ En el Anexo IV puede verse los valores obtenidos para el punto de mejor simetría cuando este es recalculado en la autocalibración de cada uno de los vuelos.

Autocalibración de vuelo bajo en cruz: GSD de 10 cm					
Configuración		PA	Sigma0[μm]	f [mm]	(x_p, y_p) [μm]
Datum	λ, Z_0 bloqueadas	4	1.1	62.690	(-0.10,-0.19)
		8	1.1	62.693	(-0.10,-0.18)
	λ, Z_0 libres	4	1.1	62.654	(-0.10,-0.24)
		8	1.1	62.653	(-0.10,-0.23)

Tabla 5.28. Valores para la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo bajo.

En base a estos resultados, se obtienen diferencias entre las discrepancias obtenidas para los parámetros internos entre las dos primeras configuraciones y las dos últimas, 40 μm para la focal y 60 μm para la coordenada y del punto principal, y_p . Recordemos que λ es el factor de escala y Z_0 es la traslación sobre el eje Z del Helmert 3D del modelo matemático implementado (Datum). El hecho de que dichos parámetros queden “bloqueados” en el ajuste significa que no existe diferencia de escala (λ) ni traslación (Z_0) sobre el eje Z entre el sistema cartesiano del GNSS y el de la cámara. El valor para la focal recogido en el certificado de calibración es 62.70 mm, por lo que las variaciones obtenidas para este parámetro son mayores en los casos resueltos con λ (factor de escala) y Z_0 (traslación sobre el eje Z) libres. En la Tabla 5.29 se muestran las desviaciones a posteriori obtenidas en cada uno de los casos, tanto para la focal como para el punto principal.

Desviaciones a Posteriori para la focal y punto principal. Vuelo bajo.				
Configuración		PA	f [μm]	(x_p, y_p) [μm]
Datum	λ, Z_0 bloqueadas	4	2.39	(0.14; 0.10)
		8	1.44	(0.14; 0.09)
	λ, Z_0 libres	4	6.03	(0.14; 0.10)
		8	5.99	(0.14; 0.09)

Tabla 5.29. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo bajo.

En dicha tabla (Tabla 5.29), se observa como en los casos resueltos con λ y Z_0 “libres” se obtienen desviaciones a posteriori más elevadas para la focal, sin embargo es en estos casos donde se obtienen residuos más elevados (un residuo de 45 micras para el caso con λ y Z_0 “libres” donde su desviación es de 6 micras). En cambio para el punto principal apenas se observan diferencias en cada uno de

los casos, siendo la desviación a posteriori obtenida para la coordenada X del punto principal mayor a su valor estimado (el valor inicial del punto principal es de (0, 0)).

En la Tabla 5.30 se muestran las correlaciones de estos parámetros con los valores de la orientación externa. Como se puede observar para reducir la correlación entre Z'_s y la focal (f), es necesario bloquear los parámetros λ y Z_0 . Sin embargo dicha correlación no llega a anularse y aumenta entre las coordenadas planimétricas de la orientación externa y la focal. Por otro lado, el punto principal no presenta correlaciones con ninguno de los parámetros de la orientación externa.

Correlaciones entre parámetros en el vuelo bajo en cruz: GSD de 10 cm												
	λ, Z_0 bloqueadas						λ, Z_0 libres					
	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s
f [mm]	0.48	0.04	0.50	0.41	0.41	0.01	0.02	0.01	0.87	0.02	0.02	0.00
x_p [μm]	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00
y_p [μm]	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.06	0.01	0.01	0.06	0.03	0.00	0.03

Tabla 5.30. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo bajo.

Dicho análisis muestra que el vuelo bajo con sus correspondientes pasadas en cruz no es suficiente para anular las correlaciones expresadas en la Tabla 5.30, concretamente la correlación entre la focal y la coordenada altimétrica de la orientación externa.

Debemos tener presente que cada vez que se realiza una autocalibración las fotocoordenadas de cada uno de los CCD son recalculadas, dichos valores han sido comparados con los valores dados por el fabricante obteniendo valores muy pequeños, lo que pone de manifiesto la buena calibración inicial de la que se disponía (Tabla 5.31).

Discrepancias de las fotocoordenadas autocalibradas con las originales [μm]						
GSD 10 cm	PANF27		PANN02		PANB14	
	x'	y'	x'	y'	x'	y'
Discrepancias max.	2.08	4.09	1.82	2.16	-0.11	3.35
Discrepancias min.	0.24	-3.48	1.69	-2.14	-1.51	-1.01

Tabla 5.31. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de la autocalibración. Caso resuelto con 8 puntos de apoyo, bloqueando λ y Z_0 para el vuelo bajo. PANF27: sensor pancromático hacia delante; PANN02: sensor pancromático nadiral; PANB14: sensor pancromático hacia atrás. Unidades en micras.

5.7.2. PARÁMETROS INTERNOS. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO ALTO: GSD 25 CM

A continuación mostramos los resultados obtenidos tras la autocalibración, utilizando el modelo Datum, sobre el vuelo alto de la ciudad de Ávila, vuelo con GSD de 25 cm. Dichos resultados quedan recogidos en la Tabla 5.30 donde λ es el factor de escala y Z_0 es la traslación sobre el eje Z del Helmert 3D del modelo matemático implementado (Datum).

Autocalibración de vuelo alto en cruz: GSD de 25 cm					
Configuración		PA	Sigma0 [μm]	f [mm]	(x_p, y_p) [μm]
Datum	λ, Z_0	4	1.0	62.698	(-0.06, 0.12)
	bloqueadas	8	1.0	62.697	(-0.06, 0.11)
	λ, Z_0 libres	4	1.0	62.684	(-0.07, 0.10)
		8	1.0	62.684	(-0.07, 0.11)

Tabla 5.32. Valores para la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo alto.

Como podemos ver en la Tabla 5.32 el valor para la focal se mantiene en torno a los 62.70 mm presentados en el certificado de calibración por lo que las variaciones obtenidas para este parámetro son del orden de micras, apenas 6 micras en el peor de los casos. Además las discrepancias obtenidas en cada una de las configuraciones para el punto principal son muy pequeñas (en torno a 10 micras frente a las 60 micras de diferencia obtenidas para el vuelo bajo). El hecho de que dichos parámetros queden “bloqueados” en el ajuste significa que no existe diferencia de escala (λ) ni traslación (Z_0) sobre el eje Z entre el sistema cartesiano del GNSS y el de la cámara. En la Tabla 5.33 se muestran las desviaciones a posteriori obtenidas en cada uno de los casos, tanto para la focal

como para el punto principal.

Desviaciones a Posteriori para la focal y punto principal. Vuelo alto.				
Configuración		PA	f [μm]	(x_p, y_p) [μm]
Datum	λ, Z_0	4	0.82	(0.13; 0.09)
	bloqueadas	8	0.58	(0.14; 0.09)
	λ, Z_0 libres	4	5.56	(0.13; 0.09)
		8	5.56	(0.14; 0.09)

Tabla 5.33. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo alto.

En dicha tabla (Tabla 5.33) se observa como en los casos resueltos con λ y Z_0 “libres” se obtienen desviaciones a posteriori más elevadas para la focal, sin embargo, y del mismo modo que ocurría para el vuelo bajo, en estos casos es donde se obtiene un residuo mayor para la determinación de la focal. Por ejemplo, para el caso con 4 puntos de apoyo donde quedan “libres” en el ajuste los parámetros λ y Z_0 se obtiene un residuo para la focal de 15.91 micras y su desviación a posteriori es de 5.56 micras. En cambio para el punto principal apenas se observan diferencias en cada uno de los casos, siendo la desviación a posteriori obtenida para la coordenada X del punto principal mayor a su valor estimado.

En la Tabla 5.34 se muestran las correlaciones de los parámetros internos con los valores de la orientación externa. Como se puede observar para reducir la correlación entre Z'_s y la focal (f), es necesario bloquear los parámetros λ y Z_0 . Sin embargo dicha correlación no llega a anularse totalmente aunque disminuye de manera más notable que en el vuelo bajo. Por otro lado, aumenta ligeramente la correlación entre las coordenadas planimétricas de la orientación externa y la focal. Por otro lado, el punto principal no presenta correlaciones con ninguno de los parámetros de la orientación externa.

Correlaciones entre parámetros en el vuelo alto en cruz: GSD de 25 cm												
	λ, Z_0 bloqueadas						λ, Z_0 libres					
	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s
f [mm]	0.16	0.08	0.16	0.14	0.14	0.01	0.02	0.00	0.95	0.02	0.03	0.01
x_p [μm]	0.01	0.01	0.01	0.00	0.5	0.00	0.01	0.01	0.02	0.00	0.05	0.00
y_p [μm]	0.01	0.02	0.01	0.04	0.01	0.06	0.01	0.01	0.07	0.04	0.00	0.04

Tabla 5.34. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo alto.

Por tanto, dicho análisis muestra que el vuelo alto con sus correspondientes pasadas en cruz anula las correlaciones existentes entre la coordenada altimétrica de la orientación externa y la focal (Tabla 5.34) cuando consideramos que no existe diferencia de escala (λ) ni traslación (Z_0) sobre el eje Z entre el sistema cartesiano del GNSS y el de la cámara.

Del mismo modo que para el vuelo bajo, al realizar la autocalibración las fotocoordenadas de cada uno de los CCD son recalculadas, dichos valores han sido comparados con los valores dados por el fabricante, obteniendo valores muy pequeños, lo que certifica la buena calibración inicial del sensor (Tabla 5.35).

Discrepancias de las fotocoordenadas autocalibradas con las originales [μm]						
GSD 25 cm	PANF27		PANN02		PANB14	
	x'	y'	x'	y'	x'	y'
Discrepancias max.	1.72	3.51	1.79	0.77	0.23	2.20
Discrepancias min.	-0.48	-3.40	1.71	-1.30	-1.01	-0.23

Tabla 5.35. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de ser autocalibradas. Caso resuelto con 8 puntos de apoyo, bloqueando λ y Z_0 para el vuelo alto. PANF27: sensor pancromático hacia delante; PANN02: sensor pancromático nadiral; PANB14: sensor pancromático hacia atrás. Unidades en micras.

Comparando las discrepancias obtenidas para las fotocoordenadas en el vuelo alto con las obtenidas en el vuelo bajo, vemos como estas son prácticamente iguales para cada una de las fotocoordenadas a excepción de la fotocoordenada y' del sensor nadiral, que presenta discrepancias ligeramente mayores en el vuelo bajo (Tabla 5.31). Las mayores discrepancias son encontradas en el sensor pancromático hacia delante, concretamente en la fotocoordenada y' , donde llegan a discrepar en magnitudes del orden de 0.5 veces el tamaño del píxel.

5.7.3. PARÁMETROS INTERNOS. AUTOCALIBRACIÓN DEL VUELO COMBINADO: GSD 10 CM + GSD 25 CM

Una vez analizados los parámetros internos del sensor ADS40 SH52 tras las autocalibraciones para el vuelo bajo (GSD 10 cm) y el vuelo alto (GSD 25 cm), se procede a analizar dichos resultados en la autocalibración del vuelo combinado. Dado que este vuelo dispone de dos alturas y pasadas en cruz podremos resolverlo sin puntos de apoyo y utilizando el modelo matemático que permite únicamente modelizar la excentricidad espacial entre la antena del GNSS y la cámara. Los resultados de la focal y del punto principal son recogidos en la Tabla 5.36 donde se indica la precisión interna obtenida (σ_0) en el ajuste.

Autocalibración de vuelo combinado en cruz: GSD 10 cm + 25 cm				
Configuración	PA	Sigma0[μm]	f [mm]	(x_p, y_p) [μm]
Basic	0	1.3	62.696	(-0.04,-0.03)
Datum: λ, Z_0	4	---	---	---
	8	1.3	62.696	(-0.08,-0.02)

Tabla 5.36. Valores para la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo combinado.

Tal y como se observa en la Tabla 5.36 las discrepancias obtenidas para los parámetros internos de una configuración a otra son muy pequeñas. Además el valor para la focal se mantiene en torno a los 62.70 mm presentados en el certificado de calibración. Del mismo modo ocurre con las coordenadas del punto principal. En la Tabla 5.37 se muestran las desviaciones a posteriori obtenidas en cada uno de los casos, tanto para la focal como para el punto principal.

Desviaciones a Posteriori para la focal y punto principal. Vuelo combinado			
Configuración	PA	f [μm]	(x_p, y_p) [μm]
Basic	0	0.29	(0.11; 0.08)
Datum: λ, Z_0	4	---	---
	8	0.28	(0.11; 0.07)

Tabla 5.37. Desviaciones a posteriori para los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo combinado.

En dicha tabla (Tabla 5.37) se observa como en ambos casos las desviaciones obtenidas tanto para la focal como para las coordenadas del punto principal son similares. Dado que los valores obtenidos en cada caso (Tabla 5.36) también son similares, podremos decir que para el vuelo combinado ambas combinaciones se comportan de manera similar. Las coordenadas del punto principal siguen estimándose mal debido a que las desviaciones a posteriori obtenidas para cada una de sus coordenadas son mayores al propio valor calculado.

En la Tabla 5.38 se muestran las correlaciones de los parámetros internos con los valores de la orientación externa para cada una de las configuraciones resueltas en la Tabla 5.36.

Correlaciones entre parámetros en el vuelo combinado en cruz: GSD de 10 cm + 25 cm												
	Datum: λ, Z_0 bloqueadas						Basic					
	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s	X'_s	Y'_s	Z'_s	ω'_s	φ'_s	χ'_s
f [mm]	0.01	0.01	0.08	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.10	0.01	0.03	0.01
x_p [μm]	0.02	0.02	0.00	0.00	0.03	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.04	0.00
y_p [μm]	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03	0.03	0.03	0.00	0.04	0.00	0.03

Tabla 5.38. Correlaciones entre los valores de la focal (f) y el punto principal (x_p, y_p) en la autocalibración del vuelo en cruz combinado.

Dichos resultados (Tabla 5.38) muestran que el vuelo a dos alturas elimina la correlación existente entre la focal y la componente altimétrica de la orientación externa, sin la necesidad de puntos de apoyo y utilizando para su resolución el modelo matemático más simple.

Por último, y siguiendo la metodología utilizada hasta ahora, mostraremos las discrepancias de las fotocoordenadas calculadas tras la autocalibración del vuelo combinado con los valores iniciales de fotocoordenadas dados por el fabricante. Dichas discrepancias se muestran en la Tabla 5.39.

Discrepancias de las fotocoordenadas autocalibradas con las originales [μm]						
GSD 10 + 25 cm	PANF27		PANN02		PANB14	
	x'	y'	x'	y'	x'	y'
Discrepancias max.	1.23	3.01	1.66	1.01	0.31	2.11
Discrepancias min.	-0.92	-2.78	1.54	-1.16	-0.92	0.26

Tabla 5.39. Discrepancias de las fotocoordenadas antes y después de ser autocalibradas. Caso resuelto con el modelo Basic para el vuelo combinado. PANF27: sensor pancromático hacia delante; PANN02: sensor pancromático nadiral; PANB14: sensor pancromático hacia atrás.

Las discrepancias obtenidas para las fotocoordenadas autocalibradas en el vuelo combinado son prácticamente iguales que las obtenidas para los vuelos individuales. En cualquiera de los casos (vuelo bajo, alto o combinado), las mayores discrepancias son encontradas en la fotocoordenada y' del sensor pancromático hacia delante, donde llegan a discrepar en magnitudes del orden de 0.5 veces el tamaño del píxel. Dado que estas discrepancias muestran valores tan pequeños no se ha derivado ninguna conclusión significativa, si bien, estos resultados garantizan la estabilidad geométrica de la cámara.

Como ejemplo y en la Figura 5.32, mostramos las diferencias entre las fotocoordenadas x' de cada uno de los píxeles que conforman el CCD pancromático de la vista hacia atrás (PANB14), antes y después de la autocalibración del vuelo a dos alturas utilizando el modelo matemático Basic.

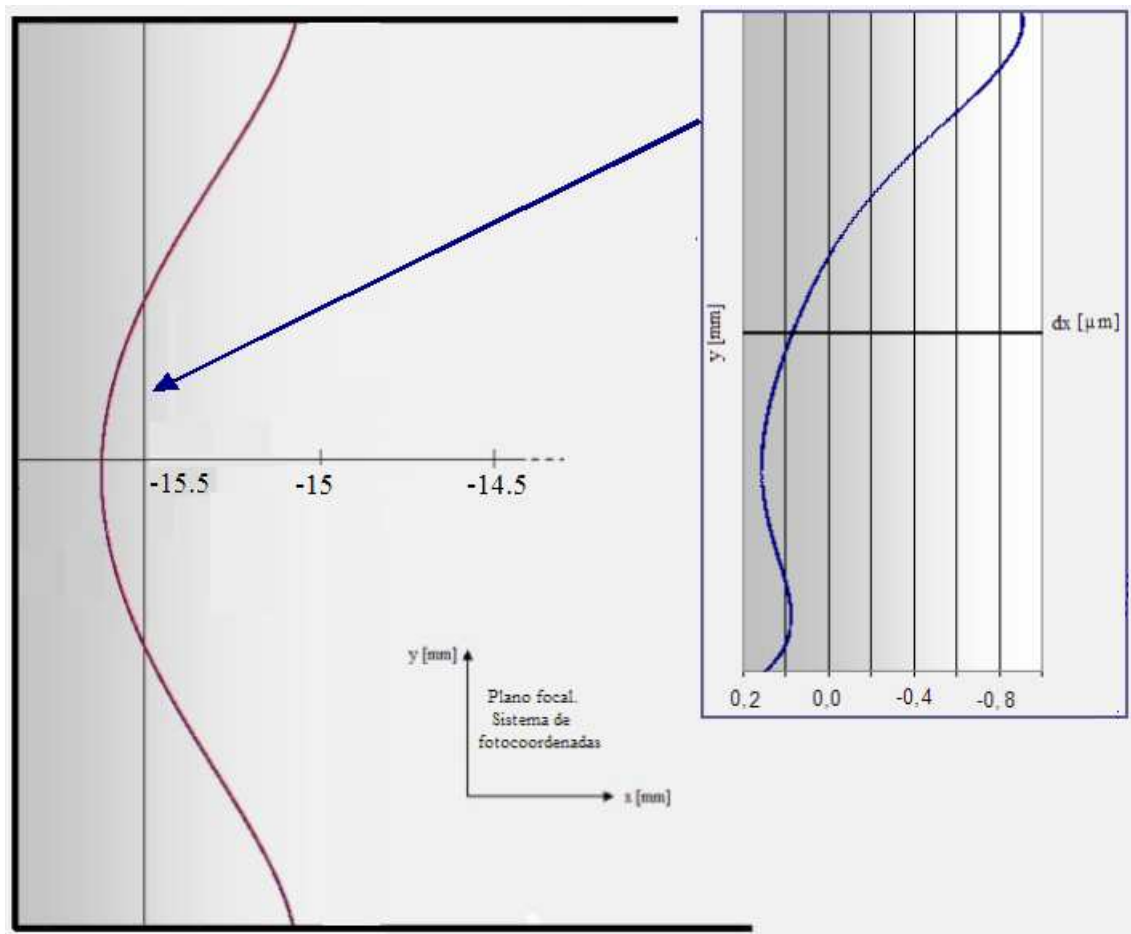


Fig. 5.32. Diferencias entre las fotocoordenadas del CCD pancromático hacia atrás (PANB14), antes y después de la autocalibración sobre el vuelo a dos alturas.

A la izquierda de la Figura 5.32 se muestra la disposición de las fotocoordenadas antes y después de la autocalibración del sensor pancromático de la vista hacia atrás del sensor SH52 sobre el plano focal. Debido a que las diferencias entre ambas fotocoordenadas son muy pequeñas se hace preciso aumentar la escala de dicho gráfico o bien representar sobre el eje X las discrepancias entre ambas fotocoordenadas y en el eje Y la fotocoordenada Y (a la derecha de la Figura 5.32). De esta manera se observa como las discrepancias se encuentran entre $0.3 \mu\text{m}$ y $0.9 \mu\text{m}$ tal y como se recogía en la Tabla 5.39.

5.8. SINTESIS DE LOS RESULTADOS EXPERIMENTALES Y DEL CONTROL DE CALIDAD

La siguiente tabla (Tabla 5.39) muestra los mejores resultados obtenidos para cada uno de los vuelos tanto en los procesos de aerotriangulación como en los procesos de autocalibración:

Precisión externa en los procesos de aerotriangulación de los vuelos ADS40 SH52 [m]					
	Configuración	RMSE _{XY}	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z	RMSE _Z /GSD
GSD 10 cm	C16	0.096	0.96	0.036	0.36
GSD 25 cm	C17	0.167	0.67	0.099	0.40
GSD 10 + 25 cm	C17	0.108	1.08	0.058	0.58
Precisión externa en los procesos de autocalibración de los vuelos ADS40 SH52 [m]					
	Configuración	RMSE _{XY}	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z	RMSE _Z /GSD
GSD 10 cm	C5	0.085	0.85	0.045	0.45
GSD 25 cm	C4	0.163	0.65	0.103	0.41
GSD 10 + 25 cm	C4	0.079	0.79	0.052	0.52

Tabla 5.40. Síntesis de los resultados experimentales en los vuelos realizados sobre Ávila.

En base a estos resultados (Tabla 5.40), y en líneas generales, se puede concluir que el hecho de introducir los parámetros internos del sensor ADS40 SH52 en los procesos de aerotriangulación, no aporta mejoras significativas en la precisión externa del ajuste. Es decir, no se tienen suficientes argumentos para poder rechazar la calidad de la calibración inicial.

En los procesos de autocalibración del vuelo bajo, aunque se consiguen mejoras planimétricas, la altimetría obtiene peores resultados. En cambio en el vuelo alto, los resultados se mantienen en ambas componentes (Tabla 5.40). En cualquiera de los casos, se obtienen mejores precisiones altimétricas.

Promediando los valores mostrados en la Tabla 5.40, se obtiene un valor para la precisión externa altimétrica de 0.45 el GSD, y de 0.83 el GSD para la componente planimétrica. Por otro lado, se observa que a mayor altura de vuelo, se obtienen mejores resultados planimétricos, pasando de 0.85 el GSD en el vuelo con GSD de 10 cm a 0.65 el GSD en el vuelo con GSD de 25 cm.

En base a estos resultados, el siguiente capítulo detallará todas las conclusiones derivadas del estudio y análisis geométrico de la cámara barredora ADS40 en los procesos fotogramétricos.

**6 CAPÍTULO VI - CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS
FUTURAS**

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y PERSPECTIVAS FUTURAS

6.1. CONCLUSIONES

6.1.1. APORTACIONES DE LA TESIS DOCTORAL

En esta Tesis Doctoral se describen tanto los sistemas de coordenadas involucrados en el procesamiento de las imágenes de la cámara de barrido ADS40, como los modelos matemáticos del sensor empleados para acometer los procesos de aerotriangulación y autocalibración, estableciendo una metodología de actuación a fin de obtener una mejora en los tiempos y costes de producción. En base a esta metodología, y a través del empleo de técnicas estadísticas, se determina el grado de precisión interna y precisión externa (exactitud) obtenido en función de los datos de entrada, lo que permitirá en trabajos posteriores determinar el mejor modelo para la resolución de los datos provenientes de la cámara aérea de barrido ADS40, además de permitir una mejor elección en los datos de entrada en función de la precisión exigida.

Por otro lado, el proceso de autocalibración pasa a ser fundamental solo en los casos en los que la calibración ha sido realizada con anterioridad a dos años a la fecha de vuelo, a fin de controlar la precisión de los datos ya que como se ha visto en el capítulo V de esta Tesis Doctoral, la inestabilidad de algunos de los parámetros internos de la cámara no influyen en la precisión externa de los datos y las discrepancias en las fotocoordenadas son muy pequeñas (del orden de 0.5 veces el tamaño del píxel), lo que pone de manifiesto la buena estabilidad geométrica de la cámara. No obstante, la calibración del desalineamiento

IMU/Cámara (boresight) se convierte en un paso fundamental del procesamiento de los datos de la cámara ADS40. Para poder obtener los datos de la Orientación Externa con la precisión requerida se hace imprescindible conocer los movimientos del sensor con respecto al IMU con el paso del tiempo, conociendo estos movimientos para cada una de las pasadas que conforman el vuelo.

A continuación se mencionarán las conclusiones más relevantes de los resultados obtenidos en el capítulo V de esta Tesis Doctoral.

6.1.2. CONCLUSIONES DE LA TESIS DOCTORAL

- Cuando aerotriangulamos sobre la imagen L1 se produce una disminución de los puntos de paso y las mediciones realizadas sobre ella muestran una pérdida en la precisión externa debido a un deterioro asociado al proceso de remuestreo, por lo que se aconseja acometer todo el proceso de aerotriangulación y autocalibración sobre las imágenes L0.
- Debido a los resultados obtenidos tras el control de calidad de las aerotriangulaciones de la ADS40, se puede decir que el triple sensor pancromático de la ADS40 garantiza una robusta determinación altimétrica. Las discrepancias entre los valores observados (GNSS/IMU) y los valores calculados de los elementos de la Orientación Externa responden de forma bastante ajustada a lo que predice la teoría: las discrepancias en ω y φ son inferiores a las discrepancias en χ , así como las discrepancias en Z son inferiores a las discrepancias en X e Y . Promediando los valores mostrados en la Tabla 5.40, se obtienen valores altimétricos 1.8 veces mejor que los resultados planimétricos.
- La calibración del desalineamiento IMU/Cámara juega un papel fundamental en la aerotriangulación de los datos de la ADS40. Los movimientos del IMU con respecto a la cámara con el paso del tiempo deben ser conocidos con la suficiente precisión para obtener los mejores

resultados en la aerotriangulación. Al calibrar el desalineamiento IMU/Cámara por pasada se consiguen mejores resultados para los valores angulares ω y φ para cada una de las pasadas, lo que se traduce en una mejora altimétrica de las discrepancias obtenidas en los puntos de chequeo. Por ejemplo, y para el vuelo bajo, se pasa de precisiones externas altimétricas de 0.066 m para los casos resueltos con el desalineamiento por sensor a 0.036 m en los casos resueltos con el desalineamiento por pasada.

- La precisión interna del ajuste (σ_0) se mantiene invariable según la configuración empleada para la resolución de la aerotriangulación obteniendo 0.3 veces el tamaño del píxel, por lo que pone de manifiesto que internamente el ajuste se comporta bien ya que el número de puntos de paso es elevado, está homogéneamente distribuido y las desviaciones obtenidas en sus coordenadas tras el ajuste son pequeñas.
- Debido al error sistemático que presenta la componente planimétrica de las observaciones GNSS asociado a las imprecisiones de su cómputo, se hace necesario resolver el ajuste de haces a través de un modelo matemático que solventa tanto la deriva como el desplazamiento asociado a los datos GNSS. Estos errores se reflejan en los errores medios cuadráticos asociados a las discrepancias de los puntos fijos tras el ajuste, aunque no se propagan a los puntos de chequeo por lo que la precisión externa del ajuste no se ve afectada.
- Al pasar del vuelo bajo al vuelo alto las discrepancias en los puntos de chequeo disminuyen para la componente planimétrica (1.3 veces), mientras que la altimetría empeora ligeramente. Es decir, a mayor altura de vuelo, mejor precisión externa planimétrica en el ajuste del bloque. En términos medios se obtienen precisiones de 0.82 veces el tamaño del GSD para la componente planimétrica y 0.38 veces el GSD para la componente

altimétrica (Tabla 6.1).

	Aerotriangulación		Autocalibración ¹⁶	
	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD	RMSE _{XY} /GSD	RMSE _Z /GSD
1ª Generación (ADS40)	0.91	0.53	0.20	0.27
2ª Generación (ADS40)	0.89	0.66	---	---
3ª Generación (ADS80)	0.54	0.60	---	---
2ª Generación (ADS40_Avila)	0.82	0.38	0.79	0.42

Tabla 6.1. Síntesis de las precisiones externas en procesos de aerotriangulación y autocalibración para las cámaras de barrido de Leica Geosystems hasta la fecha (2012) y los valores promedios obtenidos en el estudio experimental de esta Tesis Doctoral (ADS40_Avila).

- A la vista de los resultados recogidos en la Tabla 6.1, este estudio experimental refuerza los valores obtenidos para la precisión externa en los procesos de aerotriangulación de la cámara barredora ADS40 SH5x (segunda generación). En cuanto a la componente planimétrica, se obtienen precisiones externas de 0.82 veces el GSD, mientras que en los estudios previos se promedia un valor de 0.89 veces el GSD. Para la componente altimétrica se obtienen mejores resultados en los vuelos experimentales de esta Tesis Doctoral. Según la síntesis mostrada en la Tabla 6.1 se obtienen precisiones externas altimétricas de 0.38 veces el GSD frente a 0.66 veces el GSD en los estudios previos. Con estos resultados no se obtienen suficientes argumentos como para rechazar la calidad de la calibración inicial del sensor, ya que al aplicar autocalibración, los resultados varían ligeramente sin obtener las mejoras

¹⁶ En cuanto a los procesos de autocalibración se han determinado los valores promedios obtenidos para la primera generación, pero para las generaciones sucesivas dado que las mejoras obtenidas varían de un caso a otro en función de la configuración y calibración inicial del vuelo no se han determinado estos valores promedios. Si bien, en la mayoría de los casos se obtiene una mejora en las precisiones externas para la componente planimétrica, siendo esta mejora menos significativa para la altimétrica.

que otros autores citan.

- En líneas generales los residuos en X son menores que los residuos en Y debido a la mala determinación del ángulo χ que afecta sobre todo a esta última coordenada debido a que la mayoría de las pasadas del bloque son obtenidas en sentido este-oeste (E-W).
- El vuelo combinado hereda los errores sistemáticos asociados al cómputo del GNSS de cada uno de los vuelos, por lo que la resolución del ajuste de haces debe realizarse con la misma configuración con la que se resuelven los vuelos individuales. Los errores medios cuadráticos en la precisión externa son menores para la componente altimétrica que para la planimétrica siendo ambos menores al tamaño del GSD mínimo que conforma el vuelo.
- Apenas se detectan discrepancias de carácter general al emplear 4, 8 o 24 puntos de apoyo ya que la influencia en el ajuste de dichos puntos no suele ser significativa. Sin embargo, un mínimo de cuatro puntos de apoyo son fundamentales para determinar las discrepancias entre el sistema de la cámara y el sistema objeto (sistema terreno), que deberán situarse lo más próximos a las esquinas del bloque. El resto de puntos podrán ser utilizados como chequeo para el control externo de la aerotriangulación.
- En base a los resultados de la autocalibración podemos concluir que la incorporación al ajuste de los parámetros internos de sensor mejora, en el caso del vuelo combinado a dos alturas, el error medio cuadrático obtenido para las discrepancias de los puntos de chequeo para la componente planimétrica (mejora en un factor de 1.4), mientras que para los vuelos individuales no se observa mejoras significativas. En cuanto a la componente altimétrica tampoco se observan cambios significativos.

- Leica propone en el modelo matemático de modelización de la distorsión radial el empleo del punto principal y el empleo del punto de mejor simetría. Sin embargo, el cálculo de ambos puntos nos ha llevado una y otra vez, bajo todas las configuraciones de autocalibración, a valores completamente absurdos para dichos parámetros internos del sensor. La mala determinación del punto de mejor simetría es debido a que las distorsiones restantes para su valor calculado son tan pequeñas que no permiten una estimación apropiada del mismo. Por otro lado, para el punto principal, se obtienen desviaciones estándar a posteriori mayores a los valores calculados. Del mismo modo ocurre con los parámetros de distorsión radial (e_1 - e_6). Sin embargo, estos valores erróneamente estimados no conducen a cambios significativos en los puntos de chequeo.
- En cuanto a la alta correlación que se establece entre la focal, f , y la altura del punto de vista, Z'_S , (valores de correlación en torno a 0.99), la única manera de reducirla es mediante el empleo de los dos vuelos a distinta altura o resolviendo el vuelo alto con el modelo matemático que modela las discrepancias entre el sistema de la cámara y el sistema objeto (sistema terreno) cuando consideramos que no existe diferencia de escala (λ) ni traslación (Z_0) sobre el eje Z entre ambos sistemas cartesianos. Aún así, las correlaciones existentes en el vuelo bajo no tienen consecuencia sobre las discrepancias detectadas en los puntos de chequeo por lo que pone de manifiesto una robusta configuración del bloque.
- Tras la autocalibración el valor para la focal se mantiene en torno a los 62.69 mm frente a los 62.77 mm presentados en el certificado de calibración y las variaciones en el punto principal obtenidas tras la autocalibración son del orden de micras, -0.10 μm para la coordenada x y -0.24 μm para la coordenada y , en el peor de los casos (Tabla 5.30). La comprobación de los resultados de autocalibración en las fotocoordenadas, junto con los valores obtenidos para la focal y punto principal, ponen de

manifiesto la buena calibración inicial de la que se disponía ya que las discrepancias obtenidas con respecto a los valores de calibración inicial son muy pequeñas.

- Tanto en los ficheros recibidos por parte del fabricante, como en los ficheros obtenidos tras la autocalibración permiten concluir que sobre las fotocoordenadas está influyendo una tendencia sistemática junto con una clara manifestación de la distorsión radial. Es decir, las discrepancias obtenidas entre la posición teórica de cada uno de los píxeles con la posición registrada en el fichero de calibración es la suma de dos correcciones: una debida a la distorsión radial y otra debida a la traslación y rotación de cada línea CCD sobre el plano focal.

6.2. PERSPECTIVAS FUTURAS

Las líneas de trabajo que surgen como continuación de la labor teórica y empírica de esta Tesis Doctoral son las que a continuación se proponen:

- En el campo de la calibración de cámaras, aún queda por abordar la calibración radiométrica del sensor, así como desarrollar un protocolo de actuación para la autocalibración in situ especificando el periodo de validez de los datos.
- Debido a la falta de vuelos de calibración/autocalibración con la ADS80 (tercera generación), actualmente no se han realizado estudios sobre los ficheros de calibración de esta cámara para discutir las precisiones obtenidas en función de la introducción o no de los parámetros internos en el ajuste.
- Diagnosticar y validar la exactitud en los productos cartográficos derivados (MDT y ortofoto), en base a las exactitudes obtenidas en los procesos de aerotriangulación, dado que en la actualidad estos productos

presentan una gran utilidad y demanda. En base a esto, desarrollar y adaptar las especificaciones técnicas del PNOA orientandolas a los sensores lineales, ya que actualmente centran su estudio en cámaras matriciales.

7 BIBLIOGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

ADS Info kit, 2007 y 2009. Leica Geosystems.

Aksakal-Kocaman, S., 2008. Sensor Modeling and Validation for Linear Array Aerial and Satellite Imagery. Ph.D. Thesis. ETH Zurich. Institute of Geodesy and Photogrammetry, Zurich, Switzerland (also published by IGP, ETH Zurich). 166 p.

Arias, B., 2008. Análisis de la incorporación de las cámaras digitales de gran formato en el proceso fotogramétrico. Ph. D. Thesis. Universidad de Salamanca. Departamento de Ingeniería Cartográfica y del Terreno, Ávila, España. 363 p.

Arthur, R., 2010. New Generation of Airborne Imaging & Lidar Sensors. In: 16th Conference on Geomatics in support of CAP. JRC. Bergamo. 23 p.

Atkinson, K. B., 1996. Close range photogrammetry and machine vision. Whittles Publishing, Caithness, Scotland. 371 p.

Bachofen, D., Kirchhofer, W., Saks, T., Steinmann, P., 2008. New developments on Pushbroom Sensors. In: ISPRS Congress, Commission I/4, Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems. Beijing, China. pp. 687-686.

Becker, S., Haala, N., Reulke, R., 2005. Determination and improvement of spatial for digital aerial images. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. Vol. 33: 45-52.

Beisl, U., 2006. Absolute spectroradiometric calibration of the ADS40 sensor. In: ISPRS Congress, Commission I, Part 1, From Sensors to Imagery. Paris, Francia, 5 p.

Beisl, U., Woodhouse, N., Lu, S., 2006. Radiometric processing scheme for multispectral ADS40 data for mapping purposes. In: Annual Conf. ASPRS, Reno, USA. 9 p.

Beisl, U., Telaar, J., and Schönermark, M.v., 2008. Atmospheric correction, reflectance calibration and BRDF correction for ADS40 image data. In: ISPRS Congress, Commission VII, Fundamental Physics and Modeling. Beijing, China. pp. 7-12.

Berggren, C., 2010. Map Accuracy Report. Burlington, Iowa. Imagery Collected by Aerial Services using the Leica ADS80/SH82 Camera System.

Bernard, M., 2001. Hacia un sistema mundial de producción automática de ortoimágenes. In: GSDI 5, Global Spatial Data Infrastructure Association. Cartagena, Colombia. 6 p.

Boerner, A., Reulke, R., Scheele, M., Terzibaschian, Th., 1997. Stereo Processing of Image Data from an Airborne Three-Line CCD Scanner. In: The 3rd International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. Copenhagen, Denmark.

Brown, D., 1971. Close-Range Camera Calibration, *Photogrammetric Engineering* 37 (8): 855-866.

Bühler, Y., Kneubüler, M., Bovet, S., Kellenberger, T., 2007. Anwendung von ADS40 Daten im Agrarbereich. In: Seyfert, E. DGPF Tagungsband: Dreilandertagung SGPBF, DGPF und OVG. Oldenburg. pp. 381-390.

Caron, F., Duflos, E., Pomorski, D., Vanheeghe, P., 2006. GPS/IMU Data Fusion using Multisensor Kalman Filtering: Introduction of contextual aspects. *Information Fusion* 7 (2): 221-230.

Casella, V., Franzini, M., Kocaman, S., Gruen, A., 2007a. Triangulation and Self-calibration of the ADS40 Imagery: A Case Study over the Pavia Test Site. In: 8th Conference on "Optical 3D Measurement Techniques", Zurich, Switzerland. Vol. 1: 223-232.

Casella, V., Franzini, M., Padova, B., 2007b. Accuracy assessment of ADS40 imagery as a function of flying height and of aerial triangulation strategies. In: 5th MMT Symposium, Padova, Italy. (On CD-ROM).

Casella, V., Franzini, G., Banchini, G., Gentili, G., 2008. Initial Evaluation of the second Generation Leica ADS40 Camera. In: ISPRS Congress, Commission I/4 Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems. Beijing, China. pp 527-532.

Casella, V., Franzini, M., 2008. Analysis of camera systematic errors in an ADS40 dataset. In: International Calibration and Orientation Workshop. EuroCOW 2008. Castelldefels, Spain.

Clarke, TA., Wang, X., Fryer, JG., 1998. The principal point and ccd cameras. *Photogrammetric Record* 16 (92): 293-312.

Cramer, M., Stallmann, D. and Haala, N., 2000. Direct georeferencing using GPS/inertial exterior orientations for photogrammetric applications. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33 Part B3: 198-205.

Cramer, M., 2004. EuroSDR network on digital camera calibration. In: ISPRS Congress. Vol. 35, Part B. Istanbul, Turkey. 6 p. (On CD-ROM).

Cramer, M., 2005. Digital airborne cameras-status and future. In: ISPRS Workshop, High Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. University of Hannover, Hannover, Germany. 8 p.

Cramer, M., 2006. The ADS40 Vaihingen/Enz geometric performance test. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 60 (6): 363-374.

Cramer, M., 2007. The EuroSDR Performance Test for Digital Aerial Camera Systems. In: 51st Photogrammetric Week. Stuttgart, Germany. pp. 89-106.

Cramer, m., 2008. The EuroSDR approach on digital airborne camera calibration and certification. In: ISPRS Congress, Standards and Standardization of Geo-Spatial Information. Beijing, China. pp. 1753-1758.

Cramer, M., 2009. Digital Camera Calibration. Report of EuroSDR project. Frankfurt a.M. 262 pages.

Cramer, M., 2010. The DGPF-Test on Digital Airborne Camera Evaluation – Overview and Test Design. Photogrammetrie - Fernerkundung - Geoinformation (PFG). pp.75-84.

Delgado, J., s.a. Fotogrametría Digital. Sensores electroópticos, cámaras digitales. [Apuntes]. Dpto. Ingeniería Cartográfica, Geodésica y Fotogrametría. Universidad de Jaén.

Derenyi, E.E., 1970. Relative Orientation of Continuous Strip Photography. Ph.D. Thesis. Univ. of New Brunswick, Canada.

DIN 18740-4, 2007. Standardization, Technical principles, Metrology. Photogrammetric productis. Part 4: Requirements for digital aerial cameras and digital aerial photographs.

Emmolo, D., Orlando, P., Villa, B., 2008. Evaluation of capabilities of fuzzy logic classification of different kind of data. In: International archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. 37. Part B7. Beijing, China. pp. 685-690.

Felipe, B., 2010. Desarrollo metodológico y de software para el control de calidad del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea, PNOA. Ph.D. Thesis. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad de Valencia. Valencia, España. 345 p.

Fricker, P., 2001. ADS40- Progress in digital aerial data collection. In: Photogrammetric Week 2001, D. Fritsch, R. Spiller (Eds.). Wichmann Verlag. Heidelberg, Germany. pp. 105-116.

Fricker, P., Gervais, F., Roth, R., Llorens, P., Delgado, J., Cardenal, J., 2002. Utilización de sensores aerotransportados para la generación de MDT y Ortofotografías: LH ADS40 y LH ALS40. In: XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica. Santander, España. Ingegraf. 10 p.

Fricker, P., Rohrbach, A., 2005. Pushbroom scanner provide highest resolution earth imaging information in multispectral bands. In: ISPRS Hannover Workshop. High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information. 5p. (On CD-ROM).

Fricker, P., 2007. Raising the bar for multi-band, high-resolution airborne imagery. In: Photogrammetric Week 2007, Fritsch, D., (Ed). Wichmann Verlag. Heidelberg, Germany. pp. 71-79.

Fuchs, T., Adigüzel, M., 2010. Enhancement & Simplification of Leica ADS Calibration Process. In: European Calibration and Orientation Workshop. EuroCOW 2010, Castelfelers, Spain. 4 p. (On CD-ROM).

Georgi, C., Stognienko, R., Knuth, S. and Albe, G., 2005. JAS: The next generation digital aerial scanner. In: Photogrammetric Week 2005. Wichmann Verlag. Heidelberg, Germany, pp. 147–154.

Gómez Molina, A., Arjonilla Sampedro, F.J., Antolín Sánchez, R., Pérez García, J.L., Delgado García, J., 2010. Aplicaciones medioambientales del sensor fotogramétrico de matriz lineal ADS40. In: Tecnologías de la Información Geográfica: la información geográfica al servicio de los ciudadanos. Sevilla, España. Secretariado de publicaciones de la Universidad de Sevilla, pp. 135-147.

Grau J., Bosch E., Talaya J., 2012. La transición de la geoinformación oficial a ETRS89 en Catalunya. Revista Catalana de Geografía. Vol. XVII (45): 10 p.

Gruen, A., Zhang, L., 2003. Sensor Modeling for Aerial Triangulation with Three-Line-Scanner (TLS) Imagery. Journal of Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation (PFG): 85-98.

- Haala, N., Stallmann, D., Cramer, M., 1998. Calibration of Directly Measured Position and Attitude by Aerotriangulation of three-line Airborne Imagery. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Budapest. Vol. 32, Part 3, pp. 23-30.
- Halla, N., Hastedt, H., Wolf, K., Ressler, C., Baltrusch, S., 2010. Digital Photogrammetric Camera Evaluation - Generation of Digital Elevation Models. Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Processing (PFG). pp 99-115.
- Heipke, C., Mooney, K., 2009. EuroSDR- a research organisation serving Europe's geospatial information needs. In: 52nd Photogrammetric Week 2009, Fritsch, D., (Ed). Stuttgart, Germany.
- Hernández, D., Felipe, B., González, D., Gómez, J., 2011. Sensor lineal ADS40: modelo matemático. In: Semana Geomática Agosto, 2011. Información Satelital al Servicio del Desarrollo Territorial. Bogotá, Colombia.
- Hernández, D., Felipe, B., et al., 2012. Testing the radiometric performance of digital photogrammetric images: vicarious vs. Laboratory results on the Leica ADS40, an experience in Spain. In: EuroCow, 2012. Institut de Geomática. Castelldefels, Spain.
- Hinsken, L., Miller, S., Tempelmann, U., Uebbing, R., Walker, A.S., 2002. Triangulation of the LH Systems' ADS40 using ORIMA GPS/IMU. In: International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Graz, Austria. Vol. 34, Part 3A, 7 p. (On CD-ROM).
- Hinsken, L., 2008. CAP-A. Combined Adjustment Program. Aerial Version. Norcross, Georgia. Erdas Inc. 135 p.
- Hinz, H., Dörstel, C., Heier, H., 2000. Digital modular camera: System concept and data processing workflow. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Amsterdam. Vol. 33, Part B2, pp. 164-172.
- Hofmann, O., Müller, F., 1988. Combined Point Determination Using Digital Data of Three Line Scanner Systems. In: International Archive of Photogrammetry, Remote Sensing. Kyoto. Japan. Vol. 27:567-577.
- Hofmann, B., Lichtenegger, H., Wasle, Elmar., 2008. GNSS. Global Navigation Satellite Systems. GPS, GLONASS, Galileo & more. Springer WienNewYork. 470 p.
- Honkavaara, E., 2008. Calibrating digital photogrammetric airborne imaging systems using a test field. In: International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing. Beijing, China. Vol. 37-B1.

JCGM 200:2008. Vocabulario Internacional de Metrología – Conceptos fundamentales y generales, y términos asociados (VIM). 3rd ed. Servicio Nacional de Metrología del Indecopi.

Kramer, H., 2002. Observation of the earth and its environment-survey of missions and sensors. Springer-Verlag. 1510 pp.

Kraus, K., 1993. Photogrammetry Vol. I, Fundamentals and Standard. 4th ed. Bonn, Dümmler Verlag. 386 p.

Kraus, K., 1997. Photogrammetry. Vol. II. Advanced Methods and Applications. 4th ed. Bonn, Dümmler Verlag. 457 p.

Kremer, J., 2001. CCNS and AEROcontrol: Products for Efficient Photogrammetric Data Collection. In: Photogrammetric Week '01. Fritsch/Spiller (Eds.). Wichmann Verlag, Heidelberg. pp: 85-92.

Kresse, W., Skaloud, J., Hinsken, L., 2006. Requirements for an orientation and calibration standard for digital aerial cameras and related sensors. In: ISPRS International Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2006. Castelldefels, Spain. 4 p.

Kresse, W., 2010. Status of ISO standards for photogrammetry and remote sensing. In: Proceedings European Calibration and Orientation Workshop EuroCOW 2010. Castelldefels, Spain. 4 p. (On CD-ROM).

Kocaman, S., Zhagn, L., Gruen, A., 2006. Self-calibrating Triangulation of Airborne Linear Array CCD Cameras. In: EuroCOW 2006, International Calibration and Orientation Workshop, Castelldefels, Spain. (On CD-ROM).

Kocaman, S., Gruen, A., 2008. Geometric modeling and validation of ALOS/PRISM imagery and products. In: 21st ISPRS Congress, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Beijing, China Vol. 37, Part B1: pp. 731-738.

Kocaman, S., Gruen, A., 2008: Experiences with the Orientation and Calibration of Aerial Linear Array CCD Sensors. In: International Calibration and Orientation Workshop, EuroCOW 2008. Castelldefels, Spain.(On CD-ROM).

Kukko, A., 2008. Radiometric calibration and characterization of large-format digital photogrammetric sensors in a test field. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 74: 1487-1500.

Ladstädter, R., Tschemmerneegg, H., Gruber, M., 2010. Calibrating the Ultracam aerial camera systems, an update. In: Proceedings European Calibration and Orientation Workshop, EuroCOW 2010. Casteldefells, Spain. 4 p. (On CD-ROM).

Leica Geosystems, 2001. Leica PAV30, Gyro-stabilized Sensor Mount. [Product Specifications]. Atlanta, Georgia, USA. Leica Geosystems GIS & Mapping Division.

Leica Geosystems, 2008a. Leica ADS80 Airborne Digital Sensor, Digital Airborne Imaging Solution. [Product Specifications]. Heerbrugg, Switzerland. Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems, 2008b. Leica Geosystems AG, 2008. Leica Xpro, Data Processing at the Speed of Flight. [Flyer]. Heerbrugg, Switzerland. Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems, 2009. Leica ADS40 Ground Processing Software GPro. Versión 3.3.3. [User manual]. Heerbrugg, Switzerland. Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems, 2010. Leica ADS40/80 Calibration Block Layout. [Technical Document] Muzaffer Adigüzel. Heerbrugg, Switzerland. Leica Geosystems AG.

Leica Geosystems, 2011. Product Description Leica PAV80 Gyro-stabilized Sensor Mount. [Product Specifications]. Heerbrugg, Switzerland. Leica Geosystems AG.

Markelin, L., Honkavaara, E., Peltoniemi, J., Ahokas, E., Kuittinen, R., Hyyppä, J., Suomalainen, J., and Kukko, A., 2008. Radiometric calibration and characterization of large-format digital photogrammetric sensors in a test field. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 74 (12), pp. 1487-1500.

Mohinder, S., Lawrence, R., Angus, P., 2001. *Global Positioning Systems, Inertial Navigation, and Integration*. Hoboken, New Jersey. John Wiley y Sons., Inc. 370 p.

Mostafa, M.M.R., Schwarz, K., 2000. A multi-sensor system for airborne image capture and georeferencing. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66 (12): 1417-1423.

Mostafa, M., Hutton, J., Reid, B., 2001. GPS/IMU products - the Applanix approach. In: *Photogrammetric Week 2001*, Fritsch/Spiller (eds.). Wichmann, Karlsruhe. pp. 63-83.

Murai, S., Matsumoto, Y., 2000. The Development of Airborne Three Line Scanner with High Accuracy IMU and GPS for Analysing Car Velocity Distribution. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. Amsterdam, Netherlands. Vol. 33, Part B2, pp. 416-421. (on CD-ROM).

Ozawa, A., Madhavan, B., Okada, H., Mishra, K., Tachibana, K., Sasagawa, T., 2004. Airborne hyperspectral and thermal information for assessing the heat island in urban areas of Japan. *In: ISPRS Congress, Technical Commission VII*. Istanbul, Turkey. Vol. 35, Part 7, 44-48.

Pacey, R., Walker, A., Scheidt, M., 1999. Calibration of analog and digital airborne sensors at LH Systems. *In: 1999 ASPRS Annual conference*. Portland, Oregon. pp. 950-956.

Pérez, P., Erena, M., Paya D., Rosa J., Garcia P., Montesinos, S., Bea, M., 2008. Empleo de la teledetección de alta resolución para el estudio de los daños por sequía en cítricos. *In: Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC, Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.). Las Palmas de Gran Canaria. pp: 114-120.

Petrie, G., 2006. Further advances in airborne digital imaging: several new imagers introduced at ASPRS. *GeoInformatics*, 9(5): 16-23.

Petrie, G., Walker, A.S., 2007. Airborne digital imaging technology: a new overview. *The Photogrammetric Record* 22(119): 203-225.

PNOA, 2012. 101108 Especificaciones técnicas PNOA 50 cm. <ftp://web_pnoa@ftp.pnoa.ign.es/1.Dossier_PNOA_2010/> [último acceso Junio del 2012].

Poli, D., 2005. Modelling of Spaceborne Linear Array Sensors. Ph.D. Thesis. IGP Report No. 85. Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland. 217 p.

Quirós, E., Cuartero, A., 2005. Posibilidades estereoscópicas de los datos espaciales. *Revista Internacional de ciencia y tecnología de la información geográfica, GeoFocus* 5: 65-76.

Real Decreto 1071, 2007. Ministerio de la Presidencia. Regulación del sistema geodésico de referencia oficial en España. Boletín Oficial del Estado núm. 207, pp. 35986-35989.

Remondino, F., Fraser, C., 2006. Digital camera calibration methods: considerations and comparisons. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36(5): 266–272.

Retscher, G., 2002. Accuracy performance of virtual reference station (VRS) networks. *Journal of Global Positioning Systems*, 1 (1): 40-47.

Saks, T., Tempelmann, U., 2008. ADS40 system with new sensor heads - key to the simplified model for selfcalibration and extended user benefits. *In: EuroCOW 2008, International Calibration and Orientation Workshop*. Castelldefels, Spain. (On CD-ROM).

Sandau, R., Braunecker, B., Driescher, H., Eckaardt, A., Hilbert, S., Hutton, J., Kirchhofer, W., Lithopoulos, E., Reulke, R., Wicki, S., 2000. Design principles of the LH Systems ADS40 Airborne Digital Sensor. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 33, Part B1. Amsterdam, Netherlands, pp. 258-265.

Sandau, R., 2004. High resolution mapping with small satellites. *In: 20th ISPRS Congress, Technical Commission I*. Istanbul, Turkey. Vol. 35, Part 1, pp. 108-113.

Scholten, F., Gwinner, G., Wewel, F., 2002. Angewandte Digitale Photogrammetrie mit der HRSC Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 5: 317-332.

Scholten, F., Sujew, S., Gwinner, K., 2003. Application of GPS/INS-Systems with the HRSC - A Comparison of Applanix POS/AV-510 and IGI AEROcontrol-IId. *In: ISPRS Workshop, Theory, Technology and Realities of Inertial/GPS Sensor Orientation*. Castelldefels, Spain.

Schreiber, P., 2008. Leica Geosystems' Digital Airborne Solution. The best is getting even better!. Leica Geosystems AG. Luzern, Switzerland.

Schreiber, U., 2010. ADS40 Workflow. [Presentación de diapositivas] 22 p.

Schuster, R., 1994. Sensor calibration and geometric calibration of a three line stereo camera. *In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 30, Part 1. Como, Italy. pp. 265-271.

Schuster, R., Braunecker, B., 2000. Calibration of the LH Systems ADS40 airborne digital sensor. In: 19th Congress of the ISPRS, Vol. 33, Part 1. Amsterdam, The Netherlands. pp. 288-294.

Slama, C., Theurer, C., Henriksen, S., 1980. Manual of Photogrammetry, 4th ed. American Society of Photogrammetry and Remote Sensor, Falls Church, VA. USA. 1048 p.

Stereocarto, 2010a. Vuelo ADS40 y Lidar a dos alturas en Ávila. Informe de Planificación. Stereocarto S.L. Madrid, España. 17 p.

Stereocarto, 2010b. Vuelo fotogramétrico combinado con cámara digital lineal ADS40 y lidar en Ávila. Memoria técnica. Stereocarto S.L. Madrid, España. 16 p.

Tempelmann, U., Böner, A., Chaplin, B., Hinsken, L., Mykhalevych, B., Miller, S., Recke, U., Reulke, R., Uebbing, R., 2000. Photogrammetric Software for the LH Systems Airborne Digital Sensor. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. 33, Part B2. Amsterdam, The Netherlands. pp. 552-559.

Tempelmann, U., Hinsken, L., 2007. Hardware improvements of the ADS40 sensor heads SH51/52 and how they allow a better camera model for self-calibration. In: 8th Conference on “Optical 3D Techniques”, Zurich, Switzerland. pp. 187-193.

Titarov P., 2007. ADS40 Imagery processing using Photomod: tecnology and experience. In: VII th International Scientific and Technical Conference From Imagery to Map: Digital Photogrammetric Technologies. Nessebar, Bulgaria. 22 p.

USGS, 2010. Digital Aerial Imagery Calibration Range Re-quirements EROS Remote Sensing Technology Project., September 2008, Version 0.2. 14 p. Available at calval.cr.usgs.gov/documents/InSituCalibrationRangeRequirementsV02.doc [Last access April, 2012].

Wagner, R., 2008. Leica ADS80 – Digital airborne imaging solution. In: Leica Geosystems Airborne Sensor Workshop. San Ramon, CA.

Wehrli, H., Gayda, V., Wehrli, G., Bethel, J., 2004. Introduction of the 3-DAS-1 Digital Aerial Scanner. In: 20th ISPRS Congress, Technical Commission I, Vol.

35, Part 1. Istanbul, Turkey. pp: 561-564.

Wewel, F., Scholten, F., Gwinner, K., 1999. High Resolution Stereo Camera (HRSC) - Multispectral Data Acquisition and Photogrammetric Data Processing. In: 4th International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, Vol. 1. Ottawa, Canada., pp. 263-272.

Xinru Tu y Miaozhong Xu, 2010. ADS40 Calibration based on a Test Field. In: Geospatial Data and Geovisualization: Environment, Security, and Society. Special Joint Symposium of ISPRS Commission IV and AutoCarto 2010 in conjunction with ASPRS/CaGIS 2010 Special Conference. Orlando, Florida, USA. 7 p.

Yuan, W., Yang, G., Yuan, H., 2008. Application and accuracy evaluation of Leica ADS40 for large scale mapping. In: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Airborne Digital Photogrammetric Sensor Systems, Vol, 37, Part 1. Beijing, China. pp: 605-610.

8 ANEXOS

ANEXOS

Dado el volumen de datos los siguientes anexos han sido incorporados en soporte digital, DVD.

ANEXO I – CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN ADS40 SH52.

ANEXO II – VUELOS EMPLEADOS.

- Informes de planificación.
- Datos de los vuelos individuales y combinado.

ANEXO III – APOYO EN CAMPO

- Fichero con la planificación de la toma de puntos topográficos.
- Croquis de los puntos de apoyo y chequeo.
- Datos crudos GNSS.
- Listado de coordenadas cartesianas de los puntos topográficos.

ANEXO IV – TABLAS, RESULTADOS, ANÁLISIS Y COMPARATIVAS DE LOS DATOS.

- GSD10cm.
- GSD25cm.
- GSD10+25cm.

Cada una de estas carpetas incluye a su vez varias carpetas en su interior. Una primera carpeta correspondiente a los informes detallados de los procesos de aerotriangulación y autocalibración. Una segunda carpeta con los ficheros (xls) correspondientes a los análisis estadísticos y una última carpeta en la que se recogen los ficheros ajustados de la orientación (odf.adj) y sus correspondientes informes (tanto para las aerotriangulaciones como para las autocalibraciones).

ACRÓNIMOS

ABM - Area Based Matching

ADS - Airborne Digital Sensor

AIC - Aerial Industrial Camera

ASTER - Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

AT - Aerotriangulación

CAP-A - Combined Adjustment Program, Aerial Version

CCD - Dispositivo de Carga Acoplada

CIO - Definición estándar para el polo norte

CVG - Goniómetro Vertical Codificado

DASA - Deutsche Aerospace AG

DG - Georreferenciación Directa

DGAP - Dirks General Analytical Positioning

DGPF - Sociedad Alemana de fotogrametría, sensores remotos y geoinformación

DGR - Modelo de Georreferenciación Directa

DIN - Deutsches Institut für Normung

DLR - Centro Aeroespacial Alemán

DMC - Digital Mapping Camera

DPA - Digital Photogrammetric Assembly

DSS - Digital Sensor System

ECEF - Earth Centered, Earth Fixed

EGM08 - Earth Gravitational Model 2008

ETH - Eidgenössische Technische Hochschule

ETRS89 - European Terrestrial Reference System 1989

EuroDAD² - European Network on Debt and Development

EuroSDR - European Spatial Data Research

EVG - Goniómetro Vertical Electrónico

FCMS - Flight & Sensor Control Management System

FOV - Field Of View

FPES - Flight Planning and Evaluation Software

FPGA - Field-programmable Gate Arrays

GDOP - Dilución de la Precisión Geométrica

GNSS - Sistema Global de Navegación por Satélite

GPro - Ground Processing Software

GPRS - General Packet Radio System

GRS80 - Geodetic Referente System 1980

GSD - Ground Sample Distance

GSM - Groupe Speciale Mobile

HRSC - High Resolution Stereo Camera

HRV - High Resolution Visible

IIFOV - Instantaneous Field Of View

IFP - Instituto de Fotogrametría de la Universidad de Stuttgart

IMU - Unidad de Medida Inercial

IR - Infrarrojo próximo

IRS - Indian Remote Sensign Satellite

ISO - Integrated Sensor Orientation

ISPRS - Asociación Internacional de Fotogrametría y Teledetección

JAS - Jena Airborne Scanner

LCA - Logia Cell Array

LIM - Modelo de Interpolación de Lagrange

LISS - Linear Imaging Self-Scanning Sensor

LSR - Local Space Rectangular

MBB - Messerschmitt Bölkow Blohm

MDS - Modelo Digital de Superficie

MDT - Modelo Digital del Terreno

MMCC - Mínimos Cuadrados

MOMS - Modular Optical Multispectral Sensor

MS - Multispectral

MTF - Función de transferencia de modulación

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration

OEEPE - European Organisation for Experimental Photogrammetric Research

ORIMA - Orientation Management Program

OTF - Función de transferencia óptica

PA - Puntos de Apoyo

PAN - Pancromático

PANB14 - Vista pancromática hacia atrás

PANF27 - Vista pancromática hacia delante

PANN02 - Vista pancromática nadiral

PCh - Puntos de Chequeo

PNOA - Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

PNOA - Plan Nacional de Ortofotografía Aérea

REDNAP - Red Española de Nivelación de Alta Precisión

REGENTE - Red Geodésica Nacional por Técnicas Espaciales

RGB - Red, Green, Blue

RMSE - Root Mean Square error

RP - Poder de Resolución

RTK - Real Time Kinematic

SPOT - Satelite Para la Observación de la Tierra

TC - Comité Técnico

TLS - Three Line Scanner

UCD - UltraCam D

UH - Universidad de Hannover

UoP - Universidad de Pavia

US - Universidad de Stuttgart

USGS - Servicio Geológico de los Estados Unidos

UTC - Tiempo Universal Coordinado

UTM - Universal Transversal Mercator

VIM - Vocabulario Internacional de términos Metrológicos

VRS - Virtual Reference Station

WAAC - Wide Angle Airborne Camera

WAOSS - Wide Angle Optoelectronic Stereo Scanner

WiFS - Wide Field Sensor

ZI - Zeiss/Intergraph

