

PROYECTO SICILIA: CASO PRÁCTICO DE LA CAPTURA SIMULTÁNEA DE DATOS LIDAR E IMAGEN DIGITAL DE ALTA RESOLUCIÓN EN GRANDES SUPERFICIES, METODOLOGÍA Y RESULTADOS

A. Gómez, T. Fernández de Sevilla, A. Godino, F.J. Arjonilla, S. Cirone
Stereocarto S. L. Pº de la Habana 200, Madrid 28036. España
agomez@stereocarto.com; tfsevilla@stereocarto.com; agodino@stereocarto.com;
fjarjonilla@stereocarto.com; salvatore.cirone@regione.sicilia.it;

Palabras clave: LiDAR, cámara aérea digital, ortofotografía, modelos digitales del terreno, vuelo combinado, Región de Sicilia.

Resumen

Actualmente los vuelos combinados con sensores LiDAR y cámara fotogramétrica digital de alta resolución se presentan como una alternativa óptima para aquellos proyectos en los que se requiera la producción de modelos digitales de elevaciones y ortofotografías.

Este documento presenta la metodología y resultados obtenidos en un vuelo fotogramétrico con resolución de 0,25 m y datos LiDAR obtenidos simultáneamente en la Región Siciliana, cuya superficie es de 2.578.800 has, a partir del cual se han obtenido modelos digitales de elevaciones de alta precisión, ortofotografías y se ha realizado actualización de cartografía existente. Los productos obtenidos han sido sometidos a un control de calidad externo realizado por el cliente, que ha sido superado con la calificación de apto sin necesidad de realizar ninguna corrección.

1 Introducción

Actualmente, la tecnología LiDAR¹ está siendo ampliamente aceptada como uno de los métodos directos para la obtención de modelos digitales de elevaciones de alta precisión y gran resolución espacial. Los datos LiDAR son por sí mismos una fuente importante de información para análisis del territorio y su integración con la información capturada por cámaras fotogramétricas hace de ellos una herramienta idónea para la generación de productos cartográficos y mejora la capacidad de análisis de los sistemas de información [1].

Por otro lado, el empleo de cámaras digitales de alta resolución fotogramétrica para la captura de imágenes aéreas es un hecho indiscutible a día de hoy.

Los proyectos en los se requieren datos LiDAR e imagen digital comienzan a ser usuales para superficies de terreno medias y pequeñas. No obstante aún existen dudas en el mercado de la información espacial sobre la viabilidad de este tipo de aplicaciones en grandes superficies de terreno, tanto del punto de vista técnico como económico.

En el siguiente artículo se describe la metodología y los resultados obtenidos en un proyecto real con una gran superficie en la que se ha realizado la captura de datos LiDAR e imagen digital de forma conjunta y simultánea.

2 Definición y objetivos del proyecto

Este proyecto surge por iniciativa de la Regione Siciliana², organismo público que cuenta entre sus competencias con la gestión del servicio cartográfico de la región. Este organismo, mediante concurso público, contrata la realización de un vuelo fotogramétrico digital con GSD de 0,25 m, apoyo, aerotriangulación, extracción de modelos digitales de elevaciones, ortofotografía con GSD de 0,25 m y actualización de cartografía base a escala 1:10.000 del territorio de la Región Siciliana, islas menores incluidas. Sicilia es la cuarta isla europea por dimensiones (25.708 km²), siendo además la más importante isla en Italia y la mayor del mediterráneo.

¹ LiDAR: acrónimo de Light Detection and Ranging.

² Concretamente Regione Siciliana / Assessorato Territorio e Ambiente / Dipartimento Urbanistica.



Figura 1. Ámbito del proyecto. Región Siciliana.

Las características básicas del proyecto son:

- Objeto: Realización de vuelo fotogramétrico digital (0,25 m), apoyo, aerotriangulación, extracción de modelos digitales de elevaciones, ortofotografía (0,25 m) y actualización de cartografía base a escala 1:10,000, del territorio de la Región Siciliana (islas menores incluidas).
- Superficie: 2.578.800 has
- Productos:
 - o Modelos digitales de elevaciones (MDT³ y MDS⁴)
 - o Ortofotografías RGB y CIR con GSD⁵ de 0,25 m
 - o Actualización de la cartografía base a escala 1:10.000
- Plazo de ejecución: 1 año

El grupo ICE Ingeniería Cartográfica Europea, formado por las empresas Stereocarto S.L. de España y RPA de Italia, resulta adjudicatario en el año 2007 de los trabajos tras presentar una oferta basada en vuelos combinados con sensor LiDAR y cámara fotogramétrica digital, con el objetivo de optimizar los vuelos, mejorar las precisiones y reducir los costes y tiempos de producción.

3 Medios y metodología

3.1 Medios

Para la realización de los trabajos se contó con los siguientes equipos:

- Aeronave: Beechcraft King Air B-200. Esta aeronave está presurizada y ha sido dotada de doble ventana fotogramétrica para la utilización simultánea de dos sensores.
- Cámara fotogramétrica digital de gran formato: Z/I – DMC
- Sistema inercial: Applanix – POS AV510
- Sensor LiDAR: Leica – ALS50-II dotado con tecnología MPiA⁶. Sistema GPS/INS IPAS10.

A continuación se presentan las características básicas del equipo tecnológico empleado.

Sensor de captura de imágenes digitales	
Sensor empleado	Digital Mapping Camera (DMC)
Resolución espectral	5 bandas (Rojo, Verde, Azul, Infrarrojo cercano, Pancromático)
Tamaño de píxel	12 micras
Control automático de la exposición	Incluido
Sistema FMC	TDI
Plataforma Giroestabilizada	T-AS Compensación de 5 deg en Roll y Pitch y 30 deg en Heading. Permite

³ MDT: Modelo Digital del Terreno. Se obtiene a partir de los puntos LiDAR clasificados como terreno.

⁴ MDS: Modelo Digital de Superficies. Se obtiene a partir de los puntos LiDAR clasificados como terreno y “no terreno”.

⁵ GSD: Ground Sample Distance. Tamaño del píxel sobre el terreno.

⁶ La tecnología MPiA (Multiple Pulses in Air) permite duplicar la frecuencia de emisión de pulsos al sistema LiDAR al emitir otro pulso antes de haber recibido el precedente.

	control automático de deriva.
Sistema de navegación	ASMS de Integrgraph Permite: - planificar el vuelo, determinando los centros de fotos - navegación en tiempo real - control automático de disparo - registro de eventos - registro de datos de captura de cada imagen
Sistema inercial	PosAV-510 - Frecuencia de registro: 200 Hz. - Precisión 0.005 deg en Omega y Phi, 0.008 deg en Kappa.

Sensor de captura de datos LiDAR	
Sensor empleado	ALS50 II
Altura de vuelo	200m – 6,000m
Frecuencia de pulsación	Hasta 150,000Hz (150,000 pulsos/seg.)
Precisión a priori	Hasta 10cm en altimetría
Número de retornos capturados	4
Campo de visión (FOV)	10° - 75°
Captura de intensidades	una por pulso
Tecnología MPiA (Multiples Pulses in Air)	Sí
Densidad de puntos (puntos/m ²)	Hasta 12
Sistema GPS/INS	IPAS10



Figura 2. Equipo tecnológico empleado para la realización de los trabajos. De izquierda a derecha: aeronave Beechcraft King Air; sistema LiDAR Leica-ALS50; sistema inercial Applanix-POS AV510; cámara digital Z/I–DMC.

3.2 Metodología

Tras analizar las especificaciones del proyecto, se llega a la conclusión de que la mejor opción para afrontar el trabajo consiste en la realización de vuelos combinados con sensor LiDAR y cámara digital. Los puntos fuertes de esta metodología son:

- Optimización de los vuelos fotogramétricos, obteniendo de forma simultánea las imágenes digitales y los datos de elevaciones proporcionados por el sensor LiDAR.
- Obtención de modelos digitales de elevaciones de gran precisión en base a los datos capturados por el sensor LiDAR.
- Reducción de los tiempos de producción.
- Reducción de costes de producción.

Para su realización el proyecto se divide en fases bien diferenciadas:

Vuelo fotogramétrico combinado

La planificación del vuelo fotogramétrico se realiza según las necesidades del sistema LiDAR y del sistema cámara digital para con un único vuelo, para obtener los productos derivados de ambos sensores cumpliendo con las especificaciones del proyecto.

El vuelo fotogramétrico se realiza con la siguiente parametrización:

- Altura de vuelo 2.500 m.
- Resolución de las imágenes: 0,25m (escala equivalente 1:20.800).

- Solape Longitudinal en las imágenes: 60%. En caso de núcleos urbanos con más de 50,000 habitantes el solape se incrementa a un 80%.
- Solape Transversal en las imágenes: 15 a 30%.
- Pasadas transversales en los extremos de bloque.
- Pasadas de costa.

Parametrización del sensor LiDAR:

- FOV⁷: 70°.
- LPR⁸: 81.000 Hz.
- Scan Rate⁹: 24 Hz.
- Distancia media entre puntos: 1,90 m
- Densidad media 0,25 ptos/m².
- MPiA activado.
- Ancho de barrido medio en las pasadas LiDAR: 3.100 m.
- Compensación de roll: El espejo rotatorio que dirige el pulso láser puede corregir su movimiento afectado por el avión en +/- 5° entorno a la dirección del eje paralelo al desplazamiento (eje X). Ello permite que las pasadas de datos LiDAR tengan sus bordes rectos y homogéneos alcanzando el ancho de barrido planificado.

Para salvar la complicada orografía en las proximidades del volcán Etna (3.322 m de altura), en esta zona se hace necesario realizar pasadas intercaladas que garanticen la cobertura estereoscópica y de datos LiDAR. Pese a no ser estrictamente necesario, se optó por realizar pasadas transversales y de costa en los extremos de los bloques, por utilizar sistemas GPS/INS [2].

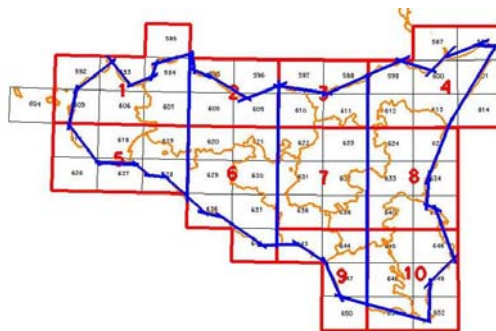


Figura 3. Distribución de pasadas transversales y de costa.

Durante la planificación del vuelo fotogramétrico, se diseña también una red específica de estaciones de referencia GPS en tierra, que permitirá que todo el vuelo se realice con una distancia inferior a 50 km de una estación de referencia. Las estaciones se realizan exclusivamente sobre vértices de la red nacional y reciben el nombre del núcleo urbano más importante del entorno.

⁷ FOV (Field Of View): ángulo de apertura del sensor LiDAR.

⁸ LPR (Laser Pulse Rate): frecuencia de emisión de los pulsos láser.

⁹ Frecuencia de barrido del sensor LiDAR.

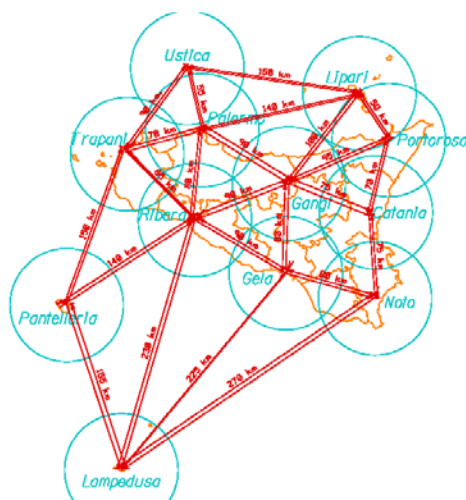


Figura 4. Red de estaciones de referencia GPS.

En total, como resultado de la planificación, se obtienen aproximadamente 21.000 fotografías divididas en 404 pasadas y se diseña una red con 12 estaciones de referencia GPS en tierra. Dada la gran extensión de trabajo se opta por dividir la zona en bloques, que serán empleados para organizar los vuelos y las labores de producción en gabinete. De esta forma la superficie es dividida en un total de 18 bloques en la isla de Sicilia, más un bloque para las islas menores. La ejecución del vuelo planificado se realiza en un total de 31 días de vuelo.

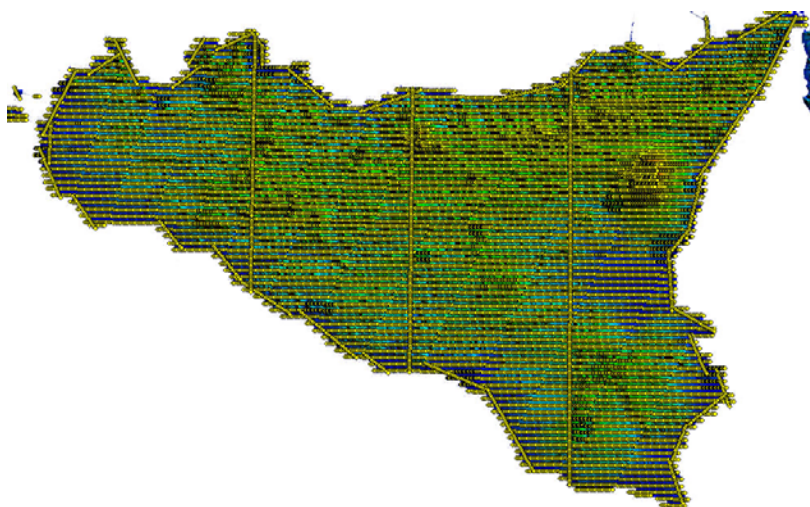


Figura 5. Vuelo fotogramétrico planificado (en el gráfico no se muestran las pasadas de las islas menores).

Calibración

En la zona del proyecto se diseñó un campo para la calibración de los sensores DMC y ALS50_II, basado en un esquema de 4 pasadas perpendiculares entre sí, con distintos sentidos de vuelo, a 3 alturas diferentes correspondientes a 750m, 1.300m y 2.400m. Además se observó un conjunto de puntos de control en tierra mediante técnicas GPS.

Los parámetros que se han calibrado han sido las desalineaciones angulares de la cámara DMC con respecto a su sistema INS, y las desalineaciones angulares del sistema ALS50_II con su propio sistema INS independiente del anterior. Además se determinó una corrección de distancias al suelo del sistema LiDAR, junto a la corrección por translación local de datum correspondientes a las observaciones GPS, válida para ambos sistemas y estimada en la triangulación de las imágenes de la cámara. Las observaciones GPS se realizaron utilizando una única antena situada en el techo del avión. Cada sensor tiene su propio vector de excentricidad con respecto a la antena GPS, el cual fue observado en trabajos anteriores y se considera invariante para esta combinación de sensores, antena y avión.

Esta estrategia ha demostrado ser eficaz para la calibración simultánea de la cámara digital y del sensor LiDAR, siguiendo un esquema de vuelo unificado.

Orientación de imágenes

La orientación de las imágenes se realiza por aerotriangulación mediante el método de ajuste de haces combinado con observaciones GPS/INS. Para ello se emplean puntos de apoyo y los parámetros de orientación externa a partir de las observaciones de los sistemas GPS/INS. La aerotriangulación se realiza por bloques, coincidentes con los bloques de vuelo (ver figura 3), que posteriormente son unidos entre sí. Cada bloque de aerotriangulación equivale a 2x2 ó 3x3 hojas de la cartografía 1:50.000 y en sus límites existen pasadas transversales o de costa que son incluidas en la aerotriangulación para conseguir mayor robustez en los cálculos.

Orientación de datos LiDAR

La orientación de la nube de puntos LiDAR se ha realizado por métodos directos, utilizando la información de la trayectoria GPS/INS. No se ha recurrido a ninguna técnica de ajuste relativo entre pasadas. La trayectoria del sensor LiDAR y la de la cámara fotogramétrica han sido observadas utilizando sistemas GPS/INS distintos, aunque compartían la misma antena GPS en el techo del avión.

Modelos digitales de elevaciones

A partir de la nube de puntos LiDAR capturada en vuelo con una resolución de aproximadamente 0,25 ptos/m². Se realiza una clasificación automática de la misma para asignar cada punto de la nube a una de las clases predefinidas, en este caso se han empleado sólo dos clases: terreno y “no terreno”. Posteriormente, esta clasificación automática es revisada y editada por operadores expertos con el apoyo de una ortofoto expedita. De forma simultánea se realiza la restitución estereoscópica de líneas de ruptura, que son integradas con la nube de puntos LiDAR clasificada para generar los modelos digitales de elevaciones (MDT y MDS) con un paso de malla de 2 m.

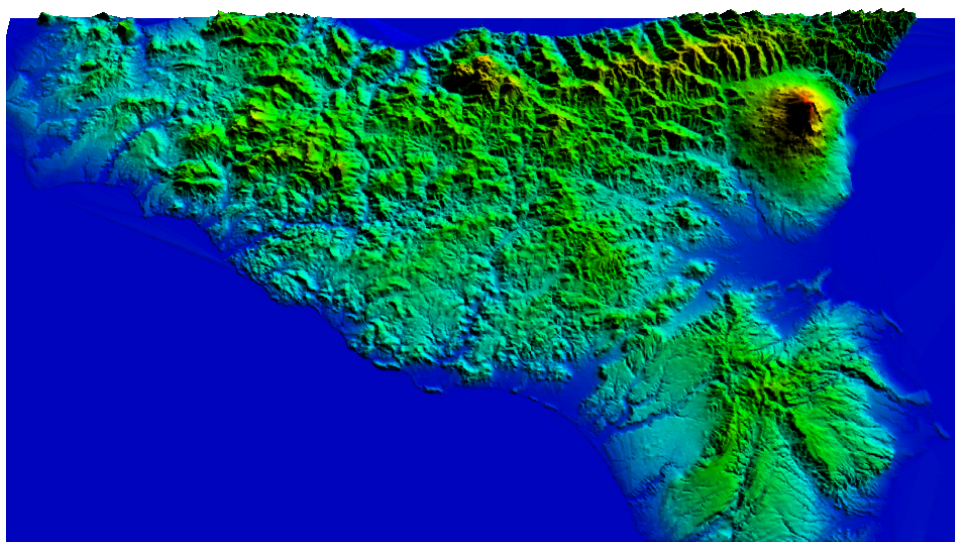


Figura 6. Modelo digital del terreno de Sicilia.

Ortofotografía

Las ortofotografías se realizan a partir de las imágenes capturadas en el vuelo, sus parámetros de orientación obtenidas por aerotriangulación y el MDT de 2 m obtenido a partir de la nube de puntos LiDAR. Con objeto de reducir los tiempos y costes de producción se optó por realizar de forma conjunta las ortofotografías en color verdadero RGB y falso color IrRG. Para ello, los procesos de ortorrectificación, ajuste de color y mosaico se realizaron sobre imágenes de cuatro bandas RGB-Ir y una vez obtenidos los ortomosaicos de 4 bandas se exportan los formatos requeridos: RGB y CIR (Ir-R-G).



Figura 7. Ortofotografías RGB y CIR.

Actualización de cartografía

En esta fase se realiza la actualización de la cartografía 1:10.000 ya existente en la Región Siciliana. El proceso de actualización engloba:

- restitución estereoscópica de las nuevas entidades, codificación e inclusión en la base de datos geográfica
- modificación de aquellas entidades que han sufrido cambios desde su inclusión en la base de datos geográfica hasta la fecha
- registro de entidades eliminadas

Durante la actualización se contempló la posibilidad de mantener un histórico que permitiese la evaluación de cambios en el territorio, para ello se empleó una codificación especial diseñada para tal fin y se optó por no eliminar los elementos presentes en la cartografía a actualizar, sino que aquellos elementos que ya no están presentes en el terreno son codificados con un código especial. Así por ejemplo un edificio podría tener diferentes códigos en función de su estado:

- 01001: Edificio
- 01001m: Edificio modificado
- 01001n: Edificio nuevo
- 01001e: Edificio eliminado

4. Control de calidad

Este proyecto ha sido sometido a un doble control de calidad para garantizar la calidad de los productos generados y el cumplimiento de las especificaciones técnicas establecidas en el pliego de condiciones.

El primero de los controles es de tipo interno realizado sobre cada uno de los productos y fases de producción. Este control, llevado a cabo de forma directa por el productor, se realiza en paralelo a la producción con el fin de detectar y corregir cuanto antes los posibles errores, evitando la propagación de éstos durante la cadena de producción. Es un control cuantitativo/estadístico y documentado, que ofrece una visión objetiva de los resultados obtenidos.

Por otro lado, el cliente realiza una auditoría para comprobar el cumplimiento de las especificaciones técnicas de los productos, ésta se puede realizar al finalizar cada fase, cada vez que se avance un 10% en el proyecto y/o al finalizar el proyecto completo. Durante la auditoría se analiza en primer lugar la documentación generada por el

productor en base a los controles de calidad internos realizados y los resultados obtenidos en los mismos. Mediante un muestreo aleatorio se seleccionan zonas en las que el productor ha de repetir el control de calidad interno de los productos ante la supervisión del auditor, quien comprobará que los resultados obtenidos coinciden con los que se reportaron en el correspondiente informe de calidad. En caso de considerarlo necesario el auditor puede solicitar que se realicen nuevos controles más exhaustivos.

Cada fase de producción es sometida a un control de calidad externo realizado directamente por el cliente. Los controles de calidad más importantes son:

4.1 Aerotriangulación

Se realiza sobre cada bloque. Para ello, mediante visión estereoscópica, se miden las coordenadas en el par fotogramétrico de entre 10 y 15 puntos de control de una red independiente aportada por el auditor y se comparan con sus correspondientes coordenadas terreno.

CONTROLLO QUALITÀ TRIANGOLAZIONE AEREA											
BLOCCO 8 1											
LOTTO	PUNTO	X	Y	Z	Xm	Ym	Zm	DIFX m	DIFY m	DIFZ m	
lotto 3 2000	6307	2504767,78	4180972,48	733,08	2504767,78	4180972,60	733,21	0,00	-0,12	-0,13	
lotto 3 2000	6252	2498001,41	4162789,63	629,37	2498001,79	4162789,41	629,49	-0,38	0,22	-0,12	
lotto 3 2000	6256	2496953,40	4164838,47	633,71	2496953,56	4164838,22	633,84	-0,16	0,25	-0,13	
lotto 3 2000	6453	2503986,59	4171231,90	389,40	2503986,77	4171231,67	389,80	-0,18	0,23	-0,40	
lotto 3 2000	6479	2506620,20	4165011,54	266,83	2506620,37	4165011,13	266,69	-0,17	0,41	-0,06	
lotto 3 2000	6483	2517179,95	4165342,11	881,15	2517179,73	4165341,90	881,64	0,22	0,21	-0,49	
lotto 3 2000	6451	2528431,42	4163918,64	452,53	2528431,25	4163918,33	452,36	0,17	0,31	0,17	
lotto 3 2000	6505	2534895,67	4162265,11	120,08	2534895,43	4162265,09	119,85	0,24	0,02	0,23	
lotto 3 2000	6443	2531602,08	4171209,52	374,59	2531601,87	4171209,36	374,63	0,21	0,17	-0,04	
lotto 3 2000	6400	2534517,56	4179030,34	244,10	2534517,46	4179030,27	243,61	0,10	0,07	0,49	
lotto 3 2000	6430	2540363,93	4184014,93	25,60	2540363,87	4184014,78	25,49	0,06	0,16	0,12	
								Media	0,01	0,18	-0,03
								Devst	0,21	0,14	0,28

Tabla 1. Listado de puntos de control de aerotriangulación y sus estadísticos básicos.

4.2 LiDAR

Los datos LiDAR y productos derivados son sometidos a un doble control de calidad controlando por un lado la calidad altimétrica absoluta de los mismos mediante la utilización de una red independiente de puntos de apoyo (al menos 40 por hoja de la cartografía 1:50.000) y, por otro lado, comprobando la coherencia con las imágenes fotogramétricas y la nube de puntos LiDAR midiendo puntos comunes.

CG Lidar Foglio 625						
ID	X	Y	Z-control	Z-lidar	Dz	
1 Iolko3_6383	2531651,44	+180087,36	775,34	775,29	-0,05	
2 Iolko3_6387	2529758,05	+172847,89	582,33	582,26	-0,07	
3 Iolko3_6391	2533122,05	+182922,30	960,11	959,99	-0,12	
4 Iolko3_6394	2533131,46	+173317,16	285,13	285,07	-0,06	
5 Iolko3_6398	2534656,99	+183258,29	328,93	329,40	0,47	
6 Iolko3_6399	2534777,80	+181017,37	284,97	285,10	0,13	
7 Iolko3_6400	2534517,56	+179030,34	242,98	242,38	-0,60	
8 Iolko3_6401	2534695,30	+175372,89	208,93	208,89	-0,34	
9 Iolko3_6402	2534493,16	+173351,01	193,83	194,11	0,28	
10 Iolko3_6404	2535865,89	+181887,63	140,20	140,64	0,44	
11 Iolko3_6409	2535889,18	+176555,36	78,46	77,77	-0,69	
12 Iolko3_6410	2537325,10	+177065,14	15,21	15,25	0,04	
13 Iolko3_6418	2536074,24	+173402,13	8,42	7,90	-0,52	
14 Iolko3_6419	2537614,75	+170174,11	3,87	3,60	-0,27	
15 Iolko3_6420	2537328,51	+170305,43	32,27	32,23	-0,04	
16 Iolko3_6422	2537375,75	+173738,76	64,41	64,08	-0,33	
17 Iolko3_6423	2536081,09	+165809,91	1,19	0,97	-0,22	
18 Iolko3_6425	2534362,28	+165741,97	199,61	199,51	-0,10	
19 Iolko3_6426	2538968,23	+167735,36	62,58	62,17	-0,41	
20 Iolko3_6427	2534562,73	+170788,33	188,08	188,23	0,15	
21 Iolko3_6428	2538920,54	+179575,61	5,19	5,44	0,25	
22 Iolko3_6433	2540200,02	+181180,84	5,23	5,29	0,06	
23 Iolko3_6440	2533165,28	+168095,12	249,10	249,06	-0,04	
24 Iolko3_6441	2533363,96	+164829,29	249,72	249,77	0,05	
25 Iolko3_6443	2531602,08	+171209,52	370,39	369,84	-0,55	
26 Iolko3_6444	2531742,25	+165414,72	322,36	322,31	-0,05	
27 Iolko3_6445	2532779,48	+165045,18	275,65	275,74	0,09	
28 Iolko3_6446	2530304,67	+168677,58	409,09	408,78	-0,31	
29 Iolko3_6447	2531602,06	+163979,81	315,08	314,95	-0,13	
30 Iolko3_6448	2529967,19	+164438,49	357,80	357,63	0,13	
31 Iolko3_6451	2528431,42	+163918,64	450,15	450,40	0,25	
32 Iolko3_6452	2530210,91	+172442,39	516,04	515,46	-0,58	
33 Iolko3_6472	2521735,68	+168078,94	1106,99	1106,87	-0,12	
34 Iolko3_6474	2525741,10	+167781,73	827,79	828,03	0,24	
35 Iolko3_6475	2527707,48	+169638,95	722,54	722,92	0,38	
36 Iolko3_6476	2528832,82	+169785,34	571,89	572,48	0,59	
37 Iolko3_6478	2527302,28	+166485,57	592,10	591,91	-0,19	
38 Iolko3_6484	2530961,04	+165400,61	930,94	921,09	0,15	
39 Iolko3_6485	2525559,26	+169643,88	799,24	798,86	-0,38	
40 Iolko3_6487	2528681,99	+165362,80	446,75	446,91	0,16	
41 Iolko3_6492	2523095,26	+163724,13	711,96	711,85	-0,11	
42 Iolko3_6493	2525857,46	+163808,64	611,80	611,68	-0,12	
43 Iolko3_6494	2532810,03	+163908,95	262,07	262,04	-0,03	
44 Iolko3_6501	2525747,25	+162368,52	533,96	534,25	0,29	
45 Iolko3_6502	2530099,46	+162352,83	346,26	346,23	-0,03	
46 Iolko3_6504	2531919,57	+163733,65	292,72	292,77	0,05	
47 Iolko3_6512	2523322,18	+162452,16	653,13	653,32	0,19	
48 Iolko3_6821	2529147,35	+170729,96	541,09	541,10	0,01	
Media					-0,04 m	
Desvest					0,28 m	

Tabla 2. Listado de puntos de control LiDAR y sus estadísticos básicos.

4.3 Ortofotografía

Al igual que ocurre con los datos LiDAR, las ortofotografías son sometidas a un doble control de calidad durante la realización de la auditoría. Así, se comprueba su calidad posicional absoluta mediante la utilización de una red de puntos de control aportada por el auditor que incluye en torno a 20 puntos por hoja del 1:50.000 y se comprueba también la coherencia entre las ortofotografías y la cartografía existente mediante la superposición de la cartografía sobre la ortofotografía y la comparación de las coordenadas medidas en cada uno de los productos utilizando 30 puntos por hoja 1/50.000.

CONTROLLO QUALITÀ ORTOFOTO						
FOGLIO 625						
PUNTO	X CONTROL	Y CONTROL	X ORTO	Y ORTO	DIFX m	DIFY m
PAF_6442	2535345,28	4165006,20	2535345,27	4165005,99	0,01	0,21
PAF_6495	2535372,68	4163411,17	2535372,59	4163410,96	0,09	0,21
PAF_6505	2534895,67	4162265,11	2534895,88	4162264,81	-0,21	0,30
PAF_6506	2533507,42	4162216,26	2533507,36	4162216,15	0,06	0,11
PAF_6451	2528431,42	4163918,64	2528431,33	4163918,71	0,09	-0,07
PAF_6441	2533363,96	4164829,29	2533364,00	4164829,67	-0,04	-0,38
PAF_6494	2532810,03	4163908,95	2532810,14	4163908,74	-0,11	0,21
PAF_6440	2533165,28	4168095,12	2533165,13	4168094,77	0,15	0,35
PAF_6446	2530304,67	4168677,58	2530304,73	4168677,73	-0,06	-0,15
PAF_6475	2527707,48	4169638,95	2527707,09	4169638,67	0,39	0,28
PAF_6921	2529147,35	4170729,96	2529147,07	4170729,74	0,28	0,22
PAF_6443	2531602,08	4171209,52	2531602,02	4171210,09	0,06	-0,57
PAF_6427	2534562,73	4170788,33	2534562,77	4170788,12	-0,04	0,21
PAF_6474	2525741,10	4167781,73	2525741,29	4167781,81	-0,19	-0,08
PAF_6502	2530099,46	4162352,83	2530099,21	4162352,34	0,25	0,49
PAF_6503	2532014,53	4162145,89	2532013,93	4162146,11	0,60	-0,22
PAF_6447	2531602,06	4163979,81	2531602,17	4163979,26	-0,11	0,55
PAF_6487	2528681,99	4165362,80	2528681,52	4165362,40	0,47	0,40
PAF_6478	2527302,28	4166485,57	2527302,66	4166485,08	-0,38	0,49
PAF_6423	2536081,09	4165809,91	2536080,88	4165809,58	0,41	0,33
media					0,09	0,14
desvest					0,25	0,30

Tabla 3. Listado de puntos de control de ortofotografía y sus estadísticos básicos.

Los datos externos utilizados en cada producto para su control de calidad son conjuntos distintos.

Tras la auditoría los trabajos recibirán tres posibles valoraciones:

- Apto: todo está conforme a lo prescrito.
- Apto con deficiencias leves: hay que corregir algunos elementos.
- No-apto: hay que rehacer todo el trabajo.

5 Resultados

A continuación se presentan los resultados alcanzados durante la realización del proyecto:

5.1. Vuelo combinado

Para la realización del vuelo se emplearon 31 días útiles, consiguiendo una productividad de 677 imágenes por día de vuelo. En este margen de tiempo se capturaron aproximadamente 21.000 fotogramas (canales RGB-Ir y pancromático) dando cobertura LiDAR e imagen a toda la Región Siciliana.

La nube de puntos LiDAR se ha obtenido con un paso de malla inferior a 2 m, cumpliendo con los objetivos marcados al comienzo de los trabajos.

5.2. Georreferenciación

En el proceso de aerotriangulación se han conseguido rendimientos de entre 15 y 20 imágenes/hora, consiguiendo los siguientes resultados en el control de calidad realizado por el cliente mediante comparación con una red de puntos de control independiente:

- $\text{Sigma} < 4 \text{ micras (1/3 píxel)}$
- $\text{RMSE apoyo} < 0,25 \text{ m (GSD nominal)}$
- $\text{RMSE check} < 0,25 \text{ m (GSD nominal)}$
- $\text{Error máximo en los puntos de chequeo} < 0,50 \text{ m (2*GSD)}$

5.3. Modelos digitales de elevaciones

A partir de los datos LiDAR se han obtenido los siguientes productos con 2 m de paso de malla:

- Modelo digital del terreno
- Modelo digital de superficies
- Mapa de intensidades

Los productos obtenidos fueron sometidos a un control de calidad por parte del cliente utilizando puntos de control independientes y puntos utilizados en aerotriangulación. De este modo, se pretende comprobar la homogeneidad entre los modelos digitales y las imágenes digitales (utilización de puntos de aerotriangulación) y la exactitud posicional absoluta de los modelos (puntos de control independientes). Consiguiendo las siguientes precisiones:

- $\text{Error sistemático (media)} = 0,10 \text{ m}$
- $\text{Error aleatorio (desviación estándar)} < 0,30 \text{ m}$

5.4. Ortofotografía

Se han obtenido ortofotografías en color RGB y falso color IrRG con resolución de 0,25 m, consiguiendo rendimientos de 1,5 imágenes por hora (consideramos el proceso completo: ortorrectificación, ajuste de color y mosaico).

Durante la auditoría se realizó un doble control de calidad. El primero de ellos consiste en la proyección de una red de puntos de control independientes sobre las ortofotografías, en este caso se obtuvieron los siguientes resultados:

- $\text{Error sistemático (media)} = 0,17 \text{ m}$
- $\text{Error aleatorio (desviación estándar)} < 0,40 \text{ m}$

El segundo control consiste en la superposición de cartografía existente a escala 1:2.000 sobre las ortofotografías. Los resultados obtenidos en este caso son:

- Error sistemático (media) = 0,40 m
- Error aleatorio (desviación estándar) < 0,60 m

5.5. Actualización de cartografía

En cuanto a la actualización de cartografía, se han conseguido los objetivos planteados logrando mantener un histórico de cambios para futuras aplicaciones de análisis evolutivos. En cuanto a las precisiones obtenidas, el error medio cuadrático en las componentes XYZ es inferior a 3 m, cumpliendo con las especificaciones impuestas por el cliente.

5.6. Control de calidad externo

Como se ha indicado anteriormente, todos los productos generados fueron sometidos a un exhaustivo control de calidad por parte del cliente. Cabe destacar que todos los controles fueron superados con la calificación de apto en primera instancia, no siendo necesario repetir ninguno de los productos ni fases de trabajo.

6 Conclusiones

La metodología desarrollada para este trabajo basada en un vuelo combinado con cámara digital y sensor LiDAR ha demostrado ser idónea para este tipo de trabajos en los que se pretende obtener modelos digitales de terreno y ortofotografías. Esta metodología ha permitido conseguir una cobertura homogénea de todo el territorio regional y obtener productos de alta resolución tanto de modelos digitales de elevaciones como ortofotografías de forma eficiente y competitiva con respecto a las técnicas tradicionales de obtención de modelos de elevaciones por correlación.

Existe una diferencia cualitativa en el producto de los modelos digitales de elevación obtenidos por datos LiDAR. Hasta la fecha, en proyectos de producción de ortofotografía de amplias zonas, el modelo digital de elevaciones era sólo una herramienta para la generación de la ortofotografía. Su precisión y calidad se adaptaba para obtener una posición planimétrica tolerable en la ortofotografía. Siguiendo prescripciones técnicas PNOA [3], para el tamaño de pixel de 0,25 m de ortofoto se establece el límite superior del error medio cuadrático de los modelos digitales del terreno en 0,75 m, con un paso de malla de 5 m. Los modelos digitales obtenidos por LiDAR en este proyecto tienen error estimado de 0,30 m y una resolución de 2 m. Lo cual abre un abanico de aplicaciones adicionales a la obtención de la ortofotografía mucho más amplias.

Por otro lado, la técnica de captura simultánea de imágenes aéreas y datos LiDAR ofrece una información coherente en el tiempo y en el espacio.

Los resultados de la auditoría realizada por el cliente ponen de manifiesto la calidad de los productos generados, consiguiendo la calificación de apto para todos ellos.

Los rendimientos obtenidos en cada una de las fases mejoran considerablemente los que cabría esperar si los modelos digitales se hubiesen realizado mediante técnicas más clásicas de correlación de imágenes, lo que ha permitido reducir considerablemente los plazos de entrega de los trabajos. A esto hay que sumar la reducción de los tiempos de producción que supone la obtención simultánea de las ortofotografías RGB y CIR, se estimado una reducción del 50%.

Estamos en condiciones de afirmar tras la realización de este proyecto, la viabilidad técnica y económica de la utilización conjunta de la información LiDAR e imagen digital capturada de forma simultánea para proyectos de la envergadura del presentada: ortofotografía 0,25m + MDT/MDS + actualización cartográfica en una superficie de 2.578.800 has.

Referencias

- [1] Schenk, T., and B. Csathó, 2002. Fusion of LIDAR data and aerial imagery for a more complete surface description, International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, 34(3A):310-317
- [2] Ackerman, F. (1994); Practical Experience with GPS supported Aerial Triangulation. The Photogrammetric Record.
- [3] PNOA. Plan Nacional de Ortofotografía Aérea de España. Pliego de prescripciones técnicas del año 2007 publicado por el Instituto Tecnológico Agrario de la Junta de Castilla y León.