

CONTROL POSICIONAL DE UN RELEVAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO CON UAV

PROYECTO DE GRADO

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA

Facultad de Ingeniería – Instituto de Agrimensura

Enero – Setiembre 2014

Montevideo - Uruguay



Autoras: Verónica Pampinella – Melissa Pérez
Tutor: MSc. Rosario Casanova

1 AGRADECIMIENTOS

Nos gustaría que estas primeras líneas sirvieran para expresar nuestro más profundo y sincero agradecimiento a todas aquellas personas que con su ayuda han colaborado en la realización del presente trabajo, en especial a la MSc. Rosario Casanova, tutora del proyecto, por su orientación, motivación, seguimiento y supervisión durante todo el proceso.

Agradecer también al Ing. Agrim. Patricio Birriel y al Ing. Raúl González de la empresa UAV-Agrimensura Birriel & González por su disposición e interés durante todo el proyecto, así como por habernos brindado buena parte de los insumos requeridos en la investigación. Agradecer además a la empresa Doniral S.A. por permitirnos disponer de sus instalaciones.

Especiales agradecimientos para el Ing. William Kim por su ayuda en los momentos difíciles de la investigación.

También agradecer a Gisselle Maine, Karina Tejera, Marcelo Pampinella y Gloria Rodríguez, por su contribución, y en especial Bruno Silveira por habernos acompañado en las instancias iniciales de la investigación.

Finalmente nos gustaría dar las gracias a nuestras familias y amigos por la paciencia, la comprensión y el ánimo recibido, en especial a Pamela Fernández y Andrés Urrutia.

ÍNDICE

1	Agradecimientos	1
2	Resumen.....	6
3	Introducción	7
4	Objetivo general.....	7
5	Desarrollo del proyecto.....	7
5.1	Introducción	7
5.2	Etapas del proyecto.....	8
5.2.1	Eta 1: Estudio previo al vuelo	8
5.2.2	Eta 2: Vuelo y relevamiento de campo	8
5.2.3	Eta 3: Procesamiento de datos.....	9
5.2.4	Eta 4: Determinación de la calidad posicional	9
5.2.5	Eta 5: Resultados y análisis.....	9
5.2.6	Eta 6: Conclusiones y reflexiones	9
6	Eta 1: Estudio previo al vuelo	10
6.1	Introducción	10
6.2	Objetivo específico	10
6.3	Zona de vuelo	10
6.3.1	Canteras del Parque Rodo	11
6.3.2	Estacionamiento del Estadio Centenario	12
6.3.3	Depósito sobre Ruta Nacional Nº 101.....	13
6.4	Plan de vuelo	14
6.4.1	Introducción	14
6.4.2	Elaboración.....	14
6.4.3	Resultado.....	15
6.5	Calibración de la cámara	16
6.5.1	Justificación	16
6.5.2	Referencia de los parámetros	17
6.6	Criterio para selección de puntos	18
6.6.1	Estándares	18
6.6.2	Aerotriangulación.....	23
6.7	Señalización.....	25
6.7.1	Justificación	25
6.7.2	Forma y tamaño	25
6.7.3	Decisión	26
6.8	Relevamiento topográfico.....	28

6.8.1	Desviaciones máximas admisibles	28
6.8.2	Número de puntos a relevar	28
6.8.3	Distribución de los puntos.....	28
6.8.4	Materialización de los puntos	29
6.8.5	Relevamiento planimétrico	29
6.8.6	Relevamiento altimétrico.....	31
7	Etapa 2: Vuelo y relevamiento de campo	33
7.1	Introducción	33
7.2	Objetivo específico	33
7.3	Preseñalización en el terreno.....	33
7.3.1	Generalidades	33
7.3.2	Observaciones	35
7.4	Relevamiento Fotogramétrico	35
7.4.1	Generalidades	35
7.4.2	Vuelo a 40 m.....	35
7.4.3	Vuelo a 100 m.....	36
7.4.4	Observación.....	37
7.5	Relevamiento topográfico.....	37
7.5.1	Relevamiento Planimétrico	37
7.5.2	Relevamiento Altimétrico	38
8	Etapa 3: Procesamiento de los datos	39
8.1	Introducción	39
8.2	Objetivo específico	39
8.3	Procesamiento de datos de campo.....	39
8.3.1	Datos topográficos	39
8.3.2	Imágenes: Generación del fotoíndice	43
8.4	Obtención del producto a testear	44
8.4.1	Proceso de restitución.....	44
8.4.2	Resultado.....	53
9	Etapa 4: Determinación de la calidad posicional	54
9.1	Introducción	54
9.2	Objetivo específico	54
9.3	Requerimientos previos	54
9.3.1	Justificación	54
9.3.2	Distribución espacial de los puntos de control	54
9.3.3	Aleatoriedad: Test de rachas.....	55

9.3.4	Normalidad: Test Kolmogrov Smirnov.....	57
9.3.5	Síntesis de los requerimientos previos	59
9.4	Calidad en términos absolutos.....	59
9.4.1	Aplicación del estándar	59
9.4.2	Enunciado del resultado.....	60
9.5	Calidad en términos relativos.....	60
9.5.1	Justificación	60
9.5.2	Fundamente teórico.....	60
9.5.3	Valores obtenidos	61
10	Etapa 5: Resultados y análisis.....	62
10.1	Introducción	62
10.2	Objetivo específico	62
10.3	Reseña de las condiciones del testeo.....	62
10.4	Resultados en términos absolutos	63
10.4.1	Parámetros obtenidos.....	63
10.5	Resultado en términos relativos	64
10.6	Análisis.....	64
10.6.1	Análisis de las magnitudes de los residuales.....	64
10.6.2	Análisis de la dirección de los residuales	73
10.6.3	Análisis espacial de los residuales.....	75
10.6.4	Análisis del procedimiento de restitución.....	82
11	Etapa 6: Conclusiones y reflexiones.....	84
12	Bibliografía	86
13	Glosario	87
14	Índice de imágenes.....	89
15	Índice de tablas	92
16	Anexos.....	94
16.1	Anexo: Microdrone MD4 - 1000 ⁰	95
16.1.1	Introducción	95
16.1.2	Generalidades	95
16.1.3	Aplicaciones.....	96
16.1.4	Especificaciones técnicas	97
16.1.5	Otras características.....	98
16.2	Anexo: Cámara Sony NEX-7.....	99
16.2.1	Generalidades	99
16.2.2	Construcción y diseño	100

16.2.3	Funcionamiento	102
16.3	Anexo: Plan de vuelo	103
16.3.1	Definiciones:.....	103
16.3.2	Diseño del vuelo	103
16.3.3	Factores influyentes en el vuelo.....	109
16.4	Anexo: Certificado de calibración utilizado en el proyecto	113
16.5	Anexo: Restitución	114
16.5.1	Generalidades	114
16.5.2	Fases de la restitución	114
16.5.3	Orientación interior.....	115
16.5.4	Orientación exterior	116
16.6	Anexo: Posicionamiento GPS	117
16.6.1	Fundamentos.....	117
16.7	Anexo: Coordenadas replanteadas	123
16.8	Anexo: Tratamiento de datos topográficos	125
16.8.1	Relevamiento planimétrico.....	125
16.8.2	Relevamiento altimétrico.....	129
16.9	Anexo: Coordenadas definitivas relevadas topográficamente	137
16.10	Anexo: Procedimiento de restitución LPS- ERDAS	139
16.10.1	Resumen.....	139
16.10.2	Desarrollo	139
16.11	Anexo: Coordenadas definitivas relevadas con procedimientos fotogramétricos.....	157
16.12	Anexo: Cálculos asociados a los requerimientos previos del estándar NSSDA.....	158
16.12.1	Test de rachas.....	158
16.12.2	Construcción de la función empírica: Test Kolmogorov Smirnov	160
16.13	Anexo: Cálculos referentes a la calidad posicional relativa	162
16.13.1	Insumo.....	162
16.13.2	Planimetría	163
16.13.3	Altimetría.....	167
16.14	Anexo: Cálculos asociados al análisis de la dirección de los residuales	172

2 RESUMEN

El presente informe se realiza en el marco de la asignatura *Proyecto* de la carrera de Ingeniero Agrimensor, dictada por la Facultad de Ingeniería, Udelar. En éste, se reseñan las actividades desarrolladas desde enero a setiembre de 2014.

En esta investigación, se efectuó el control de calidad posicional de un relevamiento fotogramétrico realizado con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). La temática abordada constituye una metodología innovadora en el país, cuya aplicación está siendo ampliamente difundida por sus bajos costos en comparación con la fotogrametría tradicional.

Luego de realizar los análisis correspondientes, se optó por aplicar de forma estricta el estándar NSSDA para evaluar la calidad. Por ello, fue necesario realizar un relevamiento topográfico de alta precisión aplicando el método de radiación en planimetría y de nivelación geométrica en altimetría. Para estas tareas se utilizó la estación total Leica 407 y el nivel automático Pentax.

Tanto los puntos utilizados para controlar la calidad, como los puntos de control empleados en el proceso de restitución fueron preseñalizados en campo; los mismos fueron replanteados con GPS y materializados con aerosol.

La restitución fotogramétrica de referencia fue realizada por las autoras, utilizando la aplicación del restituidor fotogramétrico digital *LPS* del programa *ERDAS IMAGINE*, versión 2013. Esta tarea implicó el aprendizaje del uso de estas herramientas y particularmente su aplicación a vuelos fotogramétricos no convencionales.

Los insumos utilizados han sido imágenes digitales aéreas (capturadas con una cámara digital no métrica Sony NEX-7 montada en un vehículo aéreo no tripulado Microdrone md4-1000), la estación total Leica 407, el nivel automático Pentax, el GPS Trimble R8 y el restituidor fotogramétrico *LPS*.

Finalizado el análisis comparativo de las coordenadas determinadas en campo y las coordenadas obtenidas por procedimientos fotogramétricos, se obtuvieron buenos precisiones lo que abre las puertas a múltiples aplicaciones de los UAV vinculadas a la Agrimensura.

3 INTRODUCCIÓN

En el presente informe se exponen las actividades desarrolladas en el marco de la asignatura Proyecto de la carrera de Ingeniero Agrimensor de la Universidad de la República del Uruguay.

Corresponde a la investigación realizada por las estudiantes de la carrera de Ingeniero Agrimensor Verónica Pampinella y Melissa Pérez, bajo la tutoría de la MSc. Rosario Casanova, iniciada en enero de 2014 y finalizada en setiembre del mismo año.

El objetivo principal de la asignatura es concluir el recorrido de las estudiantes en la carrera, obteniendo así el título de grado correspondiente.

4 OBJETIVO GENERAL

Obtener mediante el proceso de restitución fotogramétrica las coordenadas tridimensionales de puntos en una zona relevada con un vuelo fotogramétrico no tradicional.

Evaluar la calidad posicional del resultado obtenido en el proceso de restitución. Dicho producto está determinado por las siguientes particularidades:

- Vuelo realizado con un vehículo aéreo no tripulado: Microdrone md4-1000. ⁽¹⁾
- Imágenes capturadas con una cámara digital no métrica: Sony NEX-7. ⁽²⁾
- Altura de vuelo relativa: 40 m y 100 m aproximadamente. ⁽³⁾
- Software empleado en la restitución: LPS – ERDAS IMAGINE 2013.

5 DESARROLLO DEL PROYECTO

5.1 INTRODUCCIÓN

La idea de este proyecto surgió a partir de la asistencia de los integrantes del grupo a la presentación realizada por el Ing. Agrim. Patricio Birriel en el primer semestre del 2013 en la Facultad de Ingeniería - UdelaR. En ella presentó una nueva tecnología conocida como drone, que pertenece al conjunto de UAVs (*Unmanned Aerial Vehicle* – Vehículos aéreos no tripulados).

Básicamente un drone, también conocido como VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), es una pequeña aeronave a control remoto a la cual se pueden incorporar diferentes sensores remotos, en particular una cámara fotográfica digital no métrica.

En los últimos años se ha extendido el campo de aplicaciones de esta tecnología, incluyendo por ejemplo usos en seguridad, monitoreo de incendios, entre otras. Particularmente, el equipo presentado pertenece a la empresa UAV - Agrimensura Birriel & González y es uno de los primeros traídos al Uruguay con fines topográficos.

⁽¹⁾ Ver 16.1. Anexo: Microdrone md4 - 1000.

⁽²⁾ Ver 16.2. Anexo: Cámara Sony NEX-7.

⁽³⁾ Como consecuencia de los plazos inherentes a la asignatura Proyecto no fue posible realizar la restitución del vuelo a 40 m.

Según planteó el Ingeniero, los productos que genera, tales como modelos digitales de elevaciones (MDE), ortofotos y ortomosaicos, tienen precisiones muy buenas en relación a los costos de adquisición, constituyendo una alternativa a los procedimientos fotogramétricos tradicionales.

La posibilidad de testear dichos resultados, así como la oportunidad de trabajar con tecnología de punta generó especial interés en el grupo. Es por ello que se decidió emprender el presente proyecto de fin de carrera de Ingeniero Agrimensor en el área de la Geomática.

5.2 ETAPAS DEL PROYECTO

En el presente apartado se describen brevemente las diferentes etapas realizadas en el proyecto, que serán posteriormente desarrolladas en los capítulos respectivos.

- Etapa 1: Estudio previo al vuelo.
- Etapa 2: Vuelo y relevamiento de campo.
- Etapa 3: Procesamiento de datos.
- Etapa 4: Determinación de la calidad posicional.
- Etapa 5: Resultados y análisis.
- Etapa 6: Conclusiones y reflexiones.

5.2.1 Etapa 1: Estudio previo al vuelo

En términos generales, el estudio compara las coordenadas obtenidas mediante procesos fotogramétricos, con coordenadas de los mismos puntos relevados con métodos topográficos tradicionales.

Es por ello que se identifican las siguientes áreas de estudio que serán abordadas:

- Vuelo fotogramétrico.
- Relevamiento de campo.
- Métodos de testeo.

El primer paso es determinar el espacio físico sobre el que se va a volar, el cual involucra a los dos primeros campos mencionados. Pues conjuntamente con el área del vuelo es necesario estudiar el plan de vuelo, la calibración de la cámara, la teoría de aerotriangulación, la distribución de puntos de control y su correspondiente preseñalización.

En lo que refiere a relevamiento de campo, hay que determinar la metodología a emplear para alcanzar las precisiones necesarias para el testeo, así como también la materialización de los puntos a medir.

Por último, se determinará qué criterio de testeo será utilizado para la comparación de coordenadas obtenidas del modelo fotogramétrico con las coordenadas de campo.

5.2.2 Etapa 2: Vuelo y relevamiento de campo

Esta etapa comprende la captura de datos in situ. Así pues, una vez realizado el análisis teórico, se procede a la realización del vuelo fotogramétrico y el relevamiento de campo correspondiente.

5.2.3 Etapa 3: Procesamiento de datos

En esta etapa se pueden distinguir dos grupos de tareas:

1. Procesamiento de los datos de campo.

En esta etapa intervienen todas las tareas vinculadas al tratamiento de los datos crudos capturados en la etapa anterior. Dichas tareas son:

- Extracción de las coordenadas finales relevadas con métodos topográficos clásicos.
- Definición de cuáles imágenes se utilizan para la restitución.
- Generación de fotoíndices en base a los vuelos efectivos.

Los productos finales obtenidos en esta instancia han de constituir los insumos básicos de la instancia siguiente.

2. Obtención del producto a testear.

Bajo este título se identifican las tareas asociadas al tratamiento simultáneo de las imágenes y de las coordenadas topográficas finales de los puntos de control.

De esta forma, en esta instancia de la investigación se busca obtener las coordenadas planialtimétricas (X, Y, Z) de todos los puntos del modelo.

5.2.4 Etapa 4: Determinación de la calidad posicional

En esta etapa el lector encontrará los cálculos asociados a la calidad posicional del producto del relevamiento fotogramétrico de referencia.

5.2.5 Etapa 5: Resultados y análisis

Aquí se presentan, de forma sintética y ordenada, los parámetros de calidad obtenidos en la etapa anterior.

Donde se analizan desde distintas perspectivas los vectores residuales, con especial énfasis en la distribución espacial de los mismos.

Finalmente, se expone un breve análisis de las tareas que intervienen en la generación del producto fotogramétrico.

5.2.6 Etapa 6: Conclusiones y reflexiones

Bajo este título se cierra el estudio, dando cumplimiento al objetivo central de la investigación. También se incluyan reflexiones personales, aplicaciones compatibles con las precisiones calculadas y posibles líneas futuras de investigación.

6 ETAPA 1: ESTUDIO PREVIO AL VUELO

6.1 INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la presente etapa, se encuentran los grandes pilares teóricos que hacen posible la realización del vuelo fotogramétrico y relevamiento topográfico en condiciones óptimas. En este sentido se responden preguntas clave, como ser:

- ¿En dónde se va a realizar el vuelo?
- ¿Cómo se va a volar?
- ¿En qué condiciones geométricas se encuentra la cámara?
- ¿Cuántos puntos se van a señalar y relevar topográficamente?
- ¿Cómo van a estar distribuidos los puntos en el terreno?
- ¿Con qué criterio se van a controlar el producto de la restitución?
- ¿Cómo se va a señalar y relevar?

6.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Definir todas las variables que intervienen en los relevamientos, para dar respuesta a las preguntas precedentes. Planificando las actividades, a efectos de evitar equivocaciones en campo.

6.3 ZONA DE VUELO

Es importante que la zona de vuelo permita realizar tanto el vuelo sin imprevistos, como el relevamiento topográfico sin mayores dificultades. Por ello, se definió un grupo de características para valorar las posibles zonas de vuelo:

- *Accesibilidad*: El acceso al área debe ser posible, dado que el grupo debe realizar la preseñalización de los puntos y su posterior relevamiento. Esto implica al menos dos días de trabajo, no necesariamente consecutivos.
- *Visibilidad aérea*: Es importante que la zona no cuente con áreas en las cuales sea imposible observar el suelo desde la vista aérea.
- *Visibilidad terrestre*: Dado que se realiza un relevamiento topográfico de alta precisión ⁽⁴⁾, es importante que el área sea medida desde la menor cantidad de estaciones posibles.
- *Área*: Dado que se realizarán dos vuelos a alturas diferentes (40 y 100 m) es necesario contar con un área mínima que dé lugar a la generación de pares estereoscópicos.
- *Superficie*: Como la precisión del relevamiento está influenciada por el tipo de superficie del terreno, es importante diferenciar aquellas superficies rígidas como el hormigón de superficies menos estables como el césped.

A continuación se presentan las zonas que se tuvieron en cuenta para realizar el vuelo, analizando sus ventajas y desventajas.

⁽⁴⁾ Bajo el título 6.8. *Relevamiento topográfico* se analiza la precisión requerida por el relevamiento de campo.

6.3.1 Canteras del Parque Rodó

Se consideró en primera instancia la zona cercana al Teatro de Verano de la ciudad de Montevideo.

Véase en la ilustración siguiente la zona tentativa considerada, la cual se encuentra delimitada por una poligonal roja.



Ilustración 1: Zona tentativa: Canteras del Parque Rodó.-(5)

La zona seleccionada incluye:

- *Vías de circulación vehicular:* El área abarca parte de la Rambla Presidente Wilson y de la Avenida Dr. Juan A. Canchón; en ambas la circulación vehicular es continua y de alta velocidad.
- *Una importante elevación:* Al norte de la zona, el terreno presenta un desnivel de 8 m con respecto a la rambla (pendiente aproximada 26%). Por otra parte, para acceder al punto más alto es necesario recorrer una senda envolvente. La elevación está rodeada por palmeras de gran porte.
- *Explanada:* Al sur de la zona, existe una explanada de tierra con algunos árboles espaciados en ella. Esta zona es utilizada en muchos casos como estacionamiento de vehículos.

Se detectaron las siguientes ventajas y desventajas de la zona:

- *Ventajas:*
 - El área se encuentra muy próxima a la Facultad de Ingeniería, lo cual simplifica los traslados.
 - Esta área forma parte del conjunto de propiedades del Estado destinadas al uso público. Es por ello que no se requiere la solicitud de autorización para su acceso.
- *Desventajas:*
 - Al existir en la zona dos vías de tránsito en la cuales la circulación es continua y de alta velocidad, se pueden generar inconvenientes tanto para la preseñalización de los puntos, como para su medición.
 - Puede ocurrir que al momento de realizar el vuelo, alguna marca quede tapada por vehículos.
 - La gran pendiente que posee la zona puede generar complicaciones a la hora de realizar la mensura de los puntos. Hay que tener en cuenta que la medición debe alcanzar altas precisiones y el desnivel puede constituir un gran obstáculo.

⁽⁵⁾ Fuente: Google Earth.

- La elevada cantidad de árboles reduce el suelo visible desde la visual del drone.

Realizado este análisis, se puede observar que las desventajas que posee la zona son difíciles de subsanar, por ello se considera oportuno descartarla.

6.3.2 Estacionamiento del Estadio Centenario

Debido a que la primera zona que se consideró no fue una buena elección, se procedió a la búsqueda de una nueva área de vuelo.

La nueva zona a analizar se ubica al noreste del Instituto Superior de Educación Física de Montevideo (ISEF).

Véase a continuación, en la ilustración 2 la zona remarcada por una poligonal verde:



Ilustración 2: Zona tentativa: Estacionamiento del Estadio Centenario.- ⁽⁶⁾

Esta nueva zona incluye:

- *Dos canchas de fútbol:* Ambas tienen piso de tosca, la del sur corresponde a la cancha de Baby futbol de Rayo Rojo y la otra es de Baby Futbol Mirador Rosado.
- *Vía de circulación vehicular:* Parte de la Avenida Federico Videla pasa por la zona de interés. Esta vía de circulación posee una curvatura importante, los niveles de tránsito son bajos y los vehículos la transitan a velocidades elevadas.
- *Explanada:* El área más importante de la zona está cubierta por una gran explanada de material asfáltico. Allí es donde se efectúan las pruebas de manejo por parte de la Intendencia de Montevideo (I.M.), así como las prácticas de manejo de las Academias de Choferes. Esta zona es gestionada por el departamento de Movilidad, División Tránsito y Transporte de la I.M.

Véase a continuación el análisis de ventajas y desventajas que presenta esta nueva zona.

- *Ventajas:*
 - El área puede ser considerada una gran explanada sin variaciones significativas de nivel, lo cual es adecuado para la obtención de las precisiones planialtimétricas buscadas en el relevamiento topográfico.
 - No hay objetos que oculten el suelo desde la visual aérea, lo cual permite distribuir los puntos preseñalizados en los lugares deseados.

⁽⁶⁾ Fuente: Google Earth.

- La visibilidad a nivel terrestre es muy buena, por lo que con pocas estaciones se puede relevar la totalidad de los puntos.
- Desventajas:
 - Al ser parte del área un predio municipal, es necesario solicitar permiso para su uso, excepto los fines de semana, en los cuales el ingreso no está restringido.
 - Durante la semana se realizan las pruebas de manejo desde las 7:30 am hasta las 4:00 pm y posteriormente las distintas academias de choferes se presentan en el lugar con el fin de practicar, esto dificulta la tarea de medición así como la toma de las imágenes aéreas.
 - Considerando la alternativa de realizar las tareas durante el fin de semana, se corre el riesgo de que las canchas de futbol estén siendo utilizadas. Además, en el caso de haber partido en el Estadio Centenario, el área funciona como estacionamiento, imposibilitando cualquier actividad.

En primera instancia se procedió a solicitar la autorización pertinente a la I.M. para ingresar al predio un día hábil y poder realizar las tareas de señalización, vuelo y relevamiento. La misma fue rechazada.

Luego del rechazo de la I.M., se manejó la alternativa de realizar las tareas un fin de semana. El grupo se trasladó hasta el área un sábado en la mañana para analizar el método de relevamiento, la distribución de las estaciones, etc. Estando allí se pudo observar que la cantidad de vehículos era elevada, lo cual constituye un impedimento para poder realizar las tareas asociadas a la investigación.

Debido a que la autorización Municipal no fue obtenida y la alternativa encontrada contaba con grandes inconvenientes, se optó por eliminar esta zona pese a sus ventajas.

6.3.3 Depósito sobre Ruta Nacional Nº 101

Como el acceso a la zona antes considerada fue negado, al evaluar la nueva zona es un aspecto fundamental el libre acceso. Así surge el depósito ubicado en la Ruta Nacional Nº 101, propiedad de la empresa Doniral S.A.

Véase a continuación en la ilustración 3, la zona de referencia enmarcada por una poligonal amarilla.



Ilustración 3: Zona tentativa: Depósito Ruta Nacional Nº101.- ⁽⁷⁾

⁽⁷⁾ Fuente: Google Earth.

Esta zona incluye:

- *Explanada de hormigón*: Correspondiente al estacionamiento del depósito.
- *Vía de circulación vehicular*: De balasto, con bajos niveles de tránsito.
- *Pradera natural*: Corresponde a la mayor superficie de la zona.

Véase a continuación las ventajas y desventajas encontradas:

- **Ventajas:**
 - Libre acceso a la zona durante los fines de semana.
 - No existen desniveles significativos que puedan dificultar el relevamiento topográfico.
 - La zona en general tiene niveles bajos de tránsito y poca densidad de árboles, por lo que todas las marcas preseñalizadas serían visibles en las imágenes aéreas.
- **Desventajas:**
 - La lejanía del predio respecto a la ciudad de Montevideo.

En primera instancia el equipo de trabajo se dirigió al lugar para evaluar la topografía, el estado del pasto, el estado del hormigón, etc.

Posteriormente se solicitó la autorización correspondiente en una entrevista personal con el Gerente de la empresa. Concedida ésta, se definió el depósito de la empresa Doniral S.A. como la zona de estudio.

6.4 PLAN DE VUELO

6.4.1 Introducción

El plan de vuelo es el estudio y análisis efectuado previo al vuelo, en el cual se diseña la trayectoria a seguir por el dron (u otro vehículo aéreo), de forma de cubrir la zona del terreno deseada, en las condiciones estipuladas. En el 16.3. Anexo: Plan de vuelo, se desarrolla con mayor detalle la teoría asociada al diseño del plan de vuelo.

6.4.2 Elaboración

Si bien la planificación del vuelo puede resolverse de forma manual, para la confección del plan la empresa UAV - Agrimensura Birriel & González utiliza el software *mdCockpit*, especialmente desarrollado para optimizar el rendimiento del dron.

Dicho software es de uso muy sencillo y posee un entorno interactivo en el cual se puede observar el diseño del plan de vuelo. Tomando como apoyo Google Earth, se visualiza el área que cubre cada imagen y la ubicación del dron en cada una de las tomas.

En el programa se incorporan las condiciones a cumplir por el vehículo aéreo, de manera tal de obtener la imágenes de la forma deseada. Véase a continuación los parámetros configurados en el software:

- Cámara: Sony NEX-7.
- Distancia Focal: 16 mm
- Tamaño de la fotografía: 23.50 x 15.60
- Altura relativa de vuelo: 40 m y 100m.
- Velocidad:
 - Horizontal: 10 m/s
 - Vertical: 2 m/s

- Solapamiento:
 - Longitudinal: 65%
 - Transversal: 25%
- Detención por punto de toma: Sí. ⁽⁸⁾
- Tiempo de detención: 3s. ⁽⁹⁾
- Capturar nueva imagen en caso de movimiento: Sí. ⁽¹⁰⁾

Una vez diseñado el vuelo, el programa estima:

- La cantidad de fotos a ser tomadas.
- La duración del vuelo.
- La cantidad de tramos, entendiendo por tramo el número de líneas de vuelo.
- Las coordenadas geográficas de los puntos de toma de las imágenes.

6.4.3 Resultado

De forma ilustrativa, a continuación se presentan los planes de vuelo diseñados sobre una imagen extraída de Google Earth.

En ella se observa:

- El lugar de toma de cada imagen, indicado con el símbolo 📍
- Un estimativo del área que abarcará cada imagen, indicado con un polígono de color azul.
- El camino que seguirá el drone, indicado con una línea de color rojo

6.4.3.1 Plan de vuelo para altura relativa de 40 m

Haciendo uso del software antes mencionado y considerando la configuración indicada, se obtiene como resultado un plan de un vuelo con las características siguientes:

- 2 líneas de vuelo.
- 10 fotografías, 5 en cada línea de vuelo.

Véase a continuación la ilustración 4, en el cual se muestra el plan de vuelo diseñado.



Ilustración 4: Plan de vuelo diseñado para el vuelo a 40m. - ⁽¹¹⁾

⁽⁸⁾ El drone se detiene para tomar cada fotografía

⁽⁹⁾ Al llegar al punto de toma, el drone se detiene, aguarda 3s y captura la imagen

⁽¹⁰⁾ En caso de que el drone haya detectado movimientos en el momento de la toma, captura automáticamente más imágenes.

⁽¹¹⁾ Fuente: Google Earth.

6.4.3.2 Plan de vuelo para altura relativa de 100 m

De la elaboración de este plan de vuelo, se obtuvo como resultado:

- Una única línea de vuelo.
- 3 fotografías.

Véase a continuación la ilustración 5, en la cual se muestra el plan de vuelo diseñado.



Ilustración 5: Plan de vuelo diseñado para el vuelo a 100m.-⁽¹²⁾

6.5 CALIBRACIÓN DE LA CÁMARA

6.5.1 Justificación

En la actualidad, existen en el mercado una gran variedad de cámaras digitales no métricas que son utilizadas con fines fotogramétricos además del uso amateur. Estas cámaras poseen buena calidad radiométrica, pero mala calidad geométrica.

Para emplear este tipo de cámaras en relevamientos fotogramétricos, es necesario realizar previamente la calibración correspondiente.

En lo que refiere a este proyecto, la calibración es realizada por el propio Ing. Agrim. Birriel, el cual utiliza el programa “Camera Calibration Software”, de la compañía TOPCON.

El procesamiento del software se basa en el uso de fotografías tomadas de un patrón impreso desde diferentes ángulos. Dicho patrón consiste en una imagen con más de 100 puntos preseñalizados. Las imágenes son ingresadas al programa (*inputs*). Este programa resuelve las ecuaciones de colinealidad para obtener los parámetros buscados.

Los resultados (*outputs*) son los parámetros que luego se utilizan para la orientación interna en el proceso de restitución.

Una vez finalizado el proceso de calibración, es posible conocer la magnitud asociada a los siguientes ocho parámetros, conocidos como parámetros intrínsecos de la cámara:

⁽¹²⁾ Fuente: Google Earth.

- *Distancia Focal calibrada*..... f
- *Distorsión de las lentes en sentido Radial*..... K_1, K_2, K_3
- *Distorsión de las lentes en sentido Tangencial*..... P_1, P_2
- *Coordenadas del Punto Principal de la Cámara*..... X_p, Y_p

Además de los parámetros mencionados el programa también calcula las coordenadas de las marcas fiduciales, que corresponden a los píxeles vértices de la imagen.

En 16.4. *Anexo: Certificado de calibración utilizado en el proyecto* se adjunta una copia del certificado de calibración de la cámara utilizado en la presente investigación.

6.5.2 Referencia de los parámetros

6.5.2.1 Distancia focal calibrada

La distancia focal es la distancia medida a lo largo del eje óptico desde el nodo posterior del lente al plano imagen de mejor definición.

La distancia focal que se obtiene en el proceso de calibración es la denominada distancia focal calibrada, que puede diferir de la indicada por el fabricante.

6.5.2.2 Distorsiones geométricas

Todos los objetivos fotográficos convencionales producen en mayor o menor medida distorsiones geométricas como son la distorsión radial y la tangencial.

- *Distorsión radial*: Es un tipo de aberración que origina que las líneas rectas aparezcan como curvas en la fotografía, debido a la desalineación que sufren los rayos al atravesar las distintas lentes. Los componentes simétricos de la distorsión radial ocurren a lo largo de las líneas radiales con centro en el punto principal de mejor simetría.
- *Distorsión tangencial*: Se debe a las imperfecciones en la construcción y posicionamiento del conjunto de lentes, que produce la no coincidencia de los centros de curvatura de la lente con el eje óptico.

En las lentes modernas, el efecto de distorsión tangencial es pequeño comparado con la distorsión radial.

6.5.2.3 Coordenadas del punto principal de la cámara

Para el caso de las cámaras analógicas, el punto principal es el punto determinado por la proyección ortogonal del centro de proyección sobre el plano del negativo. Las coordenadas de este punto son (x_p, y_p) , que generalmente difieren del centro geométrico del negativo.

Para el caso de la cámara digital, en lugar del plano de negativo hay un grupo de sensores, y el resultado de la ubicación del punto principal será la posición de un pixel.

6.6 CRITERIO PARA SELECCIÓN DE PUNTOS

6.6.1 Estándares

6.6.1.1 Generalidades

Recuérdese que el objetivo del presente proyecto es evaluar la exactitud posicional de dos relevamientos fotogramétricos no tradicionales realizados a alturas de vuelo diferentes:

- Altura de vuelo relativa a 40m (tamaño de píxel en el terreno según proveedor: 1.0 cm).
- Altura de vuelo relativa a 100m (tamaño de píxel en el terreno según proveedor: 2.5 cm).

Es necesario adoptar una manera de medir y reportar la calidad posicional de un conjunto de datos geográficos, haciendo posible el análisis cuantitativo de los resultados. Es importante tener en cuenta que la exactitud posicional se define en la norma ISO 19113, como la exactitud alcanzada en la componente posicional de los datos.

En el apartado siguiente se presentan los principales lineamientos de algunas metodologías de análisis, según lo establecen Ariza J. & James A. (*Metodologías de control posicional: visión general y análisis crítico*, 2006), desarrollándose en mayor profundidad el método a utilizar.

6.6.1.2 Métodos de análisis espacial

EMAS -1983 ⁽¹³⁾:

El método se formula como una batería de cuatro test, que han de superarse de manera conjunta para considerar que una base de datos satisface al estándar.

En términos generales, el test se caracteriza por los siguientes aspectos:

- Escalas: Mayores a 20.000.
- Tamaño de la muestra: 20 puntos.
- Relación de precisiones (método de contraste – método a controlar): 3X.
- Expresión final: Acepta / rechaza los datos.
- Críticas: Como cada uno de los test que compone el EMAS tiene un nivel de significancia α , el nivel global de significancia es 4α . Esto supone que el error de tipo I se incrementa soberanamente siendo necesario aplicar correcciones ⁽¹⁴⁾; pero en el documento original no se hace referencia alguna al respecto.

NMAS – 1947 ⁽¹⁵⁾:

Es un método de control que permite detectar sistematismos previo al análisis. Aspectos característicos:

- Desarrollo teórico-estadístico en el texto oficial: Bajo.
- Escalas: No se especifica.
- Tamaño de la muestra: No se especifica.
- Relación de precisiones: No se especifica.

⁽¹³⁾ *Engineering map accuracy standard*.

⁽¹⁴⁾ El error tipo I es el error que se comete cuando el investigador no acepta la hipótesis nula, siendo esta verdadera en la población.

⁽¹⁵⁾ *National map accuracy*

- Expresión: Acepta / rechaza los datos.
- Críticas: Si bien el estándar NMAS es de muy simple aplicación, en la actualidad ha sido sustituido por el NSSDA.

STANAG – 2002 ⁽¹⁶⁾:

Es un método de control muy riguroso, cuyo documento presenta un extenso fundamento estadístico. Aspectos característicos:

- Escalas: Menores a 25.000.
- Tamaño de la muestra: 167 puntos.
- Relación de precisiones: 5X.
- Expresión: Código.
- Críticas: Su aplicación requiere una cantidad significativa de tiempo, así como de otros recursos.

NSSDA - 1998 ⁽¹⁷⁾:

Es el estándar de mayor difusión en la actualidad, es de aplicación simple y permite valorar cuantitativamente la base de datos. Aspectos característicos:

- Escalas: No se especifica.
- Tamaño de la muestra: 20 puntos.
- Relación de precisiones: 3X.
- Expresión: Frase (incluye el porcentaje de precisión posicional).
- Críticas: No permite detectar sesgos.

6.6.1.3 Estándar a aplicar: NSSDA

Analizando los aspectos teóricos de los diferentes métodos, se optó por aplicar el *National Standard for Spatial Data Accuracy* (NSSDA). Dicho estándar resulta ventajoso por la cantidad de puntos que requiere, así como por su simple aplicación.

6.6.1.3.1 Generalidades

El estándar utilizado en la presente investigación se establece en el *Manual de Exactitud Posicional* (1999) realizado por Minnesota Planning. Título original: *Positional Accuracy Handbook -Using the National Standard for Spatial Data Accuracy to measure and report geographic data quality*. En este se desarrolla la metodología de análisis de datos que se presenta a continuación.

6.6.1.3.2 Etapas

La aplicación del estándar puede resumirse en las siguientes etapas:

1. Identificación de las componentes del testeo: Componentes horizontales (X, Y) o componentes horizontales y verticales (X, Y, Z).
2. Selección de puntos de prueba del conjunto de datos.
3. Selección de datos independientes de mayor precisión que se correspondan con el conjunto de datos evaluados.
4. Recolección de mediciones de puntos idénticos provenientes de ambas fuentes.
5. Cálculo de los estadísticos asociados a la precisión posicional.

⁽¹⁶⁾ *Standard agreement from the North Atlantic Treaty Organization*

⁽¹⁷⁾ *National Standard for spatial data accuracy*

6. Presentación estandarizada de los resultados en formato reporte.

1. IDENTIFICACIÓN DE LAS COMPONENTES DEL TESTEO

La identificación de las componentes es el punto de partida de la aplicación de NSSDA, dado que determina la planilla de cálculo que se utiliza. Ver tablas 1 y 2.

[illegible]

Tabla 1: Planilla de cálculo asociada a un estudio de precisión planimétrico.-

Nombre del pto.	Descripción del pto.	Z (indep)	Z (test)	ΔZ	ΔZ^2
				Suma	
				Pomedio	
				Error medio cuadrático	
				NSSDA	

Tabla 2: Planilla de cálculo asociada a la componente z de un estudio de precisión.-

2. SELECCIÓN DE PUNTOS DE PRUEBA

La determinación de calidad de los datos geográficos se realiza en base a la comparación de coordenadas. Para ello se contrastan las coordenadas determinadas en base al método a testear, con las coordenadas, de los mismos puntos, relevadas con un método de mayor precisión. Dado que la comparación se realiza para una cantidad discreta de puntos, es fundamental que sean fáciles de encontrar y medir a través de ambos métodos.

⁽¹⁸⁾ Los estadísticos *Suma*, *Promedio*, *Error medio cuadrático* y *NSSDA* se desarrollan en ítem 5. *Cálculo de los estadísticos asociados a la precisión posicional.*

Se requieren al menos veinte puntos para que la evaluación estadística sea significativamente independiente del tamaño de la muestra. Así pues, veinte puntos están asociados a un nivel de confianza de 95%.

Por otra parte, es fundamental que los puntos se distribuyan como se muestra en la ilustración siguiente:

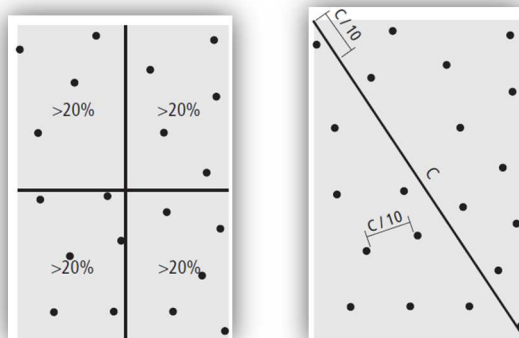


Ilustración 6: Izquierda: Distribución recomendada de puntos de testeo; Derecha: Esparcimiento recomendada de los puntos de testeo.- ⁽¹⁹⁾

3. SELECCIÓN DE DATOS INDEPENDIENTES DE MAYOR PRECISIÓN

El conjunto de datos independientes debe ser adquirido de forma independiente del conjunto de datos evaluados. En general, la precisión del relevamiento independiente debe ser tres veces mayor que la precisión esperada de los datos evaluados, en caso de no poder alcanzar dicha precisión el método admite la mayor precisión posible.

4. RECOLECCIÓN DE MEDICIONES DE PUNTOS IDÉNTICOS PROVENIENTES DE AMBAS FUENTES

En esta etapa solo corresponde aclarar la importancia de recolectar la información en formatos similares a través de ambos métodos de medición, a efectos de conservar una uniformidad en las planillas de cálculo antes presentadas. En particular, es fundamental que los datos estén referidos al mismo sistema de coordenadas.

5. CÁLCULO DE LOS ESTADÍSTICOS ASOCIADOS A LA PRECISIÓN POSICIONAL

El estadístico NSSDA se determina llenando la planilla de cálculo (tabla 1 y 2) con las observaciones correspondientes y determinando luego tres valores:

- *La suma:* Suma del conjunto de las diferencias al cuadrado entre el conjunto de datos de prueba y los valores de las coordenadas de los datos independientes.

$$Suma = \sum \Delta X^2 + \Delta Y^2$$

⁽¹⁹⁾ Fuente: Minnesota Planning, Land Management Information Center. (1999) Positional Accuracy Handbook. Using the National Standard for Spatial Data Accuracy to measure and report geographic data quality.

- *El promedio*: Cociente entre la suma antes descripta y el número de puntos de testeo(n).

$$\text{Promedio} = \frac{\text{Suma}}{n}$$

- El error medio cuadrático (*RMS*): Cuyo valor se determina de forma simplificada como la raíz cuadrada del promedio.

$$RMS = \sqrt{\text{Promedio}}$$

El estadístico *NSSDA* se determina multiplicando el *RMS* por un coeficiente asociado a un nivel de confianza de 95%. Para análisis planimétricos, el coeficiente es 1.7308, mientras que para evaluaciones altimétricas el coeficiente es 1.9600.

$$NSSDA_{PL} = RMS * 1.7308$$

$$NSSDA_{PA} = RMS * 1.9600$$

6. PRESENTACIÓN ESTANDARIZADA DE LOS RESULTADOS

Una vez determinada la exactitud posicional del conjunto de datos de prueba, es importante informar los valores de forma coherente y significativa. Para ello el manual recomienda utilizar el siguiente formato:

Precisión posicional testeada: _____ metros (horizontal, vertical) de precisión para un nivel de confianza de 95 %.

Por ejemplo, si después de realizado una prueba horizontal para un conjunto de datos, se determina un estadístico *NSSDA* de 0.18 *m*, corresponde informar:

Precisión posicional testeada: 0.18 m horizontal para un nivel de confianza de 95%.

Esto significa que el usuario de los datos puede confiar con una certeza del 95%, que la posición horizontal de los mismos está dentro de un margen de 0.18 *m*, con respecto a su posición verdadera.

6.6.1.4 Número de puntos

El estándar recomienda que se utilicen 20 puntos para la determinación de la calidad de un conjunto de datos.

De todas formas, es común en la literatura, la crítica referida al por qué ese número de puntos, indicando una carencia teórica - estadística en el desarrollo del manual. Tal como lo dicen Ariza, J. & Atkinson A. en su publicación *Metodologías de control posicional: visión general u análisis crítico* (2006) "...para nosotros éste es uno de los aspectos más críticos de la mayoría de los métodos de control posicional por cuanto que el tamaño mínimo de la muestra recomendado suele ser relativamente bajo...".

Por otra parte es necesario mencionar dos elementos claves implícitos en el *NSSDA*, que interfieren en el número de puntos de testeo a relevar:

1. Necesariamente requiere que la muestra haya sido depurada. Es decir, ningún punto de testeo puede estar afectado de sistematismos, así como tampoco de errores groseros.
2. Asume la normalidad de las diferencias ΔX , ΔY y ΔZ entre las coordenadas de testeo (levantadas con el método independiente) y las coordenadas a controlar.

Ante esta situación, se decidió considerar un total de 30 puntos de testeo excediendo así el número recomendado por el estándar, pero garantizando la cantidad mínima en caso de que fuese necesario descartar puntos.

6.6.2 Aerotriangulación

6.6.2.1 Generalidades

La aerotriangulación, también conocida como triangulación aérea o fototriangulación, es la metodología fotogramétrica que tiene por objeto obtener las coordenadas de diversos puntos del terreno.

Con el empleo de este método se busca minimizar el trabajo de campo, si bien siempre es necesario relevar de forma tradicional un grupo de puntos.

La necesidad de dichos puntos aparecen en la etapa de orientación externa, en la cual se vincula el sistema de coordenadas del par estereoscópico con el sistema de coordenadas terreno, proceso que se lleva a cabo en la restitución fotogramétrica.⁽²⁰⁾

Así pues, para restituir múltiples pares estereoscópico, la cantidad de puntos de control necesarios es muy elevada. Es por ello, que muchos de estos puntos se obtienen mediante la aerotriangulación, algunas ventajas de esta metodología son:

- Se reducen los costos del proyecto.
- La mayor parte del trabajo se realiza en gabinete.
- Se reduce el trabajo de campo.
- Aumenta las posibilidades de control de errores.

6.6.2.2 Distribución de los puntos adoptada

Es válido aclarar que se denominan **puntos de control** a aquellos puntos relevados en campo y **puntos de enlace** a aquellos determinados a través en la aerotriangulación.

En general, la literatura recomienda la disposición de puntos de control como se muestra en la ilustración 7.

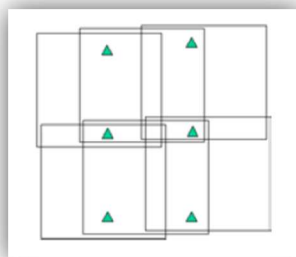


Ilustración 7: Distribución recomendada de puntos de control.-⁽²¹⁾

⁽²⁰⁾ Ver 16.5. Anexo: Restitución

⁽²¹⁾ Fuente: Manual Leica Photogrammetry Suite Project Manager.

Para el presente trabajo se decide relevar seis puntos de control para cada vuelo. A continuación en las ilustraciones 8 y 9 se muestran las distribuciones de los mismos en la zona de estudio.



Ilustración 8: Distribución de los puntos de control para el vuelo a 40m.- ⁽²²⁾



Ilustración 9: Distribución de los puntos de control para el vuelo a 100m.- ⁽²³⁾

⁽²²⁾ Fuente: Google Earth.

⁽²³⁾ Fuente: Google Earth.

6.7 SEÑALIZACIÓN

6.7.1 Justificación

En fotogrametría, puede definirse la señalización como la acción de realizar marcas en el terreno con el objetivo de generar puntos fotoidentificables en las imágenes aéreas o satelitales.

De todas formas, no siempre es necesario preseñalizar puntos, dado que si las características de la zona lo permiten, puede utilizarse puntos fotoidentificables propios del lugar, como ser marcas ya existentes en el pavimento, tapas de saneamiento, vértices de construcciones, etc.

Dadas las características del presente proyecto, se decide que todos los puntos, tanto los de control como los de testeo sean preseñalizados. Con esto se busca obtener mayor precisión para identificar los puntos que intervienen en el proceso de restitución. Además, utilizando puntos preseñalizados se disminuye el riesgo de confusión a la hora de vincular el punto relevado en campo con el punto visible en la imagen.

6.7.2 Forma y tamaño

En cuanto a la forma de las marcas, en el campo se pueden adoptar diferentes figuras geométricas que identifican un punto dado, véase a modo de ejemplo la ilustración siguiente.

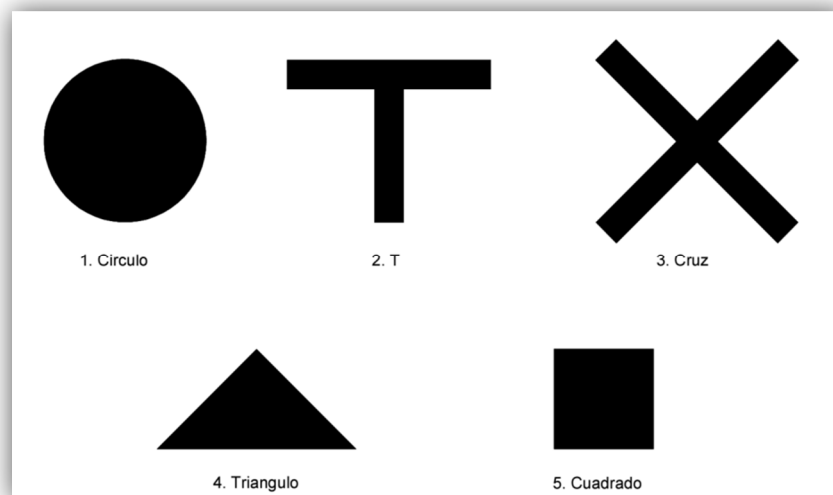


Ilustración 10: Tipos de marcas para la preseñalización.-

Para este estudio, se opta por las marcas en forma de cruz, buscando la coincidencia con el cursor del software que se utilizará en la restitución. Así pues, haciendo coincidir el cursor, con forma de cruz o de signo de más, con la marca preseñalizada en el terreno se maximiza la precisión con la que se determina el punto de interés.

Por su parte, el tamaño de la marca siempre está dado por la escala de la fotografía y por la resolución geométrica de la cámara. O lo que es equivalente, es función de la altura de vuelo y del tamaño de pixel de cámara utilizada. Recuérdese que el tamaño de pixel en el terreno está dado por la acción combinada de la altura de vuelo, relación directa, y la resolución geométrica de la cámara, relación inversa.

Específicamente el ancho de la marca está restringido por:

- Ancho mínimo: El tamaño de un pixel en el terreno. Para anchos menores es posible que la marca no sea visible en la fotografía.
- Ancho máximo: Tres pixel en el terreno. Para anchos mayores, puede volverse complejo identificar el eje de la marca en el software.

En cuanto al largo de la marca, es recomendable utilizar las siguientes dimensiones para las diferentes escalas:

- Escala $\approx 1 : 18000$ 75 x 75 cm
- Escala $\approx 1 : 7500$ 30 x 30 cm
- Escala $\approx 1 : 3000$ 15 x 15 cm

(Ariza, J. & James, A., 2006, p.25)

Lo cual es equivalente para una cámara Sony NEX-7 de 16 mm de distancia focal a:

- Altura de vuelo ≈ 1000 m 75 x 75 cm
- Altura de vuelo ≈ 450 m 30 x 30 cm
- Altura de vuelo ≈ 200 m 15 x 15 cm

Si bien en la bibliografía citada no se indica el tamaño de la marca recomendado para vuelos a 40 y 100 m de altura, solo alcanza con asumir una dependencia lineal ⁽²⁴⁾ entre estas variables para estimar el valor buscado:

- Altura de vuelo ≈ 40 m 3 x 3 cm
- Altura de vuelo ≈ 100 m 8 x 8 cm

Por otra parte, se tomaron imágenes aéreas adquiridas con la cámara Sony NEX-7 a alturas de 40 y 100 m con marcas preseñalizadas. Se observó que en estas las marcas eran fácilmente localizables, si bien su longitud era mayor a la recomendada por los autores citados anteriormente.

Por esta razón el grupo decidió tomar las dimensiones recomendadas por Ariza J. & James A. (2006) como valores mínimos para el tamaño de las marcas.

6.7.3 Decisión

Como en el presente proyecto intervienen dos vuelos a diferentes alturas, es necesario analizar la marca desde ambas perspectivas:

- $H_v = 40$ m $\rightarrow \begin{cases} \text{GPS} = 1 \text{ cm} \rightarrow A_m \in (1.0 \text{ cm}, 3.0 \text{ cm}) \\ L_m = 3 \text{ cm} \times 3 \text{ cm} \end{cases}$
- $H_v = 100$ m $\rightarrow \begin{cases} \text{GPS} = 2.5 \text{ cm} \rightarrow A_m \in (2.5 \text{ cm}, 7.5 \text{ cm}) \\ L_m = 8 \text{ cm} \times 8 \text{ cm} \end{cases}$

Donde:

H_v = Altura de vuelo.

GPS = "Ground Pixel Size" (Tamaño del pixel en el terreno).

A_m = Ancho de la marca a señalizar.

L_m = Largo mínimo de la marca.

⁽²⁴⁾ $L_{\text{marca}}^{\text{cm}} = \frac{6}{80} H_{\text{vuelo}}^{\text{m}}$, Donde L = Largo de la marca y H = Altura de vuelo.

Nótese que si bien los intervalos óptimos para ambos vuelos se intersectan en el intervalo $(2.5\text{ cm}, 3.0\text{ cm})$, no sería recomendable realizar la marca de tal tamaño, ya que se estaría muy próximo al ancho mínimo recomendado para el vuelo a 100m.

La solución encontrada para anular esta dificultad fue optar por una marca combinada, en la que se integran dos cruces concéntricas, de tamaños diferentes, véase la ilustración que sigue.

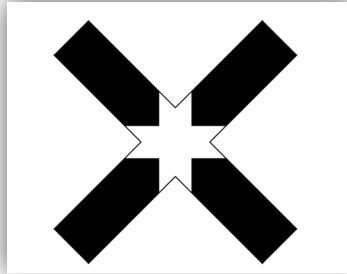


Ilustración 11: Modelo de marca a utilizar.-

Esta marca será realizada en cada punto con aerosol de color blanco utilizando una plantilla de cartón sueco.

De todas formas, previo al vuelo, el patrón de marca fue testeado en fotos terrestres tomadas a 40 y 100 m del punto de testeo, con una cámara con los mismos parámetros que la que se utilizará posteriormente.

Realizando el análisis de las fotos tomadas, se decide alargar las marcas para facilitar su ubicación en la fotografía. Como resultado, se determina la marca combinada con las siguientes dimensiones, ver ilustración 12.

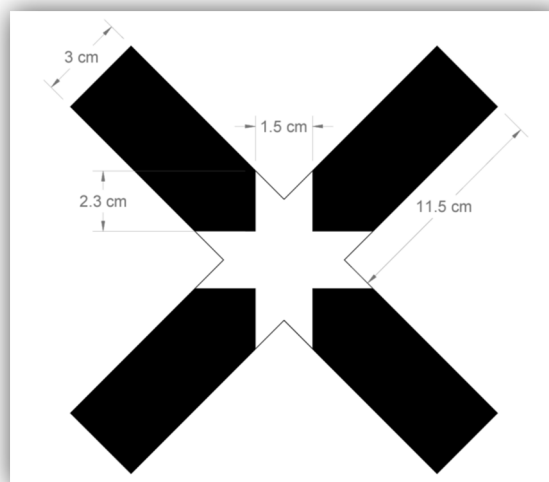


Ilustración 12: Marca preseñalizada acotada.-

6.8 RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO

6.8.1 Desviaciones máximas admisibles

Como fue expuesto antes, para controlar un conjunto de datos geográficos a través de la aplicación del estándar NSSDA, es imprescindible la recolección de datos independientes de mayor precisión. Específicamente en el documento oficial del estándar se recomienda que el relevamiento independiente sea tres veces más preciso que la precisión esperada del conjunto de datos a testear, si bien acepta que se releve lo mejor posible, si el triple de la precisión no es alcanzable.

En cuanto a las precisiones esperadas del caso en estudio, el proveedor asegura:

- Vuelo a 40 m: GPS = 1.25 cm

$$\sigma_{Z_{40}} = 2.2 \text{ cm}$$

- Vuelo a 100 m: GPS = 2.25 cm

$$\sigma_{Z_{100}} = 5.5 \text{ cm}$$

Recuérdese que *GPS* es el tamaño del píxel en el terreno (*ground pixel size*).

Por lo que el relevamiento independiente está acotado por las siguientes desviaciones:

- En planimetría: $\sigma_{RT_{xy}} = 0.4 \text{ cm}$

- En altimetría: $\sigma_{RT_z} = 0.7 \text{ cm}$

Donde $\sigma_{RT_{xy}}$ y σ_{RT_z} son las desviaciones máximas admisibles del relevamiento topográfico.

Nótese que las desviaciones precedentes satisfacen la condición que establece el estándar para el vuelo a 40 m, por lo tanto, también cumplen la condición para el vuelo a 100 m.

6.8.2 Número de puntos a relevar

Hasta el momento, se reconocen dos tipos de puntos que deben ser relevados independientemente al vuelo, estos son los puntos de testeo (asociados al estándar NSSDA) y puntos de control (asociados a la aerotriangulación).

En total serán relevados 58 puntos, 6 como puntos de control para el vuelo a 40 m y 6 para el vuelo a 100 m. Se contará además con 30 puntos de testeo para cada vuelo, siendo algunos de ellos utilizados en ambos.

6.8.3 Distribución de los puntos

Siguiendo las recomendaciones del manual del NSSDA, se define aleatoriamente la distribución de los 30 puntos de testeo. Mientras que la posición de los puntos de control necesarios para aerotriangulación ya fue establecida en el apartado 6.6.2.2. *Distribución de los puntos adoptada*.

Véase a continuación en la ilustración 13 la distribución de ambos grupos de puntos.



Ilustración 13: Distribución de los puntos de control y testeos.-

En la ilustración anterior, se pueden ver señalados con un círculo rojo aquellos puntos que serán utilizados en el proceso de orientación exterior para el vuelo a 40 m, y de color azul para aquellos a ser utilizados en el vuelo a 100 m, los restantes corresponden a los puntos de testeos.

6.8.4 Materialización de los puntos

Los puntos se relevan aplicando tres metodologías diferentes:

- Radiación con estación total.
- Nivelación geométrica con nivel automático.
- Restitución fotogramétrica.

Como consecuencia de lo antes dicho, se necesita definir la materialización de los puntos de forma tal que se simplifiquen los tres relevamientos. Como fue expuesto en el apartado 6.7.3. *Decisión*, para el vuelo se utilizará una marca doble en forma de cruz, materializada con aerosol blanco.

6.8.5 Relevamiento planimétrico

Dada la desviación máxima admisible en planimetría $\sigma_{RT_{xy}} = 0.4 \text{ cm}$, es necesario maximizar las precauciones, minimizando toda fuente de incertidumbre. Por ello se diseña un plan de relevamiento específico basado en el método de levantamiento de radiación con estación total Leica 407.

6.8.5.1 Preanálisis

Dado el error máximo admisible $\sigma_{RT_{xy}}$:

$$\sigma_{RT_{xy}}^2 = \sigma_{RT_x}^2 + \sigma_{RT_y}^2 = (0.4 \text{ cm})^2$$

Y las fuentes de error asociadas al relevamiento de un punto:

- Error instrumental (σ_i).
- Error de verticalidad del bastón (σ_{ver}).
- Error de puntería (σ_{pun}).
- Error de estación (σ_{est}).

Es posible establecer las siguientes relaciones:

$$\sigma_{RT_x}^2 = \sigma_{i_x}^2 + \sigma_{ver_x}^2 + \sigma_{pun_x}^2 + \sigma_{est_x}^2$$

$$\sigma_{RT_y}^2 = \sigma_{i_y}^2 + \sigma_{ver_y}^2 + \sigma_{pun_y}^2 + \sigma_{est_y}^2$$

De la cual:

- Error instrumental (σ_i): está dado por el instrumental utilizado. En el caso de la estación total Leica 407, σ_i se compone en distancia por 2 mm + ppm y en medidas angulares por 7".
- Error de verticalidad y error de puntería pueden ser despreciados considerando que el relevamiento será realizado con el prisma a una altura de 0.10 m.

Por lo tanto es posible obtener el error de estación máximo admisible:

$$\sigma_{est_x} = \sigma_{est_y} = 0.3 \text{ cm}$$

6.8.5.2 Procedimiento

1. Primera estación:

- Para iniciar el relevamiento se verticalizará el eje principal de la estación, poniendo el equipo en condiciones de trabajo, materializando posteriormente el punto de estación con un clavo. Para la orientación, se le asignará acimut 0° a una dirección arbitraria.
- Los puntos relevados desde la primera estación están libres de error de estación.
- A partir de esta primera estación se relevarán:
 - 8 puntos distribuidos perimetralmente en la zona de estudio, los cuales conformarán una red.
 - Los puntos de control y testeo que sean visibles.

2. Estaciones restantes

- Estacionar sobre un punto arbitrario, que no haya sido preseñalizado.
- Configurar la orientación, disparando al menos a cuatro puntos de la red con giro y tránsito.
- Verificar que el error de estación que devuelve el instrumento sea inferior al error de estación determinado en el preanálisis.
- Releva los puntos visibles.

3. Algunas precauciones generales

- Todos los puntos se relevarán aplicando giro y tránsito, se anotarán las coordenadas obtenidas.
- En caso de que las diferencias $\Delta X, \Delta Y$ ⁽²⁵⁾ superen los $5mm$ se relevará el punto una tercera vez.
- Se utilizará el miniprisma a 0.10 m, con especial cuidado en la verticalidad.
- Se realizará la puntería a la parte baja del bastón.
- La estación permanecerá todo el tiempo en la sombra
- El operador será durante todo el relevamiento el mismo.
- Se evitará la circulación en torno a la estación total.

6.8.6 Relevamiento altimétrico

Dada la desviación máxima admisible en altimetría $\sigma_{RT_z} = 0.7 \text{ cm}$ y teniendo en cuenta que se relevarán 58 puntos, también es necesario realizar un cuidadoso análisis de desviaciones para definir el plan de relevamiento.

6.8.6.1 Preanálisis

Dado el elevado número de puntos a relevar, se decidió realizar el levantamiento en circuitos cerrados vinculados, incluyendo aproximadamente 6 puntos por circuito.

El error máximo por circuito (σ_{cir}) se calcula como:

$$\sigma_{RT_z} = \sqrt{n} \sigma_{cir} \rightarrow \sigma_{cir} = 0.3 \text{ cm}$$

Donde n es el número de circuitos ($n \cong 9$)

Nótese que la incertidumbre de cada circuito viene dada exclusivamente por la acumulación de errores de apreciación en las diferentes lecturas.

$$\sigma_{cir} = \sqrt{2 * m} * \sigma_{ap} \rightarrow \sigma_{ap} = 0.1 \text{ cm}$$

Donde m es el número de puntos por circuito ($m \cong 6$). ⁽²⁶⁾

A su vez, con el error de apreciación es posible determinar la desviación por cada tramo. Es decir la desviación del desnivel existente entre dos puntos consecutivos $\sigma_{\Delta h_i}$.

$$\sigma_{\Delta h_i} = \sqrt{2} \sigma_{ap} \rightarrow \boxed{\sigma_{\Delta h_i} = 0.2 \text{ cm}}$$

⁽²⁵⁾ $\Delta X, \Delta Y$ son las diferencias entre las coordenadas del mismo punto aplicando la metodología de giro y tránsito.

⁽²⁶⁾ El número de puntos por circuito es aproximado a efectos de simplificar el cálculo.

6.8.6.2 Procedimiento

- La nivelación de los puntos se fragmentará en 9 circuitos cerrados relacionados a través de puntos de paso. Véase ilustración 14



Ilustración 14: Distribución de los circuitos diseñados para la nivelación.- (27)

- Para la determinación del desnivel entre dos puntos consecutivos se estacionará el nivel aproximadamente en la mediatriz del segmento que los une. De esta forma se elimina la influencia del error de colimación. Mientras que los errores de curvatura y refracción son despreciables por la proximidad de los puntos.
- Para cada par de puntos contiguos, la nivelación será doble simultánea, es decir se determina dos veces el desnivel en cada tramo.
- Si para un tramo, los desniveles calculados difieren más que la magnitud determinada en el preanálisis ($\sigma_{\Delta h_i} = 0.2 \text{ cm}$), deberá relevarse una vez más la diferencia de lecturas para ese tramo.

⁽²⁷⁾ Google Earth.

7 ETAPA 2: VUELO Y RELEVAMIENTO DE CAMPO

7.1 INTRODUCCIÓN

Bajo el desarrollo de la *Etapa 2: Vuelo y Relevamiento de campo*, se reseñan las actividades llevadas a cabo el miércoles 30 de mayo de 2014 y el domingo 1 de junio del mismo año. En dichas jornadas se hizo efectiva la materialización en el terreno de los puntos de control y testeo, así como también se realizó el relevamiento topográfico y fotogramétrico correspondiente.

7.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Capturar los datos necesarios para dar inicio a la restitución fotogramétrica pertinente.

7.3 PRESEÑALIZACIÓN EN EL TERRENO

7.3.1 Generalidades

Previo a la fecha estipulada del vuelo, el grupo se dirigió a la zona en estudio para realizar las marcas necesarias.

Para ubicar los puntos en el terreno, se utilizó el equipo GNSS R8 de la empresa Trimble en modo diferencial.⁽²⁸⁾ Se replantearon 59 puntos, correspondientes a:

- 13 puntos de control.
- 46 puntos de testeo.⁽²⁹⁾

Las coordenadas replanteadas estaban referidas al sistema de coordenadas WGS84 / UTM 21 S.

En lo que refiere a la numeración de los puntos, se utilizó el siguiente criterio:

- Del 1 al 46 para los puntos de testeo.
- Del 400 al 405 para los puntos de control correspondientes al vuelo a 40 m.
- Del 100 al 105 para los puntos de control correspondiente al vuelo a 100 m.

A efectos de minimizar ocasionales confusiones, junto a las marcas, se indicó el número de punto escribiendo con marcador sobre el hormigón, o a través de una tarjeta de cartón para el caso de los puntos ubicados sobre el terreno natural. Ver ilustraciones siguientes.

⁽²⁸⁾ Ver 16.6. Anexo: Posicionamiento GPS.

⁽²⁹⁾ En 16.7. Anexo: Coordenadas replanteadas, se encuentran las coordenadas planimétricas WGS 84 / UTM 21S replanteadas de los puntos de control y testeo.

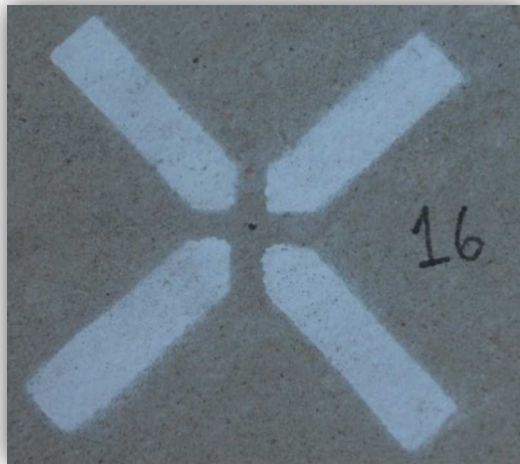


Ilustración 15: Marca de un punto de testeo sobre el hormigón.-



Ilustración 16: Marca de un punto de control sobre el hormigón.-



Ilustración 17: Marca de un punto de testeo sobre el pasto.-

7.3.2 Observaciones

En primera instancia corresponde destacar que se logró materializar los 58 puntos planificados, y en campo se decidió agregar un punto, denominado 401 b.

A la hora de replantear y materializar el punto 401 se observó que el mismo se ubicaba debajo del alero del acceso al galpón, por lo cual se corría el riesgo de que el mismo no fuese visto por el dron, entonces se materializó el punto 401 b por si esto ocurría.

En términos generales, la ubicación de los puntos coincidió con la planificación, así pues:

- 20 puntos fueron materializados en la explanada de hormigón: 4 puntos de control y 16 de testeo.
- 6 puntos fueron materializados sobre la vía de circulación de tosca: todos correspondientes a puntos de testeo.
- 33 puntos fueron materializados sobre la pradera natural: 9 puntos de control y 24 de testeo.

De todas formas es oportuno aclarar que el replanteo se realizó admitiendo una desviación posicional del orden de los 15 *cm*. Pues esto no interfiere en los objetivos de la investigación.

7.4 RELEVAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

7.4.1 Generalidades

A continuación se presenta la caracterización de los dos vuelos fotogramétricos llevados a cabo el domingo 1 de junio del 2014 entre las 11 y las 12 horas. En dicha oportunidad, el tiempo se presentó soleado, con valores de viento que oscilaron entre los 10 y 15 *km/h*, con 2% de humedad.

En ambos casos, el equipo utilizado fue el Microdrone md4-1000, con la cámara Sony NEX-7 anexa. Los vuelos se realizaron de forma autónoma, en base al diseño de un nuevo plan de vuelo realizando en campo.

7.4.2 Vuelo a 40 m

Caracterización del vuelo:

- Altura de vuelo promedio: 44.91 m
- Altura de vuelo máxima: 47.48 m
- Altura de vuelo mínima: 42.59 m
- Número de líneas de vuelo: 3
- Número de puntos de toma: 33
- Duración del vuelo: 8' (ocho minutos)

Caracterización del producto:

- Número de fotos: 64
- Formato de las imágenes: JPG
- Peso de cada imagen: 10 MB
- Peso del relevamiento: 640 MB

Véase a continuación, en la ilustración 18, la trayectoria descrita por el drone.



Ilustración 18: Recorrido efectuado por el drone en el vuelo a 40m.-⁽³⁰⁾

7.4.3 Vuelo a 100 m

Caracterización del vuelo:

- Altura de vuelo promedio: 106.64 m
- Altura de vuelo máxima: 111.30 m
- Altura de vuelo mínima: 101.51 m
- Número de líneas de vuelo: 2
- Número de puntos de toma: 12
- Duración del vuelo: 4' (cuatro minutos)

Caracterización del producto:

- Número de fotos: 13
- Formato de las imágenes: JPG
- Peso de cada imagen: 10 MB
- Peso del relevamiento: 130 MB

Véase a continuación, en la ilustración siguiente, la trayectoria descrita por el drone.



Ilustración 19: Recorrido efectuado por el drone en el vuelo a 100m.-^{(31) / (32)}

⁽³⁰⁾ Fuente: Google Earth.

⁽³¹⁾ Fuente: Google Earth.

⁽³²⁾ Para el presente proyecto solo se tuvo en cuenta la línea de vuelo ubicada al este.

7.4.4 Observación

Se considera importante remarcar que los planes vuelo llevados a cabo en 1ro de junio de 2014 no fueron los mismos que los utilizados para definir la distribución de los puntos de control y testeo.

Esto se debe a que los Ingenieros de la empresa UAV-Agrimensura Birriel & González entendieron oportuno rediseñar el plan de vuelo en el lugar.

Si bien las marcas ya habían sido realizadas en el terreno, no fue posible redistribuir los puntos, dado que el equipo de trabajo no tuvo acceso al nuevo plan de vuelo.

En la tabla 3 se detallan las principales diferencias entre los planes vuelo iniciales y los ejecutados.

Altura relativa de vuelo (m)	Dirección de la línea de vuelo		Nº de puntos de toma	
	Plan de vuelo inicial	Plan de vuelo efectivo	Plan de vuelo inicial	Plan de vuelo efectivo
40	Este - Oeste	Norte – Sur	10	33
100	Este - Oeste	Norte – Sur	3	6

Tabla 3: Diferencias entre el plan de vuelo inicial y el plan de vuelo efectivo

7.5 RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO

7.5.1 Relevamiento Planimétrico

El relevamiento planimétrico se desarrolló tal cual fue planificado en el apartado 6.8. *Relevamiento topográfico*. Así pues, en primera instancia se verticalizó el eje principal de la estación total en un punto arbitrario y se relevó una red 8 de puntos, ver ilustración 20. Posteriormente se inició el relevamiento propiamente dicho, en el que se capturaron las coordenadas planimétricas de los puntos de control y de testeo.



Ilustración 20: Ubicación de la red de puntos.- ⁽³³⁾

Cada intervalo de tiempo del orden de 2 horas se relevaron las coordenadas de los puntos de la red, a efectos de verificar la estabilidad de la estación. En una oportunidad, esta corroboración demostró un corrimiento de la estación, por lo que todos los puntos medidos desde la misma debieron ser descartados y relevados nuevamente.

⁽³³⁾ Fuente: Google Earth.

Como consecuencia del exhaustivo trabajo que requirió la medición de cada punto, el relevamiento planimétrico fue fraccionado en dos días.

7.5.2 Relevamiento Altimétrico

Al igual que el relevamiento planimétrico, el relevamiento altimétrico fue realizado siguiendo la planificación establecida en el apartado 6.8. *Relevamiento topográfico*. Así pues se midió por circuitos cerrados interconectados, determinando el vector de cierre *in situ*.

En total se realizaron 264 lecturas a efectos de determinar la coordenada *Z* de los 59 puntos preseñalizados.

8 ETAPA 3: PROCESAMIENTO DE LOS DATOS

8.1 INTRODUCCIÓN

En el desarrollo de la presente etapa, se reseña el tratamiento efectuado a los datos capturados en la etapa anterior. Así pues, pueden identificarse dos grupos de tareas:

- El procesamiento de datos de campo.
- La obtención del producto a testear.

8.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Calcular las coordenadas definitivas del relevamiento topográfico.
- Generar el fotoíndice correspondiente a cada vuelo.
- Obtener el modelo estereoscópico asociado a los relevamientos fotogramétricos.

8.3 PROCESAMIENTO DE DATOS DE CAMPO

8.3.1 Datos topográficos

8.3.1.1 Justificación

Una vez ejecutado el relevamiento, es necesario tratar de forma imparcial la redundancia de datos.

Igualmente corresponde aclarar que por las condiciones de viento y las características del terreno (húmedo por lluvias en días anteriores), fue necesario redefinir las desviaciones máximas admisibles.

8.3.1.2 Datos planimétricos

Dados $X_1, X_2, \dots, X_n$, n observaciones de la coordenada X de un punto P , la coordenada X definitiva del punto, se determina de la siguiente manera:

1. Se calcula la media:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

2. Se determina el intervalo:

$$I_n = [\bar{X} - 0.005, \bar{X} + 0.005]^{(34)}$$

En este caso, se utiliza el criterio de depuración según:

$$I_n = [\bar{X} - 3\sigma, \bar{X} + 3\sigma], \text{ donde } 3\sigma = 0.005 \text{ m.}^{(35)}$$

3. Se descartan las observaciones X_i que no pertenecen al intervalo I_n .
4. En caso de ser necesario, se recalcula la media.
5. Se repite el procedimiento hasta que ninguna observación sea descartada.

⁽³⁴⁾ La media expresada en metros.

⁽³⁵⁾ Se entiende que debido a las condiciones climáticas del día del relevamiento, no es posible restringir la observaciones según lo establecido en 6.8.5.1. *Preanálisis*.

El procedimiento es análogo para el cálculo de la coordenada Y de los puntos.

Los valores intermedios relacionados al cálculo, así como las coordenadas planimétricas definitivas pueden apreciarse en 16.8. Anexo: Tratamiento de datos topográficos, apartado 16.8.1. Relevamiento planimétrico.

Cuantitativamente, el procedimiento puede resumirse en los siguientes ítems:

- Total de puntos relevados: 144
- Total de puntos bajo tolerancia: 136
- Total de puntos descartados: 8
- $RMS_{XY} = 2.3 \text{ cm}$

En los datos antes presentados no se tomaron en cuenta los puntos de verificación de la red, ni los puntos de estación.

8.3.1.3 Datos altimétricos

Ejecutado el relevamiento, el desnivel en cada tramo fue relevado al menos dos veces. Esto permitió minimizar errores, calculando en primera instancia las lecturas promedio según las siguientes expresiones.

$$L_{at_promedio_{AB}} = \frac{L_{at_1_{AB}} + L_{at_2_{AB}}}{2}$$

$$L_{ad_promedio_{AB}} = \frac{L_{ad_1_{AB}} + L_{ad_2_{AB}}}{2}$$

Donde:

- $L_{at_promedio_{AB}}$: Lectura atrás media del tramo AB
- $L_{ad_promedio_{AB}}$: Lectura adelante media del tramo AB

Calculadas estas lecturas, las operaciones que a continuación se detallan refieren exclusivamente a $L_{at_promedio_{AB}}$ y $L_{ad_promedio_{AB}}$

Para determinar el error de cierre de cada circuito, se calcula el desnivel de un recorrido cerrado a través de la siguiente expresión.

$$\varepsilon_{circuito} = \sum L_{at_{AA}} - \sum L_{ad_{AA}}$$

En los casos que $\varepsilon_{circuito} \neq 0$, se corrigen las lecturas atrás mediante las siguientes expresiones:

$$c = \frac{\varepsilon_{circuito}}{n}$$

$$\bar{L}_{at} = L_{at_promedio} + c$$

Donde:

- c : Corrección
- n : Número de tramos del circuito
- $\bar{L}_{at}$: Lectura atrás corregida

Asignada la cota a un punto arbitrario, se determina la cota de los puntos restantes de la siguiente forma, ver tabla 4.

Punto	$\bar{L}_{at}$	L_{ad}	Z_{pc}	Z_{punto}
A	$\bar{L}_{at_A}$		$Z_{pc_A} = Z_A + \bar{L}_{at_A}$	Z_A
B		L_{ad_B}		$Z_B = Z_{pc_A} - L_{ad_B}$

Tabla 4: Cálculo de la coordenada Z de los puntos en base al relevamiento topográfico.-

Donde:

- Z_{pc} : Cota del plano colimador AB.
- Z_{punto} : Cota del punto.

Los valores intermedios, así como la coordenada Z de los puntos se presentan en 16.8. Anexo: Tratamiento de datos topográficos, en el apartado 16.8.2. Relevamiento altimétrico.

En la tabla siguiente se muestran los valores calculados de los distintos vectores de cierre.

Circuito N°	Módulo del vector de cierre (cm)
1	0,0
2	0,0
3	0,2
4	0,3
5	0,8
6	0,2
7	0,2
8	1,2
9	1,8

Tabla 5: Módulo de los vectores de cierre calculados.-

Error medio cuadrático del relevamiento altimétrico (RMS_Z) es:

$$RMS_Z = \frac{\sqrt{\sum \varepsilon_i^2}}{n}$$

$$RMS_Z = 0.3 \text{ cm}$$

Corresponde aclarar que los circuitos 8 y 9 estaban en la zona de mayor humedad del terreno, por lo que en ambos casos se admitió el vector de cierre resultante.

Las coordenadas finales del relevamiento topográfico se presentan en 16.9. Anexo Coordenadas definitivas relevadas topográficamente.

A continuación se presenta el croquis del relevamiento topográfico efectuado, en este se representan las curvas de nivel determinadas a partir de las coordenadas calculadas.

CROQUIS DE UBICACIÓN



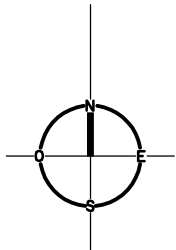
REFERENCIAS

15.00	CURVAS DE NIVEL
EXPLANADA EXISTENTE	
CAMINO EXISTENTE	
CONSTRUCCION EXISTENTE	



NOTAS:
- Las infraestructuras se grafican unicamente a efectos vidsuales.-

ESCALA 1:750



RELEVAMIENTO PLANIALTIMETRICO			Escala		1:750	
			Fecha		Junio de 2014	
Departamento		CANELONES	AREA RELEVADA APROXIMADA:			
Localidad Catastral		BARROS BLANCOS	AREA			
			Hds.	m²		
			1	4000		
PROPIETARIO:			VERONICA PAMPINELLA			
DONIRAL S.A.			MELISSA PEREZ			

8.3.1.4 Síntesis de precisiones del relevamiento topográfico

En la tabla 6 se presenta el error medio cuadrático obtenido en el relevamiento topográfico, y error medio cuadrático recomendado por el estándar NSSDA para dicho relevamiento.

Es importante recordar que las columnas “RMS sugerido por el estándar” hacen referencia al tercio de la precisión esperada del relevamiento fotogramétrico (relevamiento a controlar).

	RMS del relevamiento topográfico (cm)	RMS sugerido por el estándar	
		Vuelo a 40 m (cm)	Vuelo 100 m (cm)
Planimetría	2.3	0.4	0.8
Altimetría	0.3	0.7	1.8

Tabla 6: Error medio cuadrático del relevamiento planialtimétrico.-

Como puede notarse en la tabla precedente:

- En planimetría el RMS alcanzado supera el RMS sugerido por el estándar. De todas formas, se admite el relevamiento realizado, dado que las precauciones tomadas fueron máximas y las características del terreno no permitieron obtener mejores resultados.
- En altimetría, el error medio cuadrático del relevamiento es admisible.

8.3.2 Imágenes: Generación del fotoíndice

8.3.2.1 Justificación

En fotogrametría es necesario realizar, previo a la restitución, el fotoíndice de las imágenes tomadas en el vuelo. La producción del mismo permite reconstruir el orden con el que las imágenes fueron tomadas.

Dado que el drone capturó un mínimo de tres fotografías en cada punto de toma, para elaborar el fotoíndice es necesario realizar la selección de las imágenes a utilizar.

Es importante aclarar, que dados los plazos asociados a la asignatura Proyecto, fue necesario dejar a un lado el vuelo a 40 m, realizando únicamente la restitución del vuelo a 100m.

8.3.2.2 Vuelo a 100 m

El resultado del fotoíndice referido a este relevamiento se puede visualizar en la siguiente ilustración.

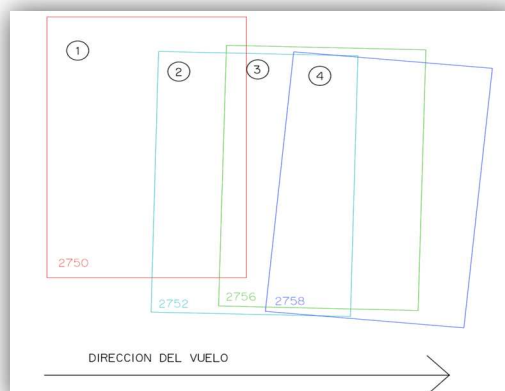


Ilustración 21: Fotoíndice del vuelo 100m.-

Obsérvese en la tabla 7 el recubrimiento efectivo resultante de esta configuración.

Imágenes	Solape transversal
1 – 2	44%
2 – 3	66%
3 - 4	66%
2 - 4	32%

Tabla 7: Recubrimiento transversal entre imágenes.-

8.4 OBTENCIÓN DEL PRODUCTO A TESTEAR

8.4.1 Proceso de restitución

8.4.1.1 Introducción

En este apartado se explica la configuración empleada en lo referente al proceso de restitución. Recuérdese que para realizar dicha tarea se utiliza el software ERDAS IMAGINE 2013, más específicamente la aplicación LPS (*Leica Photogrammetry Suite*).

Aclárese también, que en esta etapa el grupo de investigación tuvo que interiorizarse con un software totalmente nuevo, por ello el proceso de restitución fue extenso y requirió numerosas pruebas para lograr el objetivo.

Se considera importante resaltar la utilidad del manual oficial del LPS y de los manuales de entrenamiento, así como el asesoramiento de expertos.

A continuación se reseña únicamente el procedimiento que dio lugar a la obtención de los resultados definitivos.

8.4.1.2 Dificultades iniciales

8.4.1.2.1 Puntos de control

En primera instancia se considera oportuno aclarar que no todos los puntos de control planificados pudieron ser utilizados con este fin, las razones se detallan a continuación:

- El punto 100 solo se visualiza en la fotografía número 2.
- El punto 102 no se visualiza en la fotografía número 3.
- El punto 101, si bien se visualiza tanto en la imagen 2 como en la 3, la identificación del mismo no se puede hacer con precisión debido a que la marca se ve difusa en una de las imágenes.
- Con el punto 105 sucede algo similar al punto 101, si bien aparece en las fotografías 3 y 4, el mismo no puede ser identificado con buena precisión.

Para subsanar este inconveniente, la solución encontrada fue cambiar los puntos de control problemáticos por puntos de testeo, mejorando la calidad del procedimiento de restitución.

Para el cambio de puntos, el criterio empleado se basó en dos aspectos:

- Que el punto alternativo esté lo más próximo posible al punto inicialmente planificado.
- Que la definición del punto sea alta en las imágenes.

Es importante recordar que se preseñalaron más puntos de testeo que los estrictamente necesarios según el estándar, por lo cual el uso de algunos de ellos como puntos de control no perjudica el control de calidad del producto.

La sustitución de puntos se realizó según la tabla siguiente:

Punto planificado	Punto alternativo
100	40
101	401 b
102	8
105	45

Tabla 8: Sustitución de los puntos de control.-

Véase a continuación, en la ilustración 22, la distribución tanto de los puntos planificados, como de los puntos alternativos, indicados los primeros en verde y los segundos en rojo.

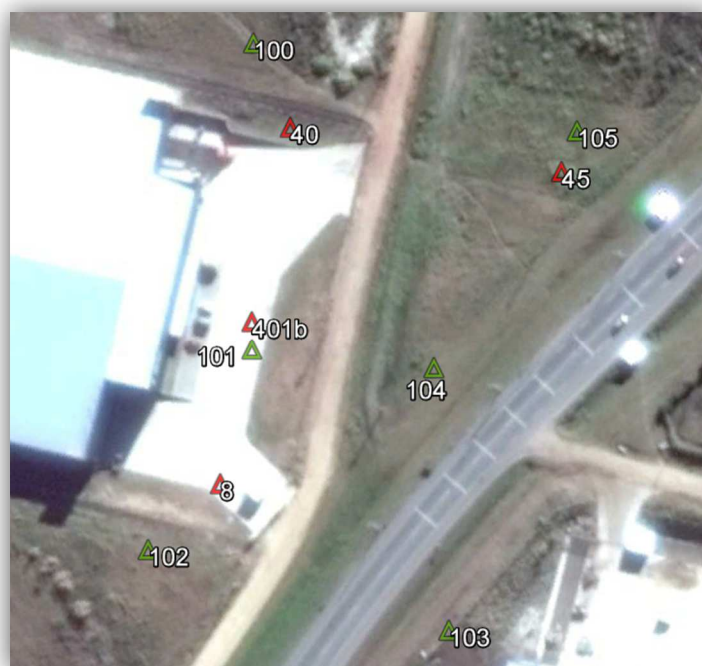


Ilustración 22: Distribución de los puntos de control planificados y alternativos.- ⁽³⁶⁾

8.4.1.2.2 Configuración de la cámara

Por otra parte, en los distintos procedimientos de restitución se probaron diversas alternativas de configuración de cámara. Esto fue necesario dada la inexperiencia del equipo de trabajo.

Las alternativas manejadas fueron:

- Cámara no métrica.
- Cámara métrica.
- Cámara digital.

A partir del asesoramiento del técnico Ing. William Kim de la empresa Leica Geosystems, fue posible notar que por la información contenida en el certificado de calibración, la configuración adecuada a emplear es “Cámara métrica”.

⁽³⁶⁾ Fuente: Google Earth.

8.4.1.3 Síntesis del procedimiento

Bajo este título se presenta una breve reseña de la configuración utilizada para la restitución de las imágenes. En 16.10. Anexo Procedimiento de restitución LPS - ERDAS se presenta el detalle de la ejecución de estas operaciones en el software.

1. Crear un nuevo archivo, configurando:
 - Tipo de cámara.
 - El sistema de referencia.
 - El sistema de referencia de las imágenes.
2. Cargar las imágenes
3. Realizar la orientación interior:
 - Ingresando los parámetros del certificado de calibración.
 - Indicando la posición de las marcas fiduciales.
4. Realizar la orientación relativa y absoluta:
 - Identificando los rayos homólogos de los puntos de control en las imágenes correspondientes.
 - Generar puntos de enlace:
 - De forma manual: aplicando la distribución de Von Grüber.
 - De forma automática.
5. Correr la triangulación: Generando el modelo estereoscópico escalado, referido al sistema de referencia de los puntos de control.

8.4.1.4 Ejecución de la restitución

A continuación se expondrán los pasos a seguir para generar la restitución que dio lugar a la extracción de las coordenadas de los puntos de testeo.

1. Se genera un nuevo trabajo, configurando el sensor como “cámara métrica”.
Debido a que las coordenadas de los puntos de control y testeo fueron relevadas con estación total en un sistema de referencia arbitrario, se configura el trabajo con un sistema de referencia local, no asignando por tanto ningún tipo de proyección cartográfica.
2. Una vez configurado el trabajo se cargan las imágenes.
Antes de realizar dicho proceso, es necesario rotar las imágenes para trabajar con los planos epipolares definidos por la línea de vuelo. Ver ilustración 23.

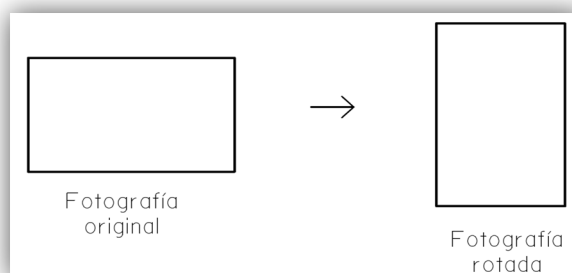


Ilustración 23: Resultado de la rotación de las imágenes.-

3. Se realiza la orientación interior, para ello se identifican dos pasos.
 - a. Se ingresan los parámetros del certificado de calibración, ver 16.4. Anexo: Certificado de calibración utilizado en el proyecto.

- b. Se identifica la ubicación de las marcas fiduciales en cada una de las imágenes cargadas.

Es necesario analizar el sistema de coordenadas del certificado de calibración, dado que la rotación de las imágenes modificó dicho sistema. Ver ilustración 24.

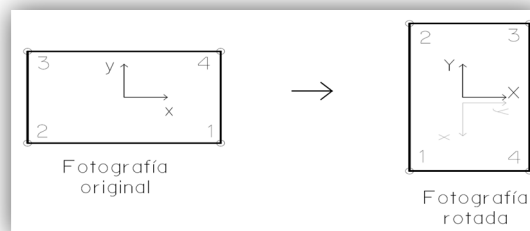


Ilustración 24: Relación entre sistema de coordenadas del certificado de calibración y el sistema utilizado en el proyecto.-

De este análisis surge la siguiente relación:

$$\begin{cases} x_i = y_{cc} \\ y_i = -x_{cc} \end{cases}$$

Donde (x_i, y_i) son las coordenas ingresadas en el software y (x_{cc}, y_{cc}) son las coordenadas del certificado de calibración de las marcas fiduciales.

4. Se realiza la orientación exterior. Para ello los pasos seguidos son:

- a. Se identifican los puntos de control, ver tabla 9 e ilustración 25.

Punto	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4
8	x	x		
40			x	x
45			x	x
103	x	x		
104		x	x	x
401 b		x	x	

Tabla 9: Ubicación de los puntos de control.-

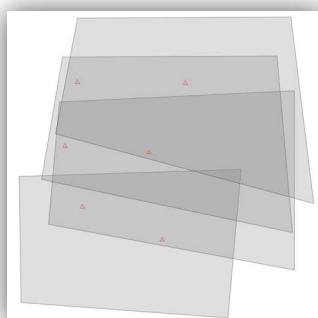


Ilustración 25: Distribución de los puntos de control.- ⁽³⁷⁾

- b. Se identifican 6 puntos de enlace por modelo, de forma manual, según la distribución de Von Grüber. Ver ilustración 26. Dado que se trata de 4 fotos, o 3 modelos, se establecen en total doce puntos de enlace. Ver ilustración 27.

⁽³⁷⁾ Fuente: Software ERDAS IMAGINE 2013.

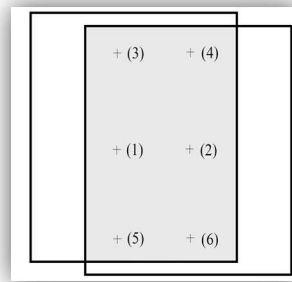


Ilustración 26: Distribución de los puntos de Von Grüber.-

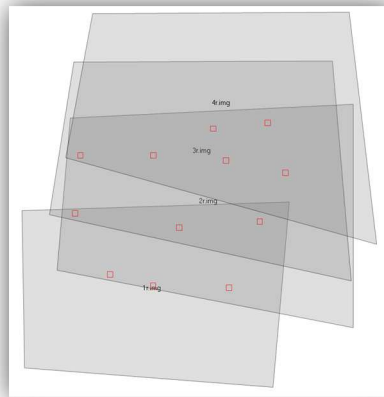


Ilustración 27: Distribución de los puntos de enlace definida en el proyecto.-

- c. Una vez identificados los puntos de control y de enlace, se ejecuta una primera aerotriangulación.
- d. Se configura el software para que realice la identificación automática de puntos de enlace. De esta forma se obtuvieron 53 puntos de enlace adicionales. Véase en la ilustración siguiente la ubicación relativa de las imágenes y la distribución de los puntos antes mencionados.

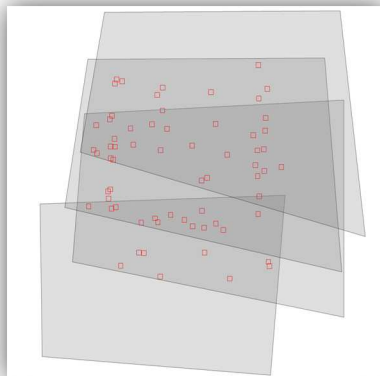


Ilustración 28: Visualización de la totalidad de los puntos de enlace.-

- e. Se configura y ejecuta una nueva aerotriangulación.

Se obtuvo un *Total RMS* ⁽³⁸⁾ de 0.195 m. Mientras que el *RMS* ⁽³⁹⁾ asociado a los puntos de control se muestra en la tabla 10.

Nº Punto de control	RMS (m)
8	4.267
40	3.526
45	4.842
103	3.743
104	4.936
401 b	14.041

Tabla 10: Resultado del RMS de los puntos de control – Triangulación con 6 puntos de control.-

- f. Aceptada la triangulación, se precede a la extracción de las coordenadas de los puntos de testeo haciendo uso de la visión estereoscópica.

Obtenidas estas coordenadas, se calcula las diferencias asociadas a cada componente, es decir (dX, dY, dZ).

Se verifica que las muestras obtenidas cumplan con las condiciones establecidas en el estándar (normalidad y aleatoriedad) y se calcula el valor del estadístico NSSDA, obteniéndose como resultado:

$$NSSDA_{XY} = 8.045 \text{ m}$$

$$NSSDA_Z = 12.821 \text{ m}$$

Se entiende entonces, que los estimadores son demasiado elevados en comparación a los valores manejados por los proveedores del servicio. Esto condujo a la revisión del procedimiento, a efectos de identificar los elementos cuya configuración pueda modificarse para producir mejores resultados.

- g. Analizando el error medio cuadrático de los puntos de control, pude observarse que el RMS varía entre los 3 y 5 metros, a excepción del punto 401 b ($RMS_{401 b} = 14.041 \text{ m}$). Ver tabla 10.

Este punto se descarta por presentar un RMS muy superior al resto de los puntos de control, ejecutándose una nueva aerotriangulación. Ver ilustración 29.

⁽³⁸⁾ El parámetro identificado como “Total RMS” en el software, es la desviación estándar de peso unitario de todo el ajuste. Esta se calcula se basa en los residuales de las coordenadas imagen y de las coordenadas terreno de los puntos de control.

⁽³⁹⁾ El *RMS* de cada punto es calculado por el software como las diferencia en términos absolutos de las coordenadas ingresadas de los puntos de control y las coordenadas calculadas de los mismos puntos.

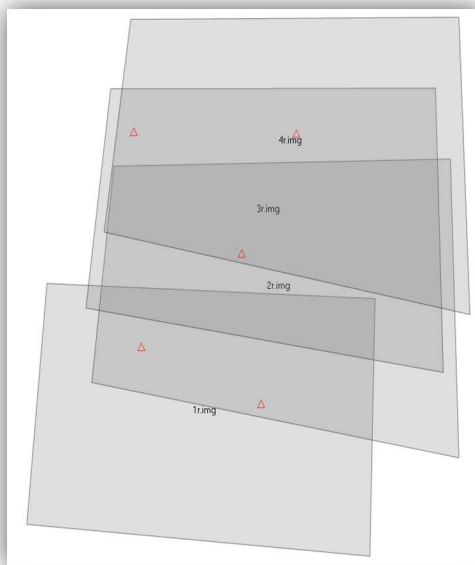


Ilustración 29: Distribución de los puntos de control.-

El resultado obtenido es:

- Total RMS: 0.013 m
- RMS de los puntos de control:

Nº Punto de control	RMS (m)
8	0.093
40	0.219
45	0.050
103	0.458
104	0.274

Tabla 11: Resultado del RMS de los puntos de control - Triangulación con 5 puntos de control.-

Obsérvese como los valores de los RMS se redujeron.

- h. Aceptada la triangulación, se opta por extraer las desviaciones de los puntos de testeo de forma automática, en lugar de extraer las coordenadas de forma manual.

Este cambio se justifica en la falta de experiencia del grupo en el manejo de la estereoscopia. Igualmente, es importante aclarar que el procedimiento de extracción automática de coordenadas requiere la identificación del punto de interés en modo Split.⁽⁴⁰⁾

En la tabla siguiente puede verse el detalle de todo los punto de testeo definidos en las instancias iniciales.

⁽⁴⁰⁾ Del inglés separación o división. Refiere al modo de visualización en pantalla de un par estereoscópico.

Punto	Imagen 1	Imagen 2	Imagen 3	Imagen 4	Observaciones
1					No se visualiza en ningún par estereoscópico
2					No se visualiza en ningún par estereoscópico
3	x	x			
4					No se pudo determinar con precisión su posición
5	x	x			
6					No se pudo determinar con precisión su posición
7	x	x			
9	x	x			
10	x	x			
11	x		x		
12	x	x			
13	x	x			
14	x	x	x		
15					No se visualiza en ningún par estereoscópico
16		x	x		
17					No se pudo determinar con precisión su posición
18		x	x		
19		x	x		
20		x	x		
21		x	x		
22		x	x	x	
23		x	x	x	
24					No se pudo determinar con precisión su posición
25		x	x	x	
26		x	x	x	
27					No se pudo determinar con precisión su posición
28		x	x	x	
29		x	x	x	
30		x	x	x	
31		x	x	x	
32					No se visualiza en ningún par estereoscópico
33		x	x	x	
34			x	x	
35					No se pudo determinar con precisión su posición
36		x	x	x	
37			x	x	
38			x	x	
39			x	x	
41			x	x	
42			x	x	
43			x	x	
44			x	x	
46					No se visualiza en ningún par estereoscópico

Tabla 12: Ubicación de los puntos de testeo.-

- i. Si bien los resultados fueron aceptados por el equipo, se realiza una nueva prueba procurando obtener mejores resultados.
Se generan 50 puntos de enlace adicionales y se triangula nuevamente, obteniéndose los siguientes resultados:

- Total RMS: 0.012 m
- RMS de los puntos de control:

Nº Punto de control	RMS (m)
8	0.108
40	0.251
45	0.114
103	0.454
104	0.319

Tabla 13: Resultado del RMS de los puntos de control - Triangulación con 5 puntos de control y más puntos de enlace.-

En términos generales pueden extraerse dos observaciones:

- El valor del Total RMS refleja una mejoría en este nuevo proceso.
- El RMS de los puntos de control aumentó en 4 puntos y disminuyó solo en 1.

Realizado este breve análisis, se decide dejar a un lado las modificaciones realizadas en el paso i. Dado que las disminuciones de los RMS no justifican el control manual de los 50 puntos de enlace generados automáticamente.

- j. Finalizada la orientación exterior, se obtienen los parámetros correspondientes. Ver tabla 14.

Imagen Nº	X_o (m)	Y_o (m)	Z_o (m)	Ω (°)	φ (°)	K (°)
1	103.955	98.785	122.848	-2.74815	-2.30338	86.50006
2	111.932	161.319	119.583	-6.16240	-11.36241	85.69925
3	115.083	195.150	118.816	-6.52055	-8.91227	85.73612
4	118.177	227.701	117.147	-7.57491	-11.34840	84.78308

Tabla 14: Coordenadas de los centros perspectivos y ángulos de giro de las imágenes.-

Donde:

(X_o, Y_o, Z_o) = Coordenadas de los centros perspectivos de cada toma en el sistema de referencia local.

(Ω, φ, K) = Ángulos de giro asociados a la orientación exterior.

Es importante recordar la condición $B \leq \frac{S}{2}$, presentada en 16.3. Anexo: Plan de vuelo. En la que B es la dimensión de la base y S es la longitud aproximada en el terreno de una imagen. Ver tabla 15.

Tramo		B (m)	$S/2$ (m)
1	2	63	50
3	3	33	
3	4	32	

Tabla 15: Dimensión de la base entre los puntos de toma efectivos.-

Es claro que la condición no se cumple para el tramo 1-2. Esto refleja que el centro perspectivo de la primera imagen, en el momento de la toma, estaba más alejado del centro perspectivo siguiente que lo que debió haber estado para obtener un solapamiento efectivo del 60%.

8.4.2 Resultado

En el 16.11. *Anexo: Coordenadas definitivas relevadas con procedimientos fotogramétricos* pueden apreciarse las coordenadas definitivas de los puntos de testeo relevadas en esta etapa.

9 ETAPA 4: DETERMINACIÓN DE LA CALIDAD POSICIONAL

9.1 INTRODUCCIÓN

En la presente etapa se encuentra el desarrollo práctico asociado a la determinación de la calidad posicional del relevamiento fotogramétrico, en términos absolutos y relativos.

Es oportuno aclarar que la determinación de la calidad relativa no constituía uno de los objetivos definidos en las primeras instancias de la investigación. Igualmente se incluyó en esta etapa, dado que conocer qué ocurre en términos relativos constituye información de interés para el equipo de investigación.

9.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

Determinar el estadístico NSSDA para un nivel de confianza del 95%.

9.3 REQUERIMIENTOS PREVIOS

9.3.1 Justificación

Determinadas las diferencias dX, dY, dZ entre las coordenadas releavadas topográficamente y fotogramétricamente, es necesario asegurar que los tres grupos de datos cumplen con los requerimientos establecidos por el estándar NSSDA.

Recuérdese que estos requerimientos son:

- Los puntos de control deben distribuirse de forma uniforme en el territorio.
- Las diferencias dX, dY, dZ deben ser muestras aleatorias.
- La distribución asociada a las muestras aleatorias dX, dY, dZ debe ser normal.

En primera instancia se analiza la distribución espacial de los puntos de control. Finalmente, para probar la aleatoriedad y normalidad de los residuales, se realizan los test de rachas y Kolmogorov Smirnov.

9.3.2 Distribución espacial de los puntos de control

En lo que refiere a la distribución espacial, el estándar recomienda que se cuente con un mínimo del 20% de los puntos de testeo en cada uno de los cuatro cuadrantes que subdividen la zona en estudio. Véase la ilustración siguiente.

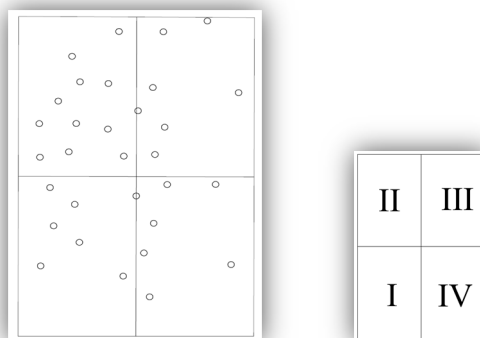


Ilustración 30: Distribución de los puntos de testeo.-

Cuantitativamente, la distribución se sintetiza en la tabla siguiente.

Zona	Número Puntos	Porcentaje
<i>Toda</i>	31	100 %
<i>Primer cuadrante</i>	6	19%
<i>Segundo cuadrante</i>	11	35%
<i>Tercer cuadrante</i>	7	23%
<i>Cuarto cuadrante</i>	7	23%

Tabla 16: Distribución de los puntos de testeo en la zona de estudio.-

Como puede apreciarse, en el primer cuadrante no se alcanza el mínimo de puntos de testeo establecido por el estándar. De todas formas se consideró que la distribución es apropiada, pues solo falta un punto porcentual para alcanzar el 20% recomendado.

Asimismo, es importante recordar que el cambio realizado en la planificación del vuelo no contempló la distribución de puntos de testeo.

9.3.3 Aleatoriedad: Test de rachas

9.3.3.1 Fundamento teórico

Asumiendo como hipótesis nula la aleatoriedad de los datos, con su correspondiente hipótesis alternativa, es válido expresar:

$$\begin{cases} H_o: \text{la muestra es aleatoria} \\ H_a: \text{la muestra no es aleatoria} \end{cases}$$

Existe un contraste específico para comprobar la hipótesis nula conocido como Test de rachas. Aplicando este test es posible detectar tendencias, aceptando o no la aleatoriedad de los datos.

Los cálculos se realizaron según lo establece Rodríguez Avi, J. (2008) en el Módulo 2 de su libro *Título de experto universitario en evaluación de la calidad de la información geográfica*.

9.3.3.2 Cálculos

El procedimiento puede resumirse en 6 pasos, realizados una vez para cada muestra.

Las tablas asociadas a la determinación del estadístico R se presentan en el apartado 16.12.1. Test de rachas de 16.12. Anexo: Cálculos asociados a los requerimientos previos del estándar NSSDA

9.3.3.2.1 Diferenciales X

1. Formulación de hipótesis:

$$\begin{cases} H_o: \text{la muestra } dX \text{ es aleatoria} \\ H_a: \text{la muestra } dX \text{ no es aleatoria} \end{cases}$$

2. Determinación del número de rachas: $R = 13$

3. Cálculo de los estadísticos intermedios.

- Parámetros n_1 y n_2 : $n_1 = 14$ y $n_2 = 15$
- Media de R : $\mu_R = 15.48$
- Desviación muestral de R : $\sigma_R = 2.55$

4. Determinación del estadístico Z_R

$$Z_R = \frac{R - \mu}{\sigma}$$

$$Z_R = -0.97$$

5. Determinación del valor crítico: $Z_{1-\alpha/2}$, para un nivel de confianza de 99%.

$$Z_{1-\alpha/2} = 2.57$$

6. Obtención de resultados.

$$|Z_R| < Z_{1-\alpha/2} \Rightarrow \text{La muestra } dX \text{ es aleatoria.}$$

9.3.3.2.2 Diferenciales Y

1. Formulación de hipótesis:

$$\begin{cases} H_o: \text{la muestra } dY \text{ es aleatoria} \\ H_a: \text{la muestra } dY \text{ no es aleatoria} \end{cases}$$

2. Determinación del número de rachas: $R = 17$

3. Cálculo de estadísticos intermedios

- a. Parámetros n_1 y n_2 : $n_1 = 14$ y $n_1 = 15$
- b. Media de R: $\mu_R = 15.48$
- c. Desviación muestral de R: $\sigma_R = 2.55$

4. Determinación del estadístico Z_R

$$Z_R = 0.59$$

5. Determinación del valor crítico: $Z_{1-\alpha/2}$, para un nivel de confianza de 99%.

$$Z_{1-\alpha/2} = 2.57$$

6. Obtención de resultados.

$$|Z_R| < Z_{1-\alpha/2} \Rightarrow \text{La muestra } dY \text{ es aleatoria.}$$

9.3.3.2.3 Diferenciales Z

1. Formulación de hipótesis:

$$\begin{cases} H_o: \text{la muestra } dZ \text{ es aleatoria} \\ H_a: \text{la muestra } dZ \text{ no es aleatoria} \end{cases}$$

2. Determinación del número de rachas: $R = 16$

3. Cálculo de estadísticos intermedios

- a. Parámetros n_1 y n_2 : $n_1 = 14$ y $n_1 = 14$
- b. Media de R: $\mu_R = 15.00$
- c. Desviación muestral de R: $\sigma_R = 2.59$

4. Determinación del estadístico Z_R

$$Z_R = 0.38$$

5. Determinación del valor crítico: $Z_{1-\alpha/2}$, para un nivel de confianza de 99%.

$$Z_{1-\alpha/2} = 2.57$$

6. Obtención de resultados.

$$|Z_R| < Z_{1-\alpha/2} \Rightarrow \text{La muestra } dZ \text{ es aleatoria.}$$

9.3.4 Normalidad: Test Kolmogrov Smirnov

9.3.4.1 Fundamento teórico

Este test es aplicable sobre variables de tipo continuo. Se basa en la comparación de la función distribución teórica propuesta por el modelo, con la función de distribución empírica.

Las hipótesis referidas a este test son las siguientes:

$$\begin{cases} H_0: \text{Los datos de la muestra se ajustan a la distribución dada por } F(x) \\ H_a: \text{Los datos de la muestra no se ajustan a la distribución dada por } F(x) \end{cases}$$

Este test también se realiza según el procedimiento sugerido por Rodríguez Avi (2008). Dicho procedimiento consta de cinco etapas:

1. Formulación de las hipótesis nula y alternativa
2. Ordenar la muestra:

$$x_{(1)}, \dots, x_{(N)}$$

3. Construir la función de distribución empírica:

$$S_N(x_{(i)}) = \frac{i}{N}$$

4. Calcular el valor del estadístico:

$$d_N = \max_{1 \leq i \leq N} |F(x_{(i)}) - S_N(x_{(i)})|$$

5. Obtención de resultados:

$$\text{Se rechaza la hipótesis nula si } p = P[D_N > d_n] < \alpha$$

9.3.4.2 Cálculos

9.3.4.2.1 Diferencial X

1. Formulación de hipótesis.

$$\begin{cases} H_0: \text{Los datos de la muestra } dX \text{ se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \\ H_a: \text{Los datos de la muestra } dX \text{ no se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \end{cases}$$

2. Ordenar la muestra, construir la función de distribución empírica y calcular el estadístico d_N .⁽⁴¹⁾

$$\text{Estadístico: } d_N = \max(|D_i|)$$

$$d_N = 0.076$$

⁽⁴¹⁾ Las tablas asociadas a este procedimiento se presentan en el apartado 16.12.2. Construcción de la función empírica: Test de Kolmogrov Smirnov.

Estadístico de contraste para un nivel de confianza de 99 %

$$d_{99\%} = 0.187$$

3. Obtención de resultados:

$$d_n < d_{99\%} \Rightarrow \text{Los datos de la muestra } dX \text{ se ajustan a una distribución normal } N(\mu, \sigma).$$

9.3.4.2.2 Diferencial Y

1. Formulación de hipótesis.

$$\begin{cases} H_0: \text{Los datos de la muestra } dY \text{ se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \\ H_a: \text{Los datos de la muestra } dY \text{ no se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \end{cases}$$

2. Ordenar la muestra, construir la función de distribución empírica y calcular el estadístico d_N .⁽⁴²⁾

$$\text{Estadístico: } d_N = \max(|D_i|)$$

$$d_N = 0.064$$

Estadístico de contraste para un nivel de confianza de 99 %

$$d_{99\%} = 0.187$$

3. Obtención de resultados:

$$d_n < d_{99\%} \Rightarrow \text{Los datos de la muestra } dY \text{ se ajustan a una distribución normal } N(\mu, \sigma).$$

9.3.4.2.3 Diferencial Z

1. Formulación de hipótesis.

$$\begin{cases} H_0: \text{Los datos de la muestra } dZ \text{ se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \\ H_a: \text{Los datos de la muestra } dZ \text{ no se ajustan a la distribución dada por } N(\mu, \sigma) \end{cases}$$

2. Ordenar la muestra, construir la función de distribución empírica y calcular el estadístico d_N .⁽⁴³⁾

$$\text{Estadístico: } d_N = \max(|D_i|)$$

$$d_N = 0.059$$

Estadístico de contraste para un nivel de confianza de 99 %

$$d_{99\%} = 0.190$$

3. Obtención de resultados:

$$d_n < d_{99\%} \Rightarrow \text{Los datos de la muestra } dZ \text{ se ajustan a una distribución normal } N(\mu, \sigma).$$

⁽⁴²⁾ Las tablas asociadas a este procedimiento se presentan en el apartado 16.12.2. Construcción de la función empírica: Test de Kolmogorov Smirnov.

⁽⁴³⁾ Las tablas asociadas a este procedimiento se presentan en el apartado 16.12.2. Construcción de la función empírica: Test de Kolmogorov Smirnov.

9.3.5 Síntesis de los requerimientos previos

La distribución espacial de los puntos de control no satisface de forma estricta el estándar, igualmente, por las modificaciones del plan de vuelo presentadas en 7.4.4. *Observaciones* se acepta la distribución.

En base a los test estadísticos de Rachas y Kolmogorov Smiroff, puede afirmarse que tanto dX , como dY y dZ constituyen muestras aleatorias cuya distribución es normal.

Por estas razones, es posible proseguir el estudio de calidad posicional, calculando a continuación el estadístico NSSDA y la desviación estándar relativa de los datos.

9.4 CALIDAD EN TÉRMINOS ABSOLUTOS

9.4.1 Aplicación del estándar

En la tabla siguiente pueden apreciarse los cálculos asociados a la determinación del estadístico NSSDA. ⁽⁴⁴⁾

Punto	dX (m)	dY (m)	dZ (m)	dX^2 (m ²)	dY^2 (m ²)	$dX^2 + dY^2$ (m ²)	dZ^2 (m ²)
3	0,093	-0,016	-0,011	0,009	0,000	0,009	0,000
5	0,104	-0,074	-0,338	0,011	0,005	0,016	0,114
7	0,033	0,029	0,164	0,001	0,001	0,002	0,027
9	-0,318	-0,149	0,629	0,101	0,022	0,123	0,396
10	-0,054	-0,017	0,076	0,003	0,000	0,003	0,006
12	0,017	-0,009	0,132	0,000	0,000	0,000	0,017
13	0,002	-0,042	-0,162	0,000	0,002	0,002	0,026
14	-0,113	-0,054	0,489	0,013	0,003	0,016	0,239
16	0,037	0,057	0,337	0,001	0,003	0,005	0,114
18	-0,084	0,079	0,151	0,007	0,006	0,013	0,023
19	-0,132	0,122	0,233	0,017	0,015	0,032	0,054
20	-0,089	0,074	-0,108	0,008	0,005	0,013	0,012
21	0,006	0,072	0,542	0,000	0,005	0,005	0,294
22	0,007	0,112	1,275	0,000	0,013	0,013	1,626
23	-0,017	0,024	0,173	0,000	0,001	0,001	0,030
25	-0,066	0,039	-0,300	0,004	0,002	0,006	0,090
26	-0,085	0,065	-0,397	0,007	0,004	0,011	0,158
28	-0,112	0,062	-0,510	0,013	0,004	0,016	0,260
29	-0,093	0,003	-0,448	0,009	0,000	0,009	0,201
30	-0,064	0,020	-0,218	0,004	0,000	0,004	0,048
31	-0,060	0,186	0,926	0,004	0,035	0,038	0,857
33	0,002	0,092	0,383	0,000	0,008	0,008	0,147
36	0,027	-0,067	0,737	0,001	0,004	0,005	0,543
38	-0,156	0,029	-0,588	0,024	0,001	0,025	0,346
39	-0,125	-0,026	-0,657	0,016	0,001	0,016	0,432
41	-0,117	-0,032	-0,810	0,014	0,001	0,015	0,656
42	-0,234	0,006	-1,456	0,055	0,000	0,055	2,120
43	-0,187	0,049	0,000	0,035	0,002	0,037	0,000
44	0,007	0,037	-0,183	0,000	0,001	0,001	0,033
				suma (m ²)		0,502	8,867
				promedio (m ²)		0,018	0,328
				RMS (m)		0,134	0,573
				NSSDA (m)		0,232	1,123

Tabla 17: Aplicación del estándar.-

⁽⁴⁴⁾ El punto N° 43 solo se tuvo en cuenta en planimetría, dado que no fue posible obtener su cota en el relevamiento topográfico.

9.4.2 Enunciado del resultado

Precisión posicional testada: 0.232 metros en horizontal y 1.123 metros en vertical de precisión para un nivel de confianza de 95%.

9.5 CALIDAD EN TÉRMINOS RELATIVOS

9.5.1 Justificación

Es importante notar, que la redacción del estándar NSSDA refiere a la diferencia en términos absolutos de dos relevamientos, calculando el estadístico NSSDA en base a las diferencias dX, dY, dZ .

Si bien, en términos absolutos se obtuvo una precisión igual a 0.232 m en planimetría y 1.123 m en altimetría, para un nivel de confianza de 95%, también es posible determinar la calidad posicional en términos relativos.

9.5.2 Fundamento teórico

Al igual que para determinar la calidad en términos absolutos, es necesario contrastar los datos medidos fotogramétricamente con datos relevados topográficamente, asumiendo a los segundos libres de error.

9.5.2.1 Procedimiento en planimetría

1. Determinar todas las posibles combinaciones de puntos:

$$m = \frac{n(n-1)}{2}$$

Donde m es el número de combinaciones posibles y n es el número de puntos de testeo.

2. Calcular el residual absoluto (dX, dY) en las coordenadas X e Y de todos los puntos.

$$\begin{aligned}dX_i &= X_{Foto_i} - X_{Topo_i} \\dY_i &= Y_{Foto_i} - Y_{Topo_i}\end{aligned}$$

Donde (X_{Foto_i}, Y_{Foto_i}) y (X_{Topo_i}, Y_{Topo_i}) son las coordenadas del punto i relevadas con procedimientos fotogramétricos y topográficos respectivamente.

3. Calcular el error relativo ($\Delta X_{rel\ kj}, \Delta Y_{rel\ kj}$) para todas las combinaciones de pares de puntos.

$$\Delta X_{rel\ kj} = dX_k - dX_j \text{ con } k = 1..m-1, j = k+1..m$$

$$\Delta Y_{rel\ kj} = dY_k - dY_j \text{ con } k = 1..m-1, j = k+1..m$$

4. Calcular la desviación estándar asociada a cada componente: $(\sigma_{X_{rel}}, \sigma_{Y_{rel}})$.

$$\begin{aligned}\sigma_{X_{rel}} &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta X_{rel\ kj})^2}{m-1}} \\ \sigma_{Y_{rel}} &= \sqrt{\frac{\sum (\Delta Y_{rel\ kj})^2}{m-1}}\end{aligned}$$

- Calcular la desviación estándar inicial planimétrica.

$$\sigma_{plani_inicial} = \sqrt{\frac{\sigma_{X_rel}^2 + \sigma_{Y_rel}^2}{2}}$$

- Calcular la desviación estándar para un nivel de confianza del 90%.

$$\sigma_{plani} = 2.146 * \sigma_{plani_inicial}$$

9.5.2.2 Procedimiento en altimetría

- Determinar de todas las posibles combinaciones de puntos:

$$m = \frac{n(n-1)}{2}$$

- Calcular el residual absoluto (dZ) asociado a la coordenada Z de todos los puntos.

$$dZ_i = Z_{Foto_i} - Z_{Topo_i}$$

Donde Z_{Foto_i} y Z_{Topo_i} son las coordenadas Z del punto i relevadas con procedimientos fotogramétricos y topográficos respectivamente.

- Calcular el error relativo ($\Delta Z_{rel\ kj}$) para todas las combinaciones de pares de puntos.

$$\Delta Z_{rel\ kj} = dZ_k - dZ_j \text{ con } k = 1..m-1, j = k+1..m$$

- Calcular la desviación estándar inicial asociada a la componente Z : ($\sigma_{alti_inicial}$).

$$\sigma_{alti_inicial} = \sqrt{\frac{\sum (\Delta Z_{rel\ kj})^2}{m-1}}$$

- Calcular la desviación estándar para un nivel de confianza del 90%.

$$\sigma_{alti} = 1.645 * \sigma_{alti_inicial}$$

Los cálculos asociados al procedimiento descrito se presentan en 16.13. Anexo: Cálculos referentes a la calidad posicional relativa.

9.5.3 Valores obtenidos

- Planimetría
 - Número de puntos: $n = 29$
 - Número de combinaciones de pares de puntos: $m = 406$
 - Desviación estándar inicial:
 - En la coordenada X : $\sigma_{X_rel} = 0.133\ m$
 - En la coordenada Y : $\sigma_{Y_rel} = 0.096\ m$
 - En planimetría: $\sigma_{plani_inicial} = 0.116\ m$
 - Desviación estándar para un nivel de confianza del 90 %:

$$\sigma_{plani} = 0.250\ m$$

- Altimetría
 - Número de puntos: $n = 28$
 - Número de combinaciones de pares de puntos: $m = 378$
 - Desviación estándar inicial: $\sigma_{Z_rel} = 0.811\ m$
 - Desviación estándar para un nivel de confianza del 90 %:

$$\sigma_{alti} = 1.335\ m$$

10 ETAPA 5: RESULTADOS Y ANÁLISIS

10.1 INTRODUCCIÓN

A continuación, a modo introductorio se presenta una breve reseña de las características del control posicional efectuado.

Luego se presentan los resultados obtenidos en términos absolutos y relativos. En particular, se muestra la distribución espacial de la componente planimétrica y altimétrica de los residuales.

Posteriormente se analizan los vectores residuales desde tres perspectivas fundamentales:

- La magnitud de las componentes.
- La dirección.
- La distribución espacial.

Por último, se realiza el análisis de los diferentes factores involucrados en el proceso que dio lugar a la obtención del producto, a efectos de identificar las posibles fuentes de error que influyeron en la magnitud de los residuales calculados previamente.

10.2 OBJETIVO ESPECÍFICO

- Presentar de forma ordenada los resultados obtenidos en lo referente a la calidad posicional del relevamiento fotogramétrico.
- Analizar los vectores residuales de los puntos de testeo.
- Analizar el procedimiento de restitución, a efectos de reconocer cuáles tareas podían haberse realizado de forma diferente para obtener mejores resultados.

10.3 RESEÑA DE LAS CONDICIONES DEL TESTEO

A continuación se caracterizan las condiciones bajo las cuales se realizó el control posicional desarrollado en este informe. Si bien estos datos ya han sido presentados en páginas anteriores, es importante tenerlos en cuenta ya que son los determinantes de los resultados obtenidos.

Sobre el relevamiento a controlar:

- Tipo de relevamiento: Relevamiento fotogramétrico.
- Equipos utilizados:
 - Drone md4-1000
 - Cámara digital Sony NEX-7
 - Software ERDAS IMAGINE 2013.
- Altura relativa de vuelo: 100 m.
- Nº de líneas de vuelo: 1.
- Nº de fotos: 4.
- Puntos de control:
 - Nº de puntos utilizados: 5.
 - Distribución: Cuatro en los extremos y uno en la zona centro-oeste del modelo estereoscópico. Ver ilustración siguiente.

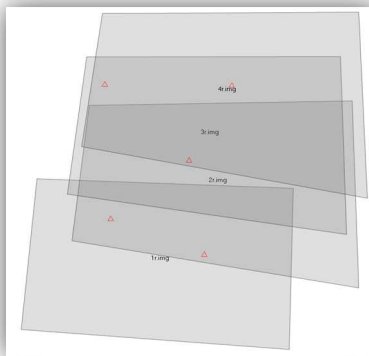


Ilustración 31: Ubicación de los puntos de control.- ⁽⁴⁵⁾

- Método de relevamiento: Radiación con estación total en planimetría y nivelación geométrica doble simultánea en altimetría.
- Puntos de enlace:
 - 12 puntos ubicados manualmente según la distribución de Von Grüber.
 - 53 puntos generados automáticamente.
- Puntos de testeo:
 - Nº de puntos medidos: 29.
 - Distribución: Según lo establece el manual del estándar NSSDA.

Sobre el relevamiento de contraste:

- Tipo de relevamiento: Relevamiento topográfico.
- Equipos utilizados:
 - Estación total Leica 407.
 - Nivel automático Pentax.
- Metodología:
 - Planimetría: Radiación con giro y tránsito.
 - Altimetría: Nivelación geométrica doble simultánea en circuitos cerrados interconectados.

10.4 RESULTADOS EN TÉRMINOS ABSOLUTOS

10.4.1 Parámetros obtenidos

Los valores calculados del estadístico NSSDA para un nivel de confianza del 95% se presentan en la tabla siguiente.

	<i>NSSDA (m)</i>
Planimetría	0.232
Altimetría	1.123

Tabla 18: Estadístico NSSDA d el relevamiento fotogramétrico.-

⁽⁴⁵⁾ Fuente: Software ERDAS IMAGINE

10.5 RESULTADO EN TÉRMINOS RELATIVOS

La desviación estándar asociada al relevamiento fotogramétrico para un nivel de confianza del 90% se presenta en la tabla siguiente.

	σ (m)
Planimetría	0.250
Altimetría	1.335

Tabla 19: Desviación estándar del relevamiento fotogramétrico en términos relativos.-

10.6 ANÁLISIS

10.6.1 Análisis de las magnitudes de los residuales

10.6.1.1 Justificación

A continuación se presenta el análisis referente a la magnitud de los residuales en sus tres componentes dX , dY y dZ , así como en su componente planimétrica d_{XY} . En particular se muestran gráficamente las magnitudes y la distribución en quintiles de las mismas.

Véase a continuación la tabla 20 los valores que se analizan bajo este título.

Punto	dX (m)	dY (m)	dZ (m)
3	0,093	-0,016	-0,011
5	0,104	-0,074	-0,338
7	0,033	0,029	0,164
9	-0,318	-0,149	0,629
10	-0,054	-0,017	0,076
12	0,017	-0,009	0,132
13	0,002	-0,042	-0,162
14	-0,113	-0,054	0,489
16	0,037	0,057	0,337
18	-0,084	0,079	0,151
19	-0,132	0,122	0,233
20	-0,089	0,074	-0,108
21	0,006	0,072	0,542
22	0,007	0,112	1,275
23	-0,017	0,024	0,173
25	-0,066	0,039	-0,300
26	-0,085	0,065	-0,397
28	-0,112	0,062	-0,510
29	-0,093	0,003	-0,448
30	-0,064	0,020	-0,218
31	-0,060	0,186	0,926
33	0,002	0,092	0,383
36	0,027	-0,067	0,737
38	-0,156	0,029	-0,588
39	-0,125	-0,026	-0,657
41	-0,117	-0,032	-0,810
42	-0,234	0,006	-1,456
43	-0,187	0,049	0,000
44	0,007	0,037	-0,183

Tabla 20: Residuales asociados al relevamiento fotogramétrico

10.6.1.2 Diferencial X

1. Análisis gráfico

En la ilustración 32, puede apreciarse en el eje de las ordenadas la magnitud en centímetros de la componente X los residuales. Corresponde aclarar que en el gráfico se representa la muestra ordenada en forma creciente.

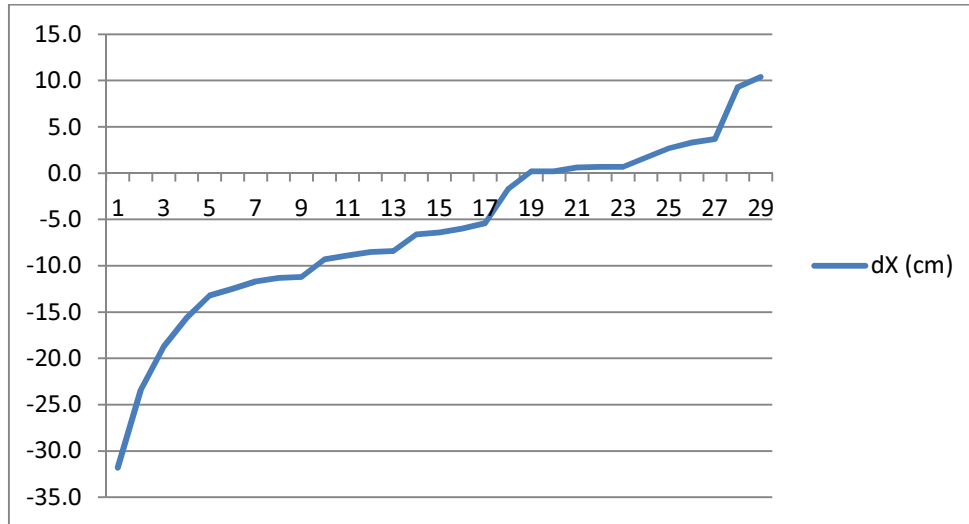


Ilustración 32: Magnitud de dX de los puntos de testeo

En este gráfico puede observarse que:

- $dX < 0$ para 18 puntos de testeo.
- $dX > 0$ para 11 puntos de testeo.
- El máximo de la muestra es 10.4 cm
- El mínimo de la muestra es -31.8 cm
- El rango ⁽⁴⁶⁾ de la muestra es igual a 42.2 cm
- La media $(\frac{1}{n} \sum dX)$: -6.1 cm
- La media de los valores absolutos $(\frac{1}{n} \sum |dX|)$: 8.4 cm

2. Análisis por quintiles del valor absoluto de los diferenciales ⁽⁴⁷⁾

Corresponde aclarar que se representa el valor absoluto a efectos de mostrar el apartamiento de los residuales del caso ideal, en el que $dX = 0$.

Ver ilustración siguiente.

⁽⁴⁶⁾ El rango se define como la diferencia entre el valor máximo y mínimo de una muestra.

⁽⁴⁷⁾ Una vez ordenada la muestra de menor a mayor, el quintil Q20% corresponde al valor más alto de la variable, por debajo de la cual se encuentra el 20% de las observaciones. Análogamente se definen los quintiles Q40%, Q60%, Q80% y Q100%.

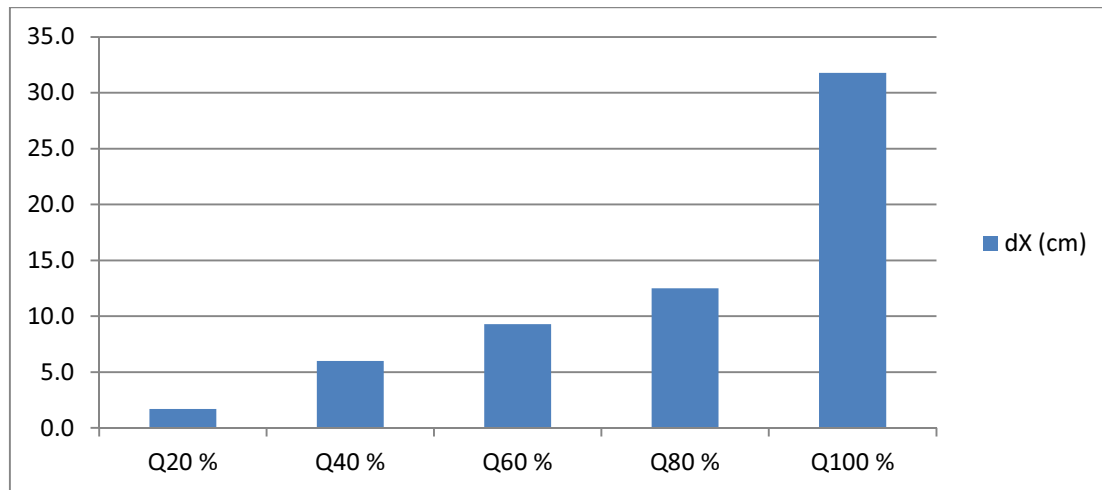


Ilustración 33: Quintiles asociados a la muestra dX

En términos cuantitativos, la ilustración precedente se corresponde con los siguientes valores, ver tabla 21.

<i>Quintil</i>	<i> dX (cm)</i>
Q20%	1,7
Q40%	6,0
Q60%	9,3
Q80%	12,5
Q100%	31,8

Tabla 21: Quintiles asociados a la muestra dX

Es de destacar que:

- Para el 60 % de los puntos de testeo se cumple que:
 $|dX| < 9.3 \text{ cm}$

Esto refleja que para el 60% de los puntos de testeo, la componente X determinada por procedimientos fotogramétricos difiere menos de 9.3 cm de la misma componente relevada en campo con procedimientos topográficos.

- En el último quintil se encuentran las componentes dX mayores a 12.5 cm y menores a 31.8 cm. Esto implica que solo el 20 % de los puntos de testeo tienen residuales, cuya componente X , en términos absolutos está comprendida en el mencionado intervalo.

En términos matemáticos puede expresarse que el 20% de los puntos de testeo se cumplen con la siguiente desigualdad:

$$12.5 \text{ cm} < |dX| \leq 31.8 \text{ cm}$$

10.6.1.3 Diferencial Y

1. Análisis gráfico

En la ilustración 34, puede apreciarse en el eje de las ordenadas la magnitud en centímetros de la componente Y los residuales. Corresponde aclarar que en el gráfico se representa la muestra ordenada en forma creciente.

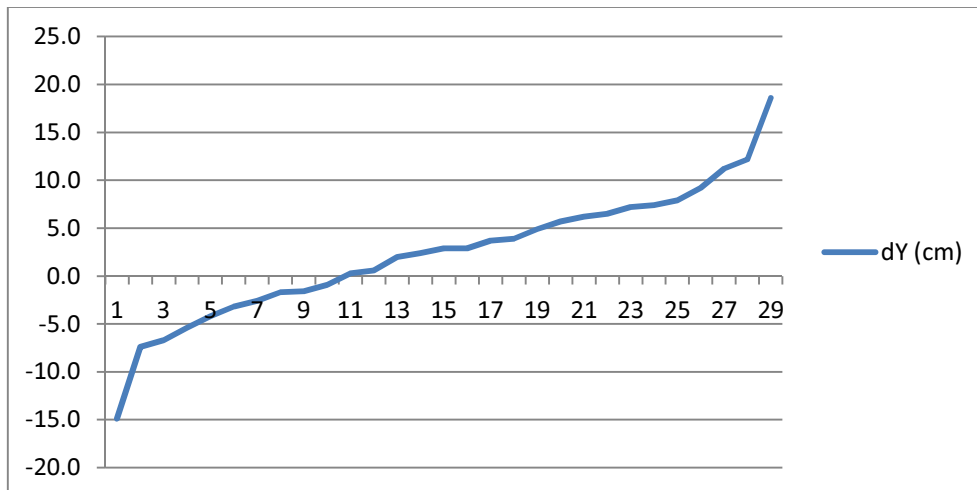


Ilustración 34: Magnitud de dY de los puntos de testeo

En este gráfico puede observarse que:

- $dY < 0$ para 10 puntos de testeo.
- $dY > 0$ para 19 puntos de testeo.
- El máximo de la muestra es 18.6 cm.
- El mínimo de la muestra es -14.9 cm.
- El rango de la muestra es igual a 33.5 cm.
- La media ($\frac{1}{n} \sum dY$): -2.3 cm.
- La media de los valores absolutos ($\frac{1}{n} \sum |dY|$): 5.7 cm.

2. Análisis por quintiles del valor absoluto de los diferenciales:

Ver ilustración siguiente.

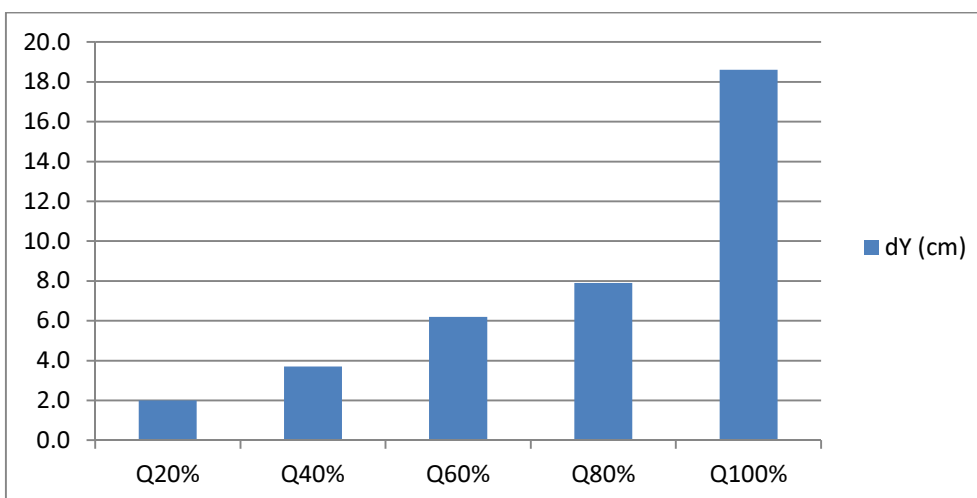


Ilustración 35: Quintiles asociados a la muestra dY

En términos cuantitativos la ilustración precedente se corresponde con los siguientes valores, ver tabla 22.

<i>Quintil</i>	<i>dY (cm)</i>
Q20%	2,0
Q40%	3,7
Q60%	6,2
Q80%	7,9
Q100%	18,6

Tabla 22: Quintiles asociados a la muestra dY.-

Es de destacar que:

- Para el 60 % de los puntos de testeo se cumple que:

$$|dY| < 6.2 \text{ cm}$$

Esto refleja que para el 60% de los puntos de testeo, la componente Y determinada por procedimientos fotogramétricos difiere menos de 6.2 cm de la misma componente relevada en campo con procedimientos topográficos.

- En el último quintil se encuentran las diferencias dY mayores a 7.9 cm y menores a 18.6 cm. Esto implica que el 20 % de los puntos de testeo tienen residuales, cuya componente Y , en términos absolutos está comprendida en el mencionado intervalo.

En términos matemáticos puede expresarse que para el 20% de los puntos de testeo se cumple que:

$$7.9 \text{ cm} < |dY| \leq 18.6 \text{ cm}$$

10.6.1.4 Planimetría

1. Distribución porcentual

En el gráfico siguiente, puede apreciarse en términos porcentuales, la cantidad de residuales asociados a cada una de las categorías presentadas en la tabla 23 en la totalidad del área en estudio.

Corresponde aclarar que en el gráfico se representa la muestra ordenada en forma creciente

Nótese además, que todos los residuales planimétricos d_{XY} son positivos dado que se calculan según la siguiente expresión.

$$d_{XY} = \sqrt{dX^2 + dY^2}$$

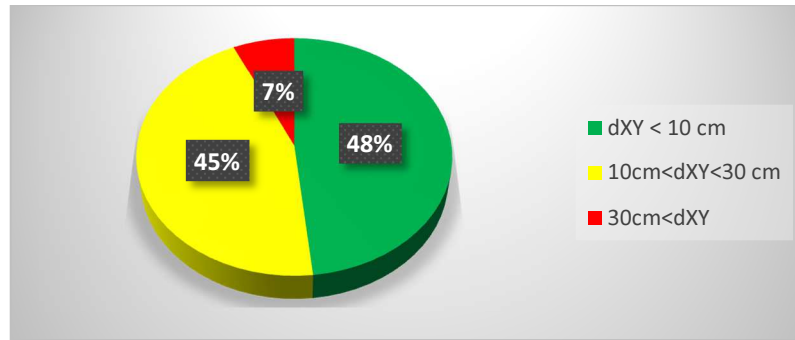


Ilustración 36: Clasificación de los residuales planimétricos. -

Rango	Nº de puntos	Porcentaje
dXY < 10 cm	14	48
10cm < dXY < 30 cm	13	45
30cm < dXY	2	7

Tabla 23: Clasificación de los residuales planimétricos. -

2. Análisis gráfico

En la ilustración 38, puede apreciarse en el eje de las ordenadas la magnitud en centímetros de la componente planimétrica de los residuales. Corresponde aclarar que en el gráfico se representa la muestra ordenada de forma creciente.

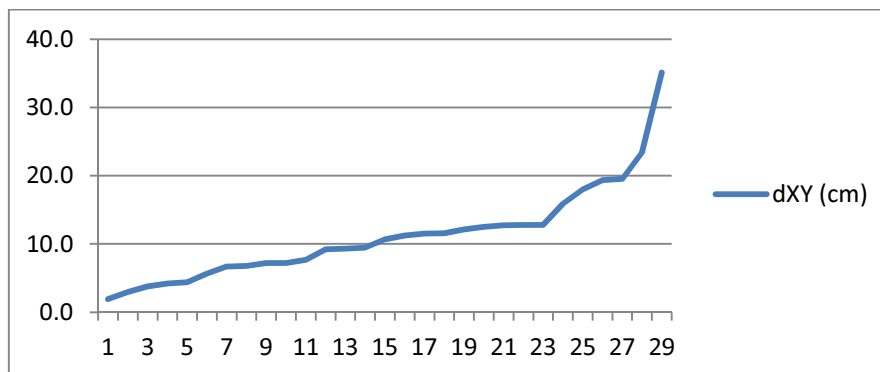


Ilustración 37: Magnitud de dXY de los puntos de testeo. -

En este gráfico puede observarse que:

- El máximo de la muestra es 15.1 cm.
- El mínimo de la muestra es 1.9 cm.
- El rango de la muestra es igual a 33.2 cm.
- La media ($\frac{1}{n} \sum d_{XY}$): 11.2 cm.

3. Análisis por quintiles del valor absoluto de los diferenciales:
Ver ilustración siguiente.

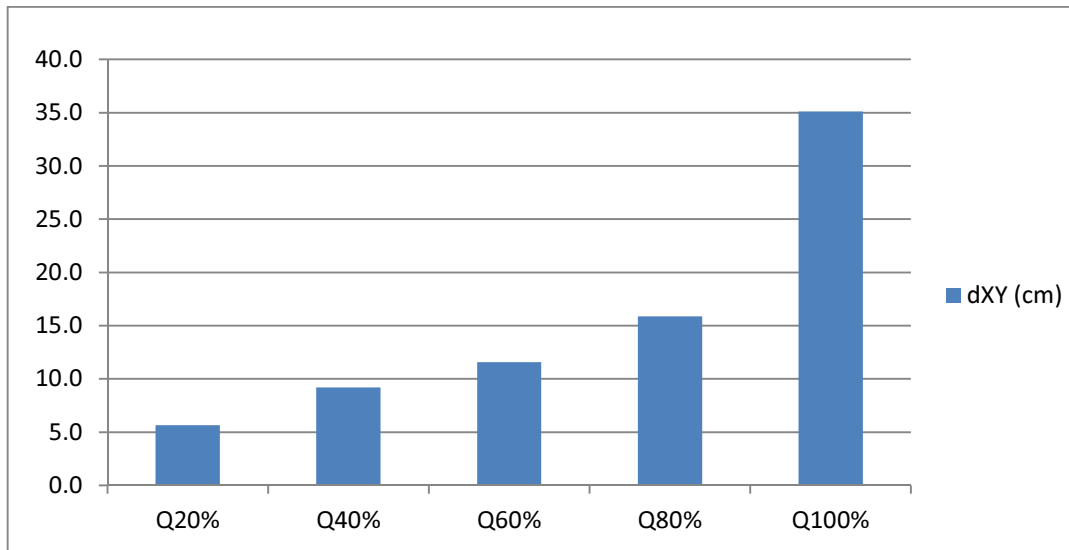


Ilustración 38: Quintiles asociados a la muestra dXY.-

En términos cuantitativos la ilustración precedente se corresponde con los siguientes valores, ver tabla 24.

<i>Quintil</i>	<i>d_{XY} (cm)</i>
Q20%	5,7
Q40%	9,2
Q60%	11,6
Q80%	15,9
Q100%	35,1

Tabla 24: Quintiles asociados a la muestra dXY.-

Es de destacar que:

- Para el 60 % de los puntos de testeo se cumple que:

$$d_{XY} < 11.6 \text{ cm}$$

Esto refleja que para el 60% de los puntos de testeo, la componente planimétrica determinada por procedimientos fotogramétricos difiere menos de 11.6 cm de la misma componente relevada en campo con procedimientos topográficos.

- En el último quintil se encuentran las diferencias d_{XY} mayores a 15.9 cm y menores a 35.1 cm. Esto implica que el 20 % de los puntos de testeo tienen residuales, cuya componente planimétrica, en términos absolutos, está comprendida en el mencionado intervalo.

En términos matemáticos puede expresarse que para el 20% de los puntos de testeo se cumple que:

$$15.9 \text{ cm} < d_{XY} \leq 35.1 \text{ cm}$$

Es importante notar, que aproximadamente este quintil representa la mitad del rango de observaciones.

10.6.1.5 Diferencial Z

1. Distribución porcentual

En el gráfico siguiente, puede apreciarse en términos porcentuales, la cantidad de residuales asociados a cada una de las categorías presentadas en la tabla 25 en la totalidad del área en estudio.

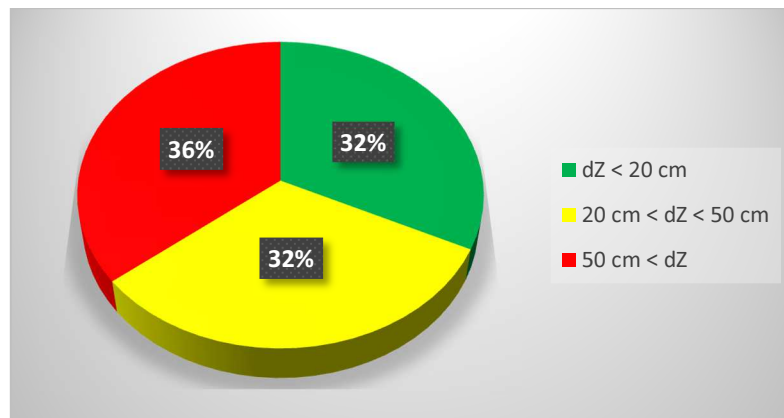


Ilustración 39: Clasificación de los residuales altimétricos.-

Rango	Nº de puntos	Porcentaje
$dZ < 20 \text{ cm}$	9	32
$20 \text{ cm} < dZ < 50 \text{ cm}$	9	32
$50 \text{ cm} < dZ$	10	36

Tabla 25: Clasificación de los residuales altimétricos.-

2. Análisis gráfico

En la ilustración 41, puede apreciarse en el eje de las ordenadas la magnitud en centímetros de la componente Z los residuales. Corresponde aclarar que en el gráfico se representa la muestra ordenada en forma creciente.

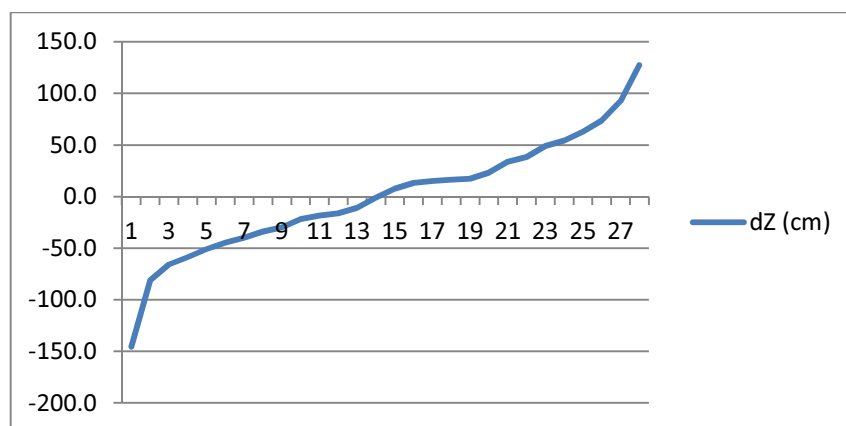


Ilustración 40: Magnitud de dZ de los puntos de testeo

En este gráfico puede observarse que:

- $dZ < 0$ para 14 puntos de testeo.
- $dZ > 0$ para 14 puntos de testeo.
- El máximo de la muestra es 127.5 cm.
- El mínimo de la muestra es -145.6 cm.
- El rango de la muestra es igual a 273.1 cm.
- La media: 21.7 cm.
- La media de los valores absolutos: 44.4 cm.

3. Análisis por quintiles del valor absoluto de los diferenciales:

Ver ilustración siguiente.

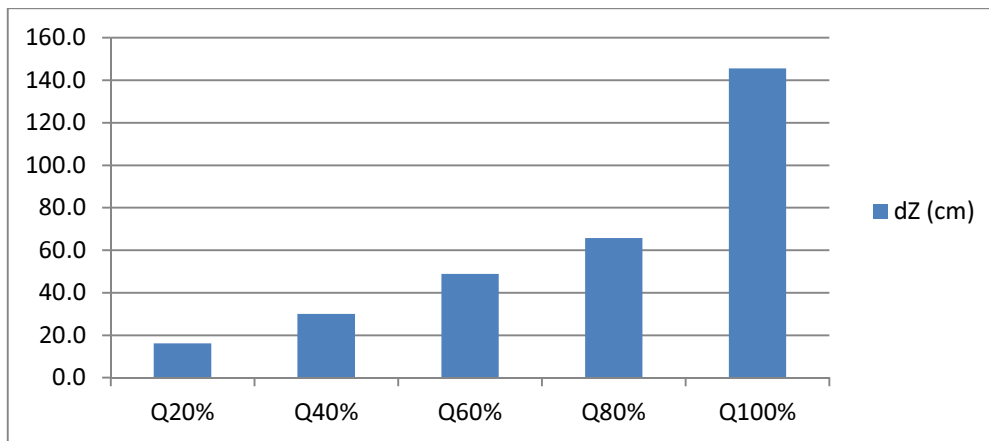


Ilustración 41: Quintiles asociados a la muestra dZ.-

En términos analíticos la ilustración precedente se corresponde con los siguientes valores, ver tabla 26.

Quintil	dZ (cm)
Q20%	16,2
Q40%	30,0
Q60%	48,9
Q80%	65,7
Q100%	145,6

Tabla 26: Quintiles asociados a la muestra dZ.-

Es de destacar que:

- Para el 60 % de los puntos de testeo se cumple que:

$$|dZ| < 48.9 \text{ cm}$$

Esto refleja que para el 60% de los puntos de testeo, la componente Z determinada por procedimientos fotogramétricos difiere menos de 48.9 cm de la misma componente relevada en campo con procedimientos topográficos.

- En el último quintil se encuentran las diferencias dX mayores a 65.7 cm y menores a 145.6 cm. Esto implica que el 20 % de los puntos de testeo tienen residuales, cuya componente Z, en términos absolutos está comprendida en el mencionado intervalo.

En términos matemáticos puede expresarse que para el 20% de los puntos de testeo se cumple que:

$$65.7 \text{ cm} < |dZ| \leq 145.6 \text{ cm}$$

Es importante notar, que este quintil representa más de la mitad del rango de observaciones.

10.6.1.6 Síntesis

En la tabla siguiente se resume el análisis realizado en este título.

	<i>dX</i>	<i>dY</i>	<i>dZ</i>
<i>Nº de puntos con $dX > 0$</i>	11	19	14
<i>Nº de puntos con $dY < 0$</i>	18	10	14
<i>Máximo (cm)</i>	10.4	18.6	127.5
<i>Mínimo (cm)</i>	-31.8	-14.9	-145.6
<i>Rango (cm)</i>	42.2	33.5	273.1
<i>Media (cm)</i>	-6.1	-2.3	21.7
<i>Media de los valores absolutos (cm)</i>	8.4	5.7	44.4

Tabla 27: Análisis de las magnitudes de los residuales.-

Quintil	<i>d_{XY}</i> (cm)	<i>dZ</i> (cm)
Q20%	5,7	16,2
Q40%	9,2	30,0
Q60%	11,6	48,9
Q80%	15,9	65,7
Q100%	35,1	145,6

Tabla 28: Análisis de los residuales por quintiles.-

10.6.2 Análisis de la dirección de los residuales

10.6.2.1 Justificación

A efectos de determinar tendencias en los datos, se realiza el análisis de la dirección de los vectores residuales (*dX*, *dY*, *dZ*) de los puntos de testeo.

Este análisis consiste en la cuantificación de los ángulos que definen la posición en el espacio del vector residual. Ver ilustración siguiente.

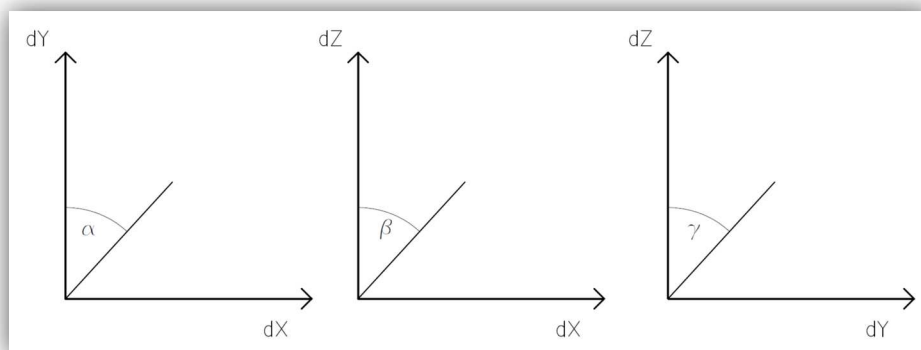


Ilustración 42: Determinación de los ángulos que definen la proyección del vector residual en los distintos planos.-

Es claro que es necesario subdividir el análisis en los tres planos cartesianos, estudiando de forma independiente las siguientes proyecciones:

- Proyección en el plano XY (α).
- Proyección en el plano XZ (β).
- Proyección en el plano YZ (γ).

Es importante notar, que si los datos presentaran alguna tendencia en dirección, es esperable que la proyección de los residuales, en algunos de los planos mencionados, sea similar a la que se representa en la ilustración siguiente.

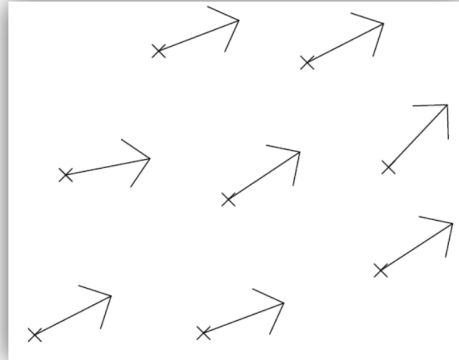


Ilustración 43: Proyección de los residuales.-

Si esto ocurre, las muestras de las observaciones angulares proyectadas:

$$\begin{cases} \alpha_1, \dots, \alpha_n \\ \beta_1, \dots, \beta_n \\ \gamma_1, \dots, \gamma_n \end{cases}$$

constituyen muestras consistentes, por lo que sus desviaciones estándar asociadas (σ_α , σ_β y σ_γ) adoptarían valores bajos. ⁽⁴⁸⁾

En el 16.14 *Anexo: Cálculos asociados al análisis de la dirección de los residuales*, se adjuntan las hojas de cálculo asociadas a la determinación de la posición en el espacio de los vectores residuales.

10.6.2.2 Proyección en el plano XY

Los resultados obtenidos son:

- Dirección promedio de la proyección: $\bar{\alpha} = 204^\circ$
- Desviación estándar: $\sigma_\alpha = 116^\circ$

10.6.2.3 Proyección en el plano XZ

Los resultados obtenidos son:

- Dirección promedio de la proyección: $\bar{\beta} = 177^\circ$
- Desviación estándar: $\sigma_\beta = 218^\circ$

⁽⁴⁸⁾ Esta condición no implica que las desviaciones σ_α , σ_β y σ_γ deban ser pequeñas de forma simultánea.

10.6.2.4 Proyección en el plano YZ

Los resultados obtenidos son:

- Dirección promedio de la proyección: $\bar{\gamma} = 144^\circ$
- Desviación estándar: $\sigma_\gamma = 195^\circ$

10.6.2.5 Síntesis de análisis

En base al análisis antes presentado, es posible deducir que no hay tendencias en lo que refiere a la dirección de los vectores residuales.

Se establece como criterio, utilizar $\sigma_{crítico} = 15^\circ$, para diferenciar las muestras angulares consistentes (que presentan tendencias) de las muestras angulares no consistentes.

Esto se puede afirmar dado que:

$$\sigma_\alpha = 116^\circ \gg \sigma_{crítico}$$

$$\sigma_\beta = 218^\circ \gg \sigma_{crítico}$$

$$\sigma_\gamma = 195^\circ \gg \sigma_{crítico}$$

10.6.3 Análisis espacial de los residuales

CROQUIS DE UBICACIÓN



REFERENCIAS

EXPLANADA EXISTENTE

CAMINO EXISTENTE

LINEA DE VUELO

POLIGONAL PUNTOS DE CONTROL

CONSTRUCCION EXISTENTE

RESIDUAL MENOR A 10 cm

RESIDUAL ENTRE 10 y 20 cm

RESIDUAL MAYOR A 20 cm

PUNTO DE CONTROL

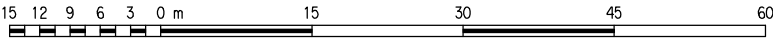
PLANILLA DE RESIDUALES

PUNTO	RESIDUAL (en cm)	PUNTO	RESIDUAL (en cm)
3	9.44	25	7.67
5	12.76	26	10.70
7	4.39	28	12.80
9	35.12	29	9.30
10	5.66	30	6.71
12	1.92	31	19.54
13	4.30	33	9.20
14	12.52	36	7.22
16	6.80	38	15.87
18	11.53	39	12.77
19	17.97	41	12.13
20	11.57	42	23.41
21	7.22	43	19.33
22	11.22	44	3.77
23	2.94		

NOTAS:

- Los valores de los residuales corresponden solo a planimetría.-
- Las infraestructuras se grafican unicamente a efectos visuales.-

ESCALA 1:750



CONTROL POSICIONAL ABSOLUTO
DEL RELEVAMIENTO PLANIMETRIA

Departamento	CANELONES	AREA RELEVADA APROXIMADA:	
Localidad Catastral	BARROS BLANCOS	Hás.	m²
		1	4000

PROPIETARIO:
DONIRAL S.A.

Escala 1:750

Fecha Setiembre de 2014

VERONICA PAMPINELLA

MELISSA PEREZ

CROQUIS DE UBICACIÓN



REFERENCIAS

- EXPLANADA EXISTENTE
- CAMINO EXISTENTE
- CONSTRUCCION EXISTENTE
- LINEA DE VUELO
- POLIGONAL PUTNOS DE CONTROL
- PUNTO DE CONTROL

PLANILLA DE RESIDUALES

PUNTO	RESIDUAL (en cm)	PUNTO	RESIDUAL (en cm)
3	-1.10	23	17.3
5	-33.8	25	-30.0
7	16.4	26	-39.7
9	62.9	28	-51.0
10	7.60	29	-44.8
12	13.2	30	-21.8
13	-16.2	31	92.6
14	48.9	33	38.3
16	33.7	36	73.7
18	15.1	38	-58.8
19	23.3	39	-65.7
20	-10.8	41	-81.0
21	54.2	42	-145.6
22	127.5	44	-18.3

REFERENCIA RESIDUALES

- RESIDUAL MENORES A -50 cm
- RESIDUAL ENTRE -50 y -25 cm
- RESIDUAL ENTRE -25 y 0 cm
- RESIDUAL ENTRE 0 y 25 cm
- RESIDUAL ENTRE 25 y 50 cm
- RESIDUAL MAYOR A 50 cm

NOTAS:

- Los valores de los residuales corresponden solo a altimetría.-
- Las infraestructuras se grafican unicamente a efectos visuales.-

ESCALA 1:750



CONTROL POSICIONAL ABSOLUTO
DEL RELEVAMIENTO ALTIMETRIA

Departamento	CANELONES	AREA RELEVADA APROXIMADA:
Localidad Catastral	BARROS BLANCOS	Hás. m²
		AREA 1 4000

PROPIETARIO:
DONIRAL S.A.

Escala 1:750

Fecha Setiembre de 2014

VERONICA PAMPINELLA

MELISSA PEREZ

10.6.3.2 Justificación

Como puede apreciarse en las láminas precedentes, la mayor cantidad de puntos donde se han detectado los mayores errores, se encuentran *por fuera* de la poligonal definida por los puntos de control.

Es por ello, que se considera interesante realizar un análisis subdividiendo la muestra de residuales en las siguientes categorías:

- Planimetría:
 - Puntos de testeo internos a la poligonal.
 - Puntos de testeo externos a la poligonal.
- Altimetría:
 - Puntos de testeo internos a la poligonal.
 - Puntos de testeo externos a la poligonal.

10.6.3.3 Planimetría

Los puntos de testeo planimétricos se distribuyen espacialmente de la siguiente manera, ver tabla 30.

Ubicación	Puntos	Porcentaje
Fuera	14	46%
Dentro	16	54%

Tabla 29: División según la poligonal de puntos de testeo planimétricos.-

1. Fuera: Distribución de las magnitudes de d_{xy} .

Magnitud de d_{xy}	Nº de Puntos	Porcentaje
$ d_{xy} < 10.0 \text{ cm}$	5	35%
$10.0 \text{ cm} < d_{xy} < 20.0 \text{ cm}$	7	50%
$ d_{xy} > 20.0 \text{ cm}$	2	15%
TOTAL	14	100%

Tabla 30: Magnitud de los residuales planimétricos- fuera.-

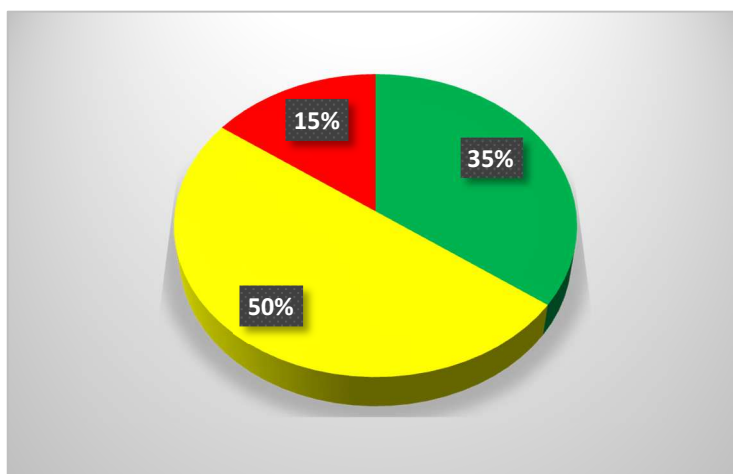


Ilustración 44: Distribución de las magnitudes de los residuales planimétricos- fuera.-

2. Dentro: Distribución de las magnitudes de d_{XY}

Magnitud de d_{XY}	Nº de Puntos	Porcentaje
$ d_{XY} < 10.0 \text{ cm}$	10	63%
$10.0 \text{ cm} < d_{XY} < 20.0 \text{ cm}$	6	37%
$ d_{XY} > 20.0$	0	0%
TOTAL	16	100%

Tabla 31: Magnitud de los residuales planimétricos- dentro.-

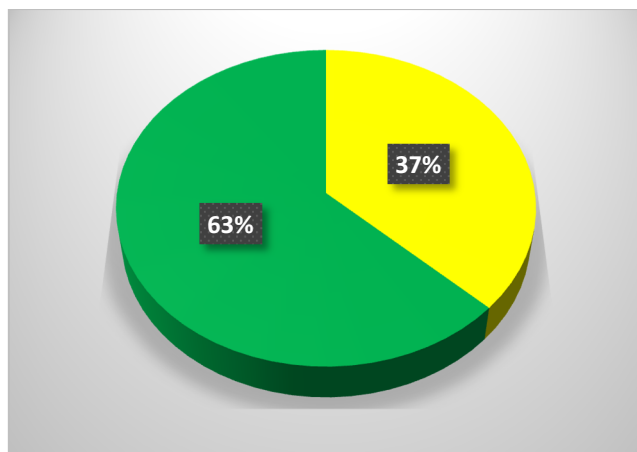


Ilustración 45: Distribución de las magnitudes de los residuales planimétricos- dentro.-

3. Apreciaciones al respecto:

- En cuanto a los residuales de mayor magnitud:
El 15% de los puntos de testeo ubicados por fuera de la poligonal, delimitada por los puntos de control, presenta residuales cuya componente d_{XY} es mayor a 20.0 cm . Mientras que ninguno de dichos puntos es interior a la poligonal.
- En cuanto a los residuales de menor magnitud:
El 35% de los puntos que están por fuera de la poligonal presentan residuales planimétricos menores a 10.0 cm . Mientras que de la totalidad de los puntos ubicados dentro, el 63 % presentan residuales menores a dicha magnitud.

Igualmente, es importante notar que términos estadísticos estrictos, ambas muestras (fuera y dentro) no son comparables dado que el número de elementos que las componen son diferentes (la muestra fuera está compuesta por 14 puntos y la muestra dentro por 16).

De todas formas, las apreciaciones realizadas no son erróneas, pues el número de elementos de las muestras mencionadas es *casi el mismo*.

En el gráfico siguiente, se aprecian claramente las observaciones antes realizadas, subdividiendo la muestra según la tabla 33.

	Fuera		Dentro	
	Nº de puntos	%	Nº de puntos	%
$ d_{XY} < 10.0 \text{ cm}$	5	17	10	34
$10.0 \text{ cm} < d_{XY} < 20.0 \text{ cm}$	7	23	6	20
$ d_{XY} > 20.0$	2	6	0	0
TOTAL	14	46	16	54

Tabla 32: Análisis del total de los residuales planimétricos.-

La ilustración 46 se presenta con los valores de la tabla precedente.

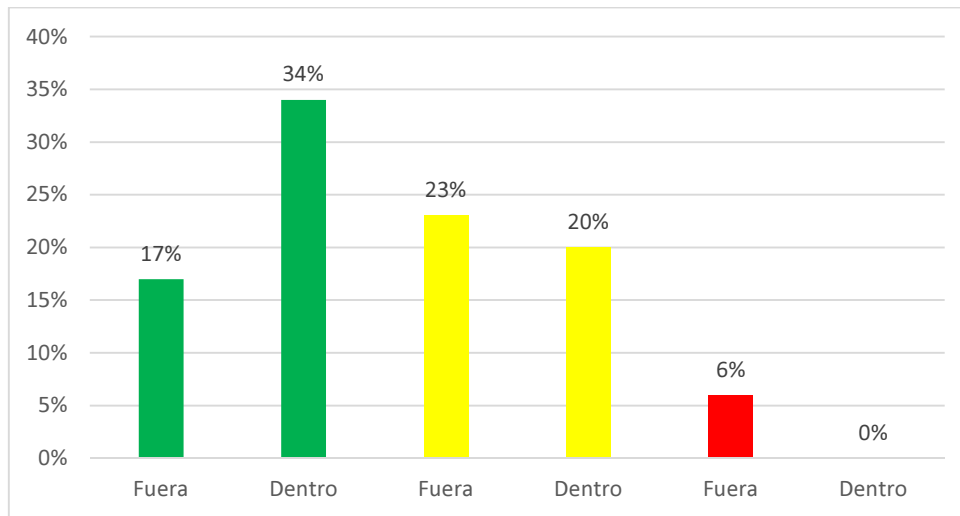


Ilustración 46: Distribución de la totalidad de los puntos en planimetría.-

10.6.3.4 Altimetría

Los puntos de testeo altimétricos se distribuyen espacialmente de la siguiente manera, ver tabla 30.

Ubicación	Puntos	Porcentaje
Fuera	13	46%
Dentro	15	54%

Tabla 33: División según la poligonal de puntos de testeo altimétrica.-

1. Fuera: Distribución de las magnitudes de dZ .

Magnitud de dZ	Nº de Puntos	Porcentaje
$ dZ < 25 \text{ cm}$	4	31%
$25 \text{ cm} < dZ < 50 \text{ cm}$	2	15%
$ dZ > 50 \text{ cm}$	7	54%
TOTAL	13	100%

Tabla 34: Magnitud de los residuales altimétricos- fuera.-

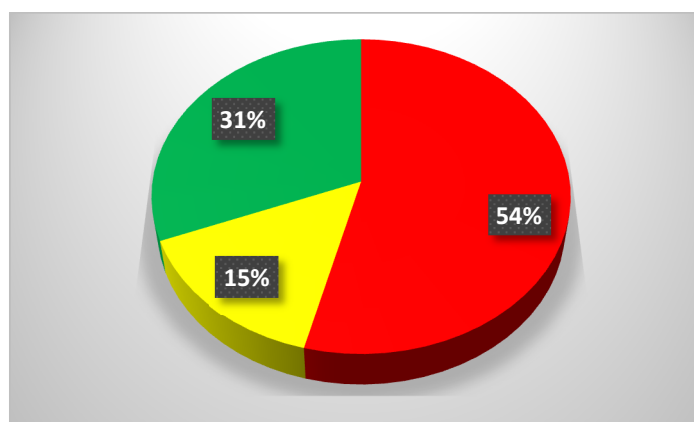


Ilustración 47: Distribución de las magnitudes de los residuales altimétricos- fuera.-

2. Dentro: Distribución de las magnitudes de dZ

Magnitud de dZ	Nº de Puntos	Porcentaje
$ dZ < 25\text{ cm}$	7	47%
$25\text{ cm} < dZ < 50\text{ cm}$	5	33%
$ dZ > 50\text{ cm}$	3	20%
TOTAL	15	100%

Tabla 35: Magnitud de los residuales altimétricos- dentro.-

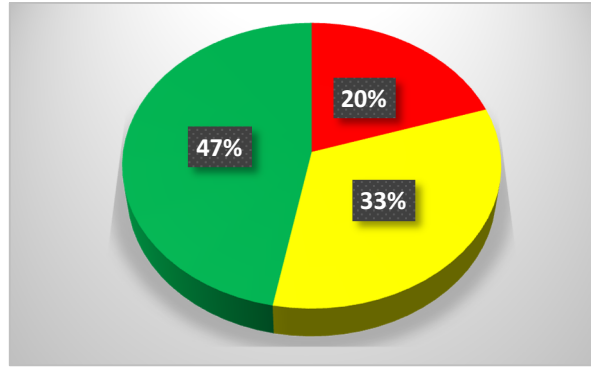


Ilustración 48: Distribución de las magnitudes de los residuales altimétricos- dentro.-

3. Apreciaciones al respecto:

- En cuanto a los residuales de mayor magnitud:
El 54% de los puntos de testeo ubicados por fuera de la poligonal, delimitada por los puntos de control, presenta residuales cuya componente $|dZ|$ es mayor a 50 cm . Mientras que solo el 20% de los puntos interior a la poligonal presentan magnitudes de $|dZ| > 50\text{ cm}$.
- En cuanto a los residuales de menor magnitud:
El 31% de los puntos que están por fuera de la poligonal presentan residuales altimétricos (en términos absolutos) menores a 25 cm . Mientras que de la totalidad de los puntos ubicados dentro, el 47 % presentan residuales menores a dicha magnitud.

Al igual que se expuso en el análisis planimétrico, los porcentajes antes referidos en 3. Apreciaciones al respecto, no son estrictamente comparables.

En el gráfico siguiente, se aprecian claramente las observaciones realizadas en base a la totalidad de los puntos. Ver tabla 37.

	Fuera		Dentro	
	Nº de puntos	%	Nº de puntos	%
$ d_z < 25.0\text{ cm}$	4	14	7	25
$25.0\text{ cm} < d_z < 50.0\text{ cm}$	2	7	5	18
$ d_z > 50.0$	7	25	3	11
TOTAL	13	46	15	54

Tabla 36: Análisis del total de los residuales altimétrico.-

La ilustración 46 se presenta con los valores de la tabla precedente

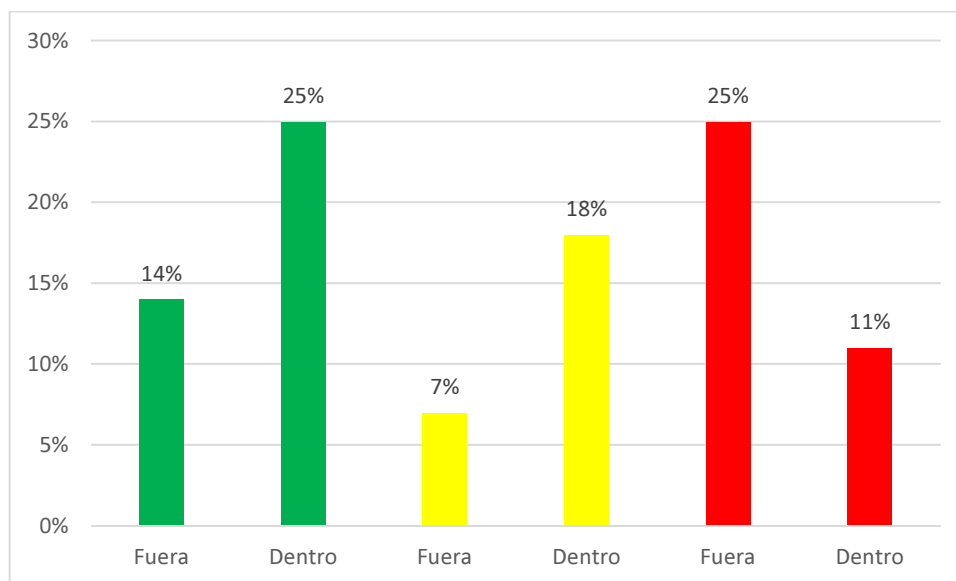


Ilustración 49: Distribución de la totalidad de los puntos en altimetría.-

10.6.4 Análisis del procedimiento de restitución

Finalmente, se considera oportuno analizar las tareas que intervienen en la generación del producto testado para identificar los elementos que pueden ser modificados con el fin de obtener mejores resultados. Dichas tareas son:

1. Captura de datos:

- Coordenadas (X, Y, Z) relevadas topográficamente:

Se entiende que la obtención de las mismas no puede ser mejorada dada la rigurosidad del plan de relevamiento ejecutado.

- Imágenes:

En lo que refiere a las imágenes, se entiende que si el vuelo se hubiese ejecutado según lo planeado, los resultados habrían sido otros. ⁽⁴⁹⁾

En el mismo sentido, se considera importante aclarar que la calidad radiométrica de las imágenes seleccionadas ha sido satisfactoria.

- Señalización:

En el proceso de restitución se notaron algunas dificultades vinculadas a la identificación de las marcas preseñalizadas:

- En algunos lugares el tamaño de las mismas dificultó el trabajo.
- El contraste fue bajo para el caso de las marcas ubicadas en la explanada.

⁽⁴⁹⁾ Ver 7.4.4. Observaciones

2. Restitución fotogramétrica:

- Orientación interior:

El factor determinante en esta tarea es la calibración de la cámara.⁽⁵⁰⁾ Se considera que si la misma se hubiese efectuado en días previos al vuelo, los resultados obtenidos mejorarían.

Asimismo, no fue sencillo obtener el certificado que efectivamente correspondía al vuelo efectuado.

- Orientación exterior:

- Puntos de control: Se podría aumentar la cantidad de dichos puntos, pero de hacerlo aumentarían los costos del producto.
- Puntos de enlace: En lo que refiere a estos puntos, fue posible observar que a partir de un cierto umbral, incorporar nuevos puntos no aumenta significativamente la calidad de los resultados.⁽⁵¹⁾

3. Control de calidad:

En cuanto al control de calidad, se utilizó un procedimiento objetivo basado en fundamentos estadísticos, por lo que no corresponde a esta investigación evaluarlo. Ver 6.6.1.3. *Estándar a aplicar.*

⁽⁵⁰⁾ Ver 13. *Glosario*

⁽⁵¹⁾ Ver 8.4.1.4. *Ejecución de la restitución.*

11 ETAPA 6: CONCLUSIONES Y REFLEXIONES

Respecto al objetivo

En primera instancia, es oportuno destacar que fue posible generar un producto fotogramétrico en base a un vuelo con vehículo aéreo no tripulado (UAV). De igual forma, fue posible efectuar el control posicional deseado a dicho producto.

Dado que en la etapa precedente se realizó el análisis de la calidad del producto; en esta, se realiza especial énfasis en las apreciaciones generales de toda la investigación.

Sobre el análisis efectuado en la etapa precedente

En cuanto al control posicional en sí mismo, tanto en planimetría como en altimetría, se concluye que los residuales de mayor orden ⁽⁵²⁾ se encuentran en su mayoría en los bordes del modelo, en particular, *por fuera* de los puntos de control.

Asimismo, el número de residuales de baja magnitud ⁽⁵³⁾ es notoriamente superior, en términos porcentuales, en la zona interior a la poligonal definida por los puntos de control.

Por otra parte, es importante dejar en claro que los residuales no mostraron una dependencia con respecto al tipo de superficie del terreno. Es decir, la distribución de residuales es indiferente de si los puntos se ubican sobre el hormigón, la tosca o la pradera natural.

Sobre los usos compatibles

Las precisiones obtenidas reflejan que este tipo de relevamiento fotogramétrico es totalmente compatible con:

- Catastro.
- Relevamiento de asentamientos irregulares.
- Mapeo rural.
- Actividades agronómicas.
- Para calcular el volumen de acopios.
- Para supervisar canteras.
- Entre otros.

Recomendación para obtener mejores resultados

Realizado el estudio presentado en 10.6. *Análisis*, es posible concluir que se habrían obtenido mejores resultados si:

- El vuelo se hubiese ajustado al plan de vuelo diseñado.
Dicho plan debe ser elaborado de manera tal que asegure que los puntos de control se encuentren en los bordes del modelo, y que los puntos de testeo tengan una distribución uniforme en el área estereoscópica. Lo que hubiese sido posible en nuestro caso, de haberse mantenido el plan de vuelo original.
- Se hubiese contado con un certificado de calibración de la cámara que refleje la geometría interna de la misma al momento de la toma de imágenes.

⁽⁵²⁾ $d_{XY} = \sqrt{dX^2 + dY^2} > 30.0 \text{ cm} ; dZ > 50.0 \text{ cm}$

⁽⁵³⁾ $d_{XY} < 10.0 \text{ cm} ; dZ < 25.0 \text{ cm}$

Lecciones aprendidas

Es posible identificar algunos aspectos de la investigación que podrían haberse realizado de forma diferente. Los mismos se detallan a continuación:

- Las marcas preseñalizadas debieron ser más grandes para facilitar la identificación de los puntos. Asimismo, en la zona de hormigón habría sido conveniente utilizar aerosol de otro color para incrementar el contraste ⁽⁵⁴⁾.
- Podría haberse buscado una alternativa en lo que refiere a la definición de los ejes de coordenadas del sistema imagen a efectos de evitar la rotación de las fotografías. Esto es así dado que, al rotar las imágenes se modifican los niveles digitales de los píxeles.
- En términos de eficiencia, habría sido conveniente utilizar algún software específico para generar de forma automática el fotoíndice.
- Podría haberse utilizado un software específico para la restitución de imágenes tomadas con la tecnología drone - cámara no métrica.

Posibles líneas futuras de investigación

- Replicar la restitución realizada con otro restituidor fotogramétrico digital.
- Analizar la dependencia de la precisión alcanzada respecto a la cantidad de puntos de control y su distribución.
- Evaluar la dependencia de la precisión alcanzada respecto a la cantidad de puntos de enlace, testeando diferentes estrategias de correlación.
- Replicar el procedimiento realizado para el vuelo a 100 m en el vuelo a 40 m.
- Efectuar el control posicional del mismo producto en base a otras metodologías estadísticas.

Finalmente, nos gustaría resaltar que los resultados obtenidos superan notoriamente las expectativas del equipo. Por ello, nos sentimos en condiciones de afirmar que la tecnología UAV constituye una poderosa herramienta para el desarrollo de las actividades inherentes al Ingeniero Agrimensor.

⁽⁵⁴⁾ Recuérdese que el aerosol utilizado es de color blanco.

12 BIBLIOGRAFÍA

Ariza López, F.J. & James Atkinson, A.D. (2006) *Metodologías de Control Posicional: Visión General y Análisis Crítico*. Grupo de investigación en Ingeniería Cartográfica, Universidad de Jaén.

CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*. Documento de Cátedra, Centro de Fotogrametría, Cartografía y Catastro. Facultad de Ingeniería – Universidad Nacional de San Juan.

IGN. (s/f) *Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección*. Instituto Geográfico Nacional, Centro de Información Geográfica. España.

Leica Geosystems Geospatial Imaging, LLC. (2006) *Leica Photogrammetry Suite Project Manager*.

Lerma García, J.L. (1999) *Aerotriangulación: Cálculo y Compensación de un Bloque Fotogramétrico*. Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría. Universidad Politécnica de Valencia.

Lopez, M. & Thoss, M. (s/f) *Aerial Mapping: Photogrammetry with the help of microdrones md4-1000*. Company Microdrones GmbH

Minnesota Planning, Land Management Information Center. (1999) *Positional Accuracy Handbook. Using the National Standard for Spatial Data Accuracy to measure and report geographic data quality*.

Muñoz, P. (2004) *Apoyo aéreo cinemático y aerotriangulación digital frente a los sistemas de navegación inercial: análisis de precisiones*. Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos.

Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría II*. Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida.

Pérez Álvarez, J. A. (2001). *Apuntes de Fotogrametría III*. Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida.

Rodríguez Avi, J. (2009 – 2010) *Título de experto universitario en evaluación de la calidad de la información geográfica*. España.

Sarría, F.A. (s/f). *Sistema de Información Geográfica*. SIGMUR: SIG y Teledetección en la Universidad de Murcia.

Silva Gayoso, R. (2008) *Plan Cartográfico de Aragón. "Vuelo Fotogramétrico, Ortoimagen y Cartografía Topográfica escala 1/5000"*. Zaragoza

Sony, (s/f) *Cámara Digital de Lentes Intercambiables*, Manual ID: 4-297-558-42(1)

Topcon, (s/f) *Operation Manual Camera Calibration Software, Image Master Calib*

13 GLOSARIO

- Punto de control: Puntos utilizados para vincular el sistema de coordenadas imagen con el sistema de coordenadas terreno.
- Punto de enlace: Punto utilizado en el proceso de aerotriangulación para ajustar el modelo y lograr una buena estereoscopia.
- Punto de testeo: Puntos que se utilizan en la aplicación del control de calidad posicional.
- Radiación: Es un método de relevamiento topográfico que permite obtener coordenadas planimétricas desde un punto fijo de coordenadas conocidas. Desde el punto de estación se calculan las acimut y las distancias de los puntos a relevar, para posteriormente calcular las coordenadas de los mismos, aplicando las siguientes formulas:

$$X_i = X_E + D_I * \sin Az_i$$

$$Y_i = Y_E + D_I * \cos Az_i$$

Donde:

(X_E, Y_E) = Coordenadas conocidas del punto de estación.

(X_i, Y_i) = Coordenadas del punto medido.

D_i = Distancia medida entre el punto de estacion y el punto a ser medido.

Az_i = Acimut del punto de estacion a punto de interes.

- Nivelación geométrica: Es un método topográfico de obtención de desniveles entre dos puntos cualquiera. Estas diferencias de nivel se utilizan para obtener altitudes, cotas relativas, cotas absolutas, etc.
- Drone: Micro – vehículo aéreo autónomo no tripulado.
- UAV: Acrónimo inglés de vehículo aéreo no tripulado: *Unmanned Aerial Vehicle*.
- VANT: Acrónimo de Vehículo Aéreo No Tripulado.
- Línea de vuelo: Indica la trayectoria a realizar o realizada por un vehículo aéreo.
- Restitución fotogramétrica: Es el proceso que da lugar a la extracción de coordenadas tridimensionales, del conjunto de puntos relevados a través de un vuelo fotogramétrico.
- Recubrimiento: Es la zona de intersección entre dos imágenes. Existen dos tipos:
 - Transversal: Cuando el recubrimiento se da en el sentido de vuelo del drone.
 - Longitudinal: Cuando el recubrimiento se da entre dos imágenes de líneas de vuelo consecutivas.
- Modelo estereoscópico: Es el resultado de la restitución, lograda gracias al recubrimiento entre las imágenes tomadas en el vuelo fotogramétrico.
- Cámara digital no métrica: Son cámaras fabricadas para uso aficionado y no para el empleo de la fotogrametría. En comparación a las cámaras métricas tradicionales, los objetivos son más pequeños lográndose una baja calidad óptica y geométrica, además se les incorporan sistemas autofocus u objetivos zoom, que pueden provocar una inestabilidad interna. El tamaño del sensor también constituye un inconveniente, dado que su pequeño tamaño no puede garantizar precisión métrica. Aunque se realice previamente una calibración, los parámetros internos pueden no ser muy estables y provocar errores en el proceso de orientación interior.
- Calidad posicional: Es una de las componentes de la calidad del dato geográfico. Esta es determinada por la exactitud posicional.

- NSSDA: Parámetro estadístico asociado a la calidad posicional de un conjunto de datos geográficos.
- RMS: Acrónimo inglés de error medio cuadrático: *Root mean square*. Es un estadístico que cuantifica el promedio de los errores al cuadrado.

14 ÍNDICE DE IMÁGENES

Ilustración 1: Zona tentativa: Canteras del Parque Rodó.-.....	11
Ilustración 2: Zona tentativa: Estacionamiento del Estadio Centenario.-	12
Ilustración 3: Zona tentativa: Depósito Ruta Nacional Nº101.-	13
Ilustración 4: Plan de vuelo diseñado para el vuelo a 40m.-	15
Ilustración 5: Plan de vuelo diseñado para el vuelo a 100m.-	16
Ilustración 6: Izquierda: Distribución recomendada de puntos de testeo; Derecha: Esparcimiento recomendada de los puntos de testeo.-.....	21
Ilustración 7: Distribución recomendada de puntos de control.-.....	23
Ilustración 8: Distribución de los puntos de control para el vuelo a 40m.-.....	24
Ilustración 9: Distribución de los puntos de control para el vuelo a 100m.-.....	24
Ilustración 10: Tipos de marcas para la preseñalización.-.....	25
Ilustración 11: Modelo de marca a utilizar.-.....	27
Ilustración 12: Marca preseñalizada acotada.-.....	27
Ilustración 13: Distribución de los puntos de control y testeo.-	29
Ilustración 14: Distribución de los circuitos diseñados para la nivelación.-	32
Ilustración 15: Marca de un punto de testeo sobre el hormigón.-	34
Ilustración 16: Marca de un punto de control sobre el hormigón.-	34
Ilustración 17: Marca de un punto de testeo sobre el pasto.-	34
Ilustración 18: Recorrido efectuado por el drone en el vuelo a 40m.-.....	36
Ilustración 19: Recorrido efectuado por el drone en el vuelo a 100m.-.....	36
Ilustración 20: Ubicación de la red de puntos.-.....	37
Ilustración 21: Fotoíndice del vuelo 100m.-	43
Ilustración 22: Distribución de los puntos de control planificados y alternativos.-	45
Ilustración 23: Resultado de la rotación de las imágenes.-	46
Ilustración 24: Relación entre sistema de coordenadas del certificado de calibración y el sistema utilizado en el proyecto.-.....	47
Ilustración 25: Distribución de los puntos de control.-	47
Ilustración 26: Distribución de los puntos de Von Grüber.-	48
Ilustración 27: Distribución de los puntos de enlace definida en el proyecto.-	48
Ilustración 28: Visualización de la totalidad de los puntos de enlace.-	48
Ilustración 29: Distribución de los puntos de control.-	50
Ilustración 30: Distribución de los puntos de testeo.-.....	54
Ilustración 31: Ubicación de los puntos de control.-	63
Ilustración 32: Magnitud de dX de los puntos de testeo.....	65
Ilustración 33: Quintiles asociados a la muestra dX.....	66
Ilustración 34: Magnitud de dY de los puntos de testeo.....	67
Ilustración 35: Quintiles asociados a la muestra dY	67
Ilustración 36: Clasificación de los residuales planimétricos.-	69
Ilustración 37: Magnitud de dXY de los puntos de testeo.-.....	69
Ilustración 38: Quintiles asociados a la muestra dXY.-	70
Ilustración 39: Clasificación de los residuales altimétricos.-	71
Ilustración 40: Magnitud de dZ de los puntos de testeo.....	71
Ilustración 41: Quintiles asociados a la muestra dZ.-	72
Ilustración 42: Determinación de los ángulos que definen la proyección del vector residual en los distintos planos.	73
Ilustración 43: Proyección de los residuales.-	74
Ilustración 44: Distribución de las magnitudes de los residuales planimétricos- fuera.-	78
Ilustración 45: Distribución de las magnitudes de los residuales planimétricos- dentro.-.....	79
Ilustración 46: Distribución de la totalidad de los puntos en planimetría.-	80
Ilustración 47: Distribución de las magnitudes de los residuales altimétricos- fuera.-	80

Ilustración 48: Distribución de las magnitudes de los residuales altimétricos- dentro.-	81
Ilustración 49: Distribución de la totalidad de los puntos en altimetría.-	82
Ilustración 50: Cuadricóptero.-	95
Ilustración 51: Pantalla generada por el software mdCockpit 3.-	96
Ilustración 52: Aplicación en sistemas de información geográfica de imágenes UAV.-	97
Ilustración 53: Aplicaciones en monitoreo y seguridad de imágenes UAV.-	97
Ilustración 54: Microdrone md4-1000.-	98
Ilustración 55: Tarjeta de memoria portable desarrollada por la empresa Sony.-	99
Ilustración 56: Cámara Sony NEX-7.-	100
Ilustración 57: Vista frontal de la cámara Sony NEX-7.-	100
Ilustración 58: Vista frontal de la cámara Sony NEX-7 sin el objetivo.-	101
Ilustración 59: Vista posterior de la cámara Sony NEX-7.-	101
Ilustración 60: Plan de vuelo de un vehículo aéreo.-	103
Ilustración 61: Relación imagen - terreno en el caso ideal.-	104
Ilustración 62: Variación de la altura relativa de vuelo según el relieve.-	104
Ilustración 63: Toma de un modelo fotogramétrico en condiciones ideales.-	105
Ilustración 64: Inclinación del eje de la toma.-	106
Ilustración 65: Variación de la altura relativa de vuelo.-	106
Ilustración 66: Variación del relieve.-	107
Ilustración 67: Recubrimiento lateral.-	108
Ilustración 68: Relación entre el eje óptico de la cámara y la vertical del lugar.-	110
Ilustración 69: Los tres movimientos que afectan al avión.-	110
Ilustración 70: Posición de la cámara en la dirección de vuelo.-	111
Ilustración 71: Efecto de deriva sobre las imágenes según la dirección de vuelo.-	111
Ilustración 72: Efecto de línea de vuelo sinuoso.-	111
Ilustración 73: Reconstrucción de los haces perspectivos.-	114
Ilustración 74: Ubicación del punto principal en la fotografía.-	115
Ilustración 75: Representación de las distorsiones radiales.-	115
Ilustración 76: Condición de colinealidad.-	116
Ilustración 77: Posicionamiento básico del GPS.-	117
Ilustración 78: Distribución de la constelación de satélites GPS.-	118
Ilustración 79: Cálculo de la distancia receptor-satélite por desfasaje de ondas.-	119
Ilustración 80: Distribución de los puntos de control terrestre.-	119
Ilustración 81: Efecto de la Ionósfera y la Tropósfera sobre la señal del satélite.-	119
Ilustración 82: Estructura de la señal GPS.-	120
Ilustración 83: Receptor Trimble R4.-	120
Ilustración 84: Factor DOP para las componentes planimétricas (HDOP) y altimétrica (VDOP).-	121
Ilustración 85: GPS diferencial.-	121
Ilustración 86: Método diferencial aplicado a dos antenas.-	122
Ilustración 87: Circuitos realizados para relevar la cota de los puntos de control y testeo.-	129
Ilustración 88: Pantalla inicial de la aplicación LPS.-	139
Ilustración 89: Ventana de selección de tipo de cámara.-	140
Ilustración 90: Ventana de selección del sistema de referencia.-	141
Ilustración 91: Pantalla de configuración de las propiedades de bloque de imágenes.-	141
Ilustración 92: Pantallas de configuración de la cámara.-	142
Ilustración 93: Ventana de configuración de Capas Piramidales.-	143
Ilustración 94: Proceso de piramidación finalizado.-	143
Ilustración 95: Ventana de configuración del sensor.-	143
Ilustración 96: Determinación de las marcas fiduciales.-	144
Ilustración 97: Opciones de sistemas de coordenadas imagen.-	144
Ilustración 98: Ventana de configuración de orientación exterior.-	145
Ilustración 99: Proceso de orientación interior finalizado.-	145
Ilustración 100: Opciones de visualización de la herramienta Point Mensurament Tool.-	145

Ilustración 101: Visualización del cursor.-	146
Ilustración 102: Ventana interactiva de medición de puntos – Visualización clásica.-	146
Ilustración 103: Ventana de importación de coordenadas.-	146
Ilustración 104: Identificación de campos incluidos en archivo ASCII.-	147
Ilustración 105: Visualización de las coordenadas de los puntos de control.-	147
Ilustración 106: Medición de un punto.-	148
Ilustración 107: Identificación del punto medido.-	148
Ilustración 108: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña general.-	149
Ilustración 109: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña estrategia.-	150
Ilustración 110: Distribución por defecto de las ventanas de búsqueda de puntos de enlace.-	150
Ilustración 111: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña distribución.- ...	151
Ilustración 112: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña general.-	152
Ilustración 113: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña puntos.-	152
Ilustración 114: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña interior.-	153
Ilustración 115: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña exterior.-	153
Ilustración 116: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña de opciones avanzadas.-	154
Ilustración 117: Ventana de resultados de la triangulación.-	154
Ilustración 118: Gafas para ver imágenes en anáglifo.-	155
Ilustración 119: Interface de Stereo Analyst.-	156

15 ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Planilla de cálculo asociada a un estudio de precisión planimétrico.-	20
Tabla 2: Planilla de cálculo asociada a la componente z de un estudio de precisión.-	20
Tabla 3: Diferencias entre el plan de vuelo inicial y el plan de vuelo efectivo	37
Tabla 4: Cálculo de la coordenada Z de los puntos en base al relevamiento topográfico.-	41
Tabla 5: Módulo de los vectores de cierre calculados.-	41
Tabla 6: Error medio cuadrático del relevamiento planialtimétrico.-	43
Tabla 7: Recubrimiento transversal entre imágenes.-	44
Tabla 8: Sustitución de los puntos de control.-	45
Tabla 9: Ubicación de los puntos de control.-	47
Tabla 10: Resultado del RMS de los puntos de control – Triangulación con 6 puntos de control.-	49
Tabla 11: Resultado del RMS de los puntos de control - Triangulación con 5 puntos de control.-	50
Tabla 12: Ubicación de los puntos de testeo.-	51
Tabla 13: Resultado del RMS de los puntos de control - Triangulación con 5 puntos de control y más puntos de enlace.-	52
Tabla 14: Coordenadas de los centros perspectivas y ángulos de giro de las imágenes.-	52
Tabla 15: Dimensión de la base entre los puntos de toma efectivos.-	52
Tabla 16: Distribución de los puntos de testeo en la zona de estudio.-	55
Tabla 17: Aplicación del estándar.-	59
Tabla 18: Estadístico NSSDA d el relevamiento fotogramétrico.-	63
Tabla 19: Desviación estándar del relevamiento fotogramétrico en términos relativos.-	64
Tabla 20: Residuales asociados al relevamiento fotogramétrico	64
Tabla 21: Quintiles asociados a la muestra dX-	66
Tabla 22: Quintiles asociados a la muestra dY.-	68
Tabla 23: Clasificación de los residuales planimétricos.-	69
Tabla 24: Quintiles asociados a la muestra dXY.-	70
Tabla 25: Clasificación de los residuales altimétricos.-	71
Tabla 26: Quintiles asociados a la muestra dZ.-	72
Tabla 27: Análisis de las magnitudes de los residuales.-	73
Tabla 28: Análisis de los residuales por quintiles.-	73
Tabla 30: División según la poligonal de los puntos de testeo planimétricos.-	78
Tabla 31: Magnitud de los residuales planimétricos- fuera.-	78
Tabla 32: Magnitud de los residuales planimétricos- dentro.-	79
Tabla 33: Análisis del total de los residuales planimétricos.-	79
Tabla 34: División según la poligonal de los puntos de testeo altimetría.-	80
Tabla 35: Magnitud de los residuales altimétricos- fuera.-	80
Tabla 36: Magnitud de los residuales altimétricos- dentro.-	81
Tabla 37: Análisis del total de los residuales altimétrico.-	81
Tabla 38: Planilla de coordenadas replanteadas-	124
Tabla 39: Cálculo de las coordenadas planimétricas definitivas relevadas topográficamente.-	128
Tabla 40: Datos relevados en campo - Circuito 1.-	129
Tabla 41: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 1 y 2.-	130
Tabla 42: Datos relevados en campo - Circuito 2.-	130
Tabla 43: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 1 y 3.-	130
Tabla 44: Datos relevados en campo - Circuito 3.-	130
Tabla 45: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 3 y 4.-	130
Tabla 46: Datos relevados en campo - Circuito 4.-	131
Tabla 47: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 3 y 5.-	131
Tabla 48: Datos relevados en campo - Circuito 5.-	131
Tabla 49: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 2 y 6.-	131
Tabla 50: Datos relevados en campo - Circuito 6.-	131

Tabla 51: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 2 y 7.-	132
Tabla 52: Datos relevados en campo - Circuito 7.-	132
Tabla 53: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 6 y 8.-	132
Tabla 54: Datos relevados en campo - Circuito 8.-	132
Tabla 55: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 8 y 9.-	132
Tabla 56: Datos relevados en campo - Circuito 9.-	132
Tabla 57: Cálculo de cotas - Circuito 1.-	133
Tabla 58: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 1 y 2.-	133
Tabla 59: Cálculo de cotas - Circuito 2.-	133
Tabla 60: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 1 y 3.-	133
Tabla 61: Cálculo de cotas - Circuito 3.-	134
Tabla 62: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 3 y 4.-	134
Tabla 63: Cálculo de cotas - Circuito 4.-	134
Tabla 64: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 3 y 5.-	134
Tabla 65: Cálculo de cotas - Circuito 5.-	135
Tabla 66: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 2 y 6.-	135
Tabla 67: Cálculo de cotas - Circuito 6.-	135
Tabla 68: Cálculo de cotas - Enlace entre circuitos 2 y 7.-	135
Tabla 69: Cálculo de cotas - Circuito 7.-	136
Tabla 70: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 6 y 8.-	136
Tabla 71: Cálculo de cotas - Circuito 8.-	136
Tabla 72: Cálculo de cotas - Enlace entre circuitos 8 y 9.-	136
Tabla 73: Cálculo de cotas - Circuito 9.-	136
Tabla 74: Coordenadas definitivas del relevamiento topográfico.-	138
Tabla 75: Coordenadas definitivas del relevamiento fotogramétrico.-	157
Tabla 76: Determinación del número de rachas en la muestra dX -	158
Tabla 77: Determinación del número de rachas en la muestra dY -	159
Tabla 78: Determinación del número de rachas en la muestra dZ -	160
Tabla 79: Construcción de la función empírica de dX -	160
Tabla 80: Construcción de la función empírica de dY -	161
Tabla 81: Construcción de la función empírica de dZ -	161
Tabla 82: Coordenadas relevadas.-	162
Tabla 83: Residuales planimétricos relativos.-	166
Tabla 84: Residuales altimétricos relativos.-	170
Tabla 85: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano XY.-	172
Tabla 86: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano XZ.-	173
Tabla 87: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano YZ.-	173

16 **ANEXOS**

16.1 ANEXO: MICRODRONE MD4 - 1000 ⁽⁵⁵⁾

16.1.1 Introducción

Los drones son micro-vehículos aéreos autónomos no tripulados (*AUMAV Autonomous Unmanned Micro Aerial Vehicle*).

En particular, el Microdrone md4-1000 fue creado por la compañía GmbH fundada en octubre de 2005. El objetivo principal de ésta, es el desarrollo de la mecánica de microvehículos aéreos de despegue y aterrizaje vertical: VTOL MAVs. ⁽⁵⁶⁾

16.1.2 Generalidades

16.1.2.1 Sistema de vuelo

El md4-1000 es un vehículo de despegue y aterrizaje vertical cuyo funcionamiento se basa en el principio del cuadricóptero.

Los cuadricópteros se diferencian de las aeronaves de ala fija, ya que estos se elevan por el movimiento de cuatro hélices estrechas giratorias. Ver ilustración 50.



Ilustración 50: Cuadricóptero.- ⁽⁵⁷⁾

Las ventajas de este sistema de vuelo son múltiples y tienen mayor influencia en la etapa constructiva y de diseño del vehículo. Por ejemplo, el peso de los rotores individuales es menor que el de un único rotor equivalente, así como el diámetro, que también es menor. Esto da lugar a mayores niveles de energía cinética durante el vuelo.

16.1.2.2 Control del Microdrone

Los vuelos pueden ser controlados tanto desde una ubicación remota, como de forma autónoma en base a planes de vuelo preprogramados:

1. Control remoto

De forma general, pueden definirse los Sistemas de Control como dispositivos que manejan, comandan y regulan el funcionamiento de otros dispositivos. Para el Microdrone md4-1000, el control se realiza a través de un dispositivo inalámbrico de forma instantánea.

(⁵⁵) La principal fuente consultada para la confeccionar este anexo es la página web: <http://www.microdrones.com>

⁽⁵⁶⁾ Por su sigla en inglés *Vertical Take Off and Landing Micro Aerial Vehicle*.

⁽⁵⁷⁾ Fuente: <http://electronica36.blogspot.com>

La ventaja principal de este sistema es la capacidad de tomar decisiones *insitu* por parte del usuario.

2. Vuelo autónomo

El md4-1000 tiene la posibilidad de ser controlado de forma autónoma con ayuda del Sistema de Navegación GPS Waypoints.

Los Waypoints son conjuntos de coordenadas en el espacio físico (x, y, z) que generan un camino (*way*) apoyadas en el sistema de posicionamiento global (GPS). Dicho camino debe definirse previamente.

Para definir el vuelo autónomo, es necesario configurar en el software lo siguientes parámetros:

- Importar una imagen georeferenciada (desde Google Earth por ejemplo).
- Indicar algunas propiedades de vuelo (el tipo de drone, tipo de cámara, etc).
- Indicar de forma aproximada el primer y último punto de la línea de vuelo.
- Indicar altura de vuelo, solapamiento deseado, entre otros elementos.

El programa genera las líneas de vuelo sobre la foto georreferenciada, e indica sobre estas los puntos de toma. Una vez aprobada por el usuario, el equipo está en condiciones de trabajo.

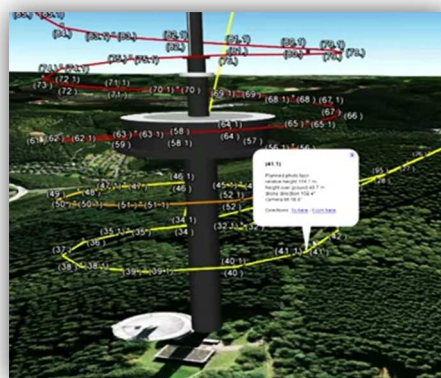


Ilustración 51: Pantalla generada por el software mdCockpit 3.- ⁽⁵⁸⁾

16.1.3 Aplicaciones

A continuación se reseñan los usos más frecuentes que se le han adjudicado a los drones:

- Inspección: por ejemplo, inspección de oleoductos y gasoductos, de líneas eléctricas, de plantas de energía eólica, etc.
- Seguridad: por ejemplo, documentación de escenas de crimen y operaciones antiterroristas.
- Vigilancia: de fábricas, de fronteras, de cumbres internacionales, etc.
- Industria del cine.
- Documentación y difusión de eventos en vivo.
- Ciencia e investigación en arqueología, meteorología, monitoreo ambiental, observación de vida silvestre, la investigación polar, etc.
- Mapeo fotogramétrico para las excavaciones, agricultura, topografía, etc.
- Búsqueda y rescate en tiempos de crisis, desastres naturales.
- Fotografía aérea del paisaje, de bienes raíces, análisis de accidentes de tráfico, etc.

⁽⁵⁸⁾ Fuente: <http://www.microdrones.com>

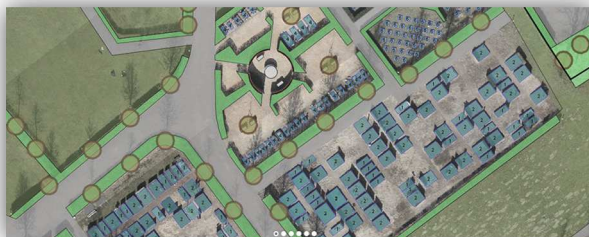


Ilustración 52: Aplicación en sistemas de información geográfica de imágenes UAV.- ⁽⁵⁹⁾



Ilustración 53: Aplicaciones en monitoreo y seguridad de imágenes UAV.- ⁽⁶⁰⁾

16.1.4 Especificaciones técnicas

Generales

- Descripción: cuadricóptero de talla media
- Masa del vehículo: 2650 g
- Masa de carga recomendada: 800 g
- Masa de carga máxima: 1200 g
- Masa máxima de despegue: 5500 g
- Baterías: 6S2P LiPo 22.2V, 13000 mAh y 6s3p LiPo, 22.2V 19500 mAh
- Rango de ascenso: 7.5 m/s
- Velocidad de crucero: 12.0 m/s
- Empuje máximo: 118.0 N
- Duración del vuelo: hasta 88 min
- Altura máxima: 5000 m

Condiciones operativas

- Rango de temperatura: $-10^{\circ}\text{C} < T < 50^{\circ}\text{C}$
- Humedad máxima: 90%
- Viento: imágenes continuas: 6 m/s - máximo: 12 m/s

Dimensiones

- Diámetro: 1030 mm
- Altura: 500 mm

⁽⁵⁹⁾ Fuente: <http://www.microdrones.com>

⁽⁶⁰⁾ Fuente: <http://www.microdrones.com>



Ilustración 54: Microdrone md4-1000.- ⁽⁶¹⁾

16.1.5 Otras características

16.1.5.1 Elementos de seguridad

Además del sistema GPS, que garantiza la operación segura y precisa de los drones, existen otros elementos de seguridad integrados al vehículo:

- Auto - test antes del despegue.
- Aterrizaje automático.
- Sistema de alerta en tiempo real.
- Aterrizaje seguro automático en caso de nivel de batería crítico.

16.1.5.2 Manejo del drone

La empresa *GmbH* ofrece dos días de capacitación a quien adquiere uno de sus productos. Promociona además que “no tarda más de un día en que el usuario aprenda a operar el Microdrone”.

16.1.5.3 Condiciones climáticas

Dada la estructura de fibra de carbono, así como la calidad del motor y baterías, el Microdrone es capaz de volar bajo lluvia, nieve e incluso con viento. La empresa certifica además la capacidad de soportar condiciones ambientales extremas, como ser el calor del desierto o las temperaturas de la Antártida.

⁽⁶¹⁾ Fuente: <http://www.microdrones.com>

16.2 ANEXO: CÁMARA SONY NEX-7

La cámara Sony NEX-7 fue anunciada por la empresa Sony en agosto de 2011, iniciándose las primeras ventas en Estados Unidos en noviembre del mismo año. Dicha cámara integra la segunda generación de cámaras digitales de lentes intercambiables sin espejos de la empresa Sony, siguiendo el desarrollo de la NEX-3 y la NEX-5.

16.2.1 Generalidades

A continuación se exponen algunas las principales características de la cámara Sony NEX-7 en estudio:

- Si bien el sensor de la NEX-7 es de igual tamaño que el de sus sucesoras, tiene mayor resolución, logrando 24.3 megapíxeles.
- El tiempo de obturación ⁽⁶²⁾ es de 20 milisegundos (ms).
- Permite capturar videos en formato HD, de forma manual o automática.
- Las tomas se almacenan en formato JPG, RAW o RAW/JPG combinados, en el caso de imágenes y AVCHD / MP4 en el caso de videos.
- En cuanto a la memoria, no presenta memoria interna. La marca Sony ofrece una tarjeta de memoria, Memory Stick PRO Duo/Pro-HG Duo/PRO-HG HX Duo, así como también SD/SDHC/SDXC. Ver ilustración 55.



Ilustración 55: Tarjeta de memoria portable desarrollada por la empresa Sony.- ⁽⁶³⁾

- La cámara puede ser adquirida con un kit de lentes de 18-55mm f/3.5-5.6 o únicamente el cuerpo.
- Es válido aclarar que las propiedades básicas de un objetivo son su distancia focal mínima y máxima, así como su valor de luminosidad para su distancia focal mínima y máxima. El cociente entre la máxima y la mínima distancia focal posible se denomina factor zoom y suele ser representado por el cociente acompañado por una 'x'. Aplicado a la Sony NEX-7, se puede deducir que la lente 18-55 se corresponde con un zoom de 3x.

Véase a continuación ilustración 56.

⁽⁶²⁾ Tiempo de obturación: periodo de tiempo durante el cual está abierto el obturador.

⁽⁶³⁾ Fuente: es.wikipedia.org



Ilustración 56: Cámara Sony NEX-7.-⁽⁶⁴⁾

16.2.2 Construcción y diseño

En primera instancia es de destacar la causa principal del éxito del producto en el mercado: la relación calidad – tamaño - peso. Las dimensiones son $12 \times 7 \times 12$ cm y pesa 566 gr. En cuanto a la construcción, se compone principalmente de aleación de magnesio al igual que las primeras generaciones de cámaras.

Posee una pantalla (que puede ser articulada o no) de 3.0 pulgadas (7.6 cm) con 921.6 pixeles. En la misma se ajusta de forma automática o manual el brillo. Además, se puede configurar el monitor para mostrar ajustes en tiempo real como el histograma, grillas, entre otras opciones.

A continuación se presenta la conformación de la cámara Sony NEX-7, indicándose sus elementos:

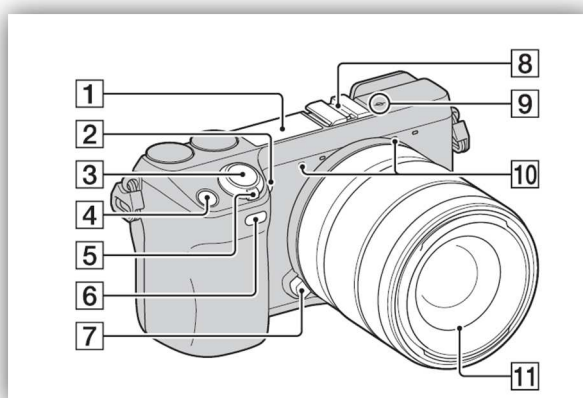


Ilustración 57: Vista frontal de la cámara Sony NEX-7.-⁽⁶⁵⁾

⁽⁶⁴⁾ Fuente: www.sony.es

⁽⁶⁵⁾ Fuente: Sony, (s/f) *Cámara Digital de Lentes Intercambiables*.

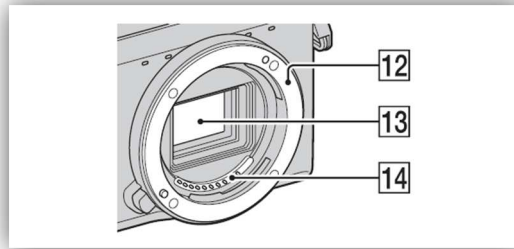


Ilustración 58: Vista frontal de la cámara Sony NEX-7 sin el objetivo.- ⁽⁶⁶⁾

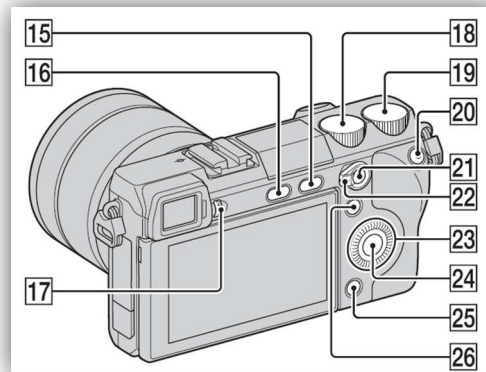


Ilustración 59: Vista posterior de la cámara Sony NEX-7.- ⁽⁶⁷⁾

1. Flash
2. Iluminador del autodesparador del captador de sonrisas
3. Botón disparador
4. Botón de navegación
5. Interruptor on-off
6. Sensor remoto
7. Botón de liberación del objetivo
8. Zapata de accesorios de bloqueo automático
9. Marca de posición del sensor de la imagen
10. Micrófono
11. Objetivo
12. Montura
13. Sensor de la imagen
14. Contactos del objetivo
15. Botón play (reproducción)
16. Botón extractor de flash

⁽⁶⁶⁾ Fuente: Sony, (s/f) *Cámara Digital de Lentes Intercambiables*.

⁽⁶⁷⁾ Fuente: Sony, (s/f) *Cámara Digital de Lentes Intercambiables*.

17. Rueda de ajuste de dioptrías
18. Dial de control L
19. Dial de control R
20. Botón película
21. Botón AF/MF
22. Palanca de conmutador AF/MF
23. Rueda de control
24. 25. Y 26. Teclas programables A, B y C respectivamente

16.2.3 Funcionamiento

Respecto al tiempo de encendido, la cámara NEX-7 es capaz de estar en condiciones de toma en 1.5 segundos. Asimismo, alcanza una velocidad de toma de 10 tomas por segundo (tps). El tiempo de reciclaje del flash es de 1.25 segundos.

La duración de la batería es equivalente a 400 capturas, en la pantalla se muestra un ícono y un porcentaje asociado estado actual de la misma.

El software de la NEX-7 ofrece además la posibilidad de compensar la aberración cromática, la distorsión y el sombreado. Tanto la aberración cromática como el sombreado están por defecto; mientras que la corrección por distorsión debe ser indicada por el usuario.

16.3 ANEXO: PLAN DE VUELO

16.3.1 Definiciones:

Véase a continuación la definición de algunos conceptos que intervienen en el desarrollo del presente anexo.

- Plan del vuelo: Son los cálculos previos al vuelo, que se realizan para proyectar la trayectoria a seguir por el drone a efectos de obtener las imágenes según lo estipulado.
- Condiciones del vuelo: Son aquellos requerimientos que debe cumplir el vuelo para obtener determinadas características en la fotografía.
- Recubrimiento: Área en común entre dos fotografías. Existen dos tipos de recubrimientos:
 - Longitudinal: Corresponde al recubrimiento entre una imagen y la siguiente, dentro de una misma línea de vuelo.
 - Transversal: Corresponde al recubrimiento de las imágenes de dos líneas de vuelo consecutivas.

En la ilustración 60 se representa con una línea roja el recorrido que realiza el vehículo. En gris, se representan las imágenes visualizando su correspondiente recubrimiento longitudinal y transversal.

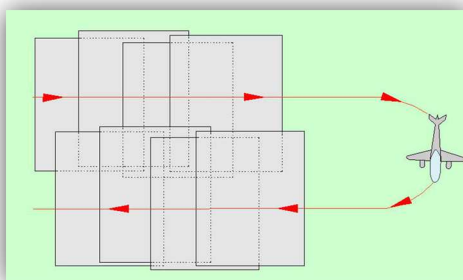


Ilustración 60: Plan de vuelo de un vehículo aéreo.- ⁽⁶⁸⁾

16.3.2 Diseño del vuelo

En el plan de vuelo se definen los parámetros asociados al relevamiento fotogramétrico (por ejemplo escala y número de líneas de vuelo), por lo que es importante conocer la relación entre el sensor y el terreno.

A continuación se presenta una breve reseña de los elementos determinantes de la relación sensor - terreno y por tanto determinantes del plan de vuelo.

16.3.2.1 Escala de la imagen y altura de vuelo

En la mayoría de los vuelos realizados con fines fotogramétricos, la escala media que se desea obtener en las fotografías es el dato de entrada (*input*) para la determinación de la altura de vuelo (*output*). Para el caso en estudio, la altura de vuelo promedio fue definida sin tener en cuenta la escala resultante.

⁽⁶⁸⁾ Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

En el caso ideal, donde el terreno es llano y horizontal, la fotografía perfectamente vertical, y el avión vuela con altitud constante, el plan de vuelo se justifica en el concepto matemático de semejanza de triángulos, ver ilustración 61.

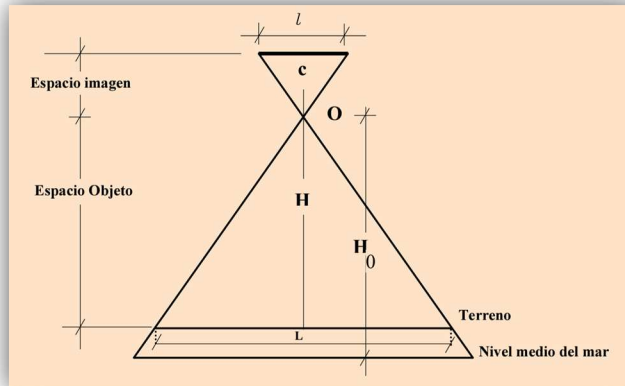


Ilustración 61: Relación imagen - terreno en el caso ideal.- ⁽⁶⁹⁾

Para este caso, el cálculo de la escala se reduce a una fórmula muy sencilla:

$$E = \frac{c}{H}$$

Donde:

- E = Escala de la fotografía
- H = Altura relativa de vuelo
- c = Distancia focal de la cámara

Para el caso ideal, la imagen tiene la misma escala en toda su superficie, dado que el terreno es llano (H constante). En la realidad la superficie terrestre no es plana, lo que provoca que la escala sea distinta para cada punto de la superficie, calculándose por tanto una escala promedio que se corresponde con la cota media del área abarcada por la imagen.

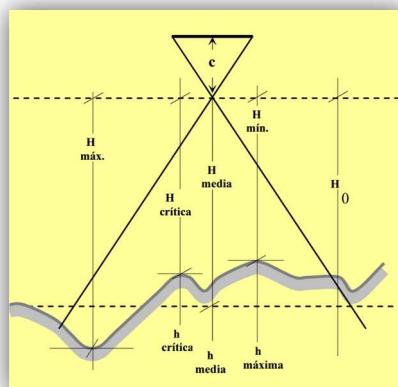


Ilustración 62: Variación de la altura relativa de vuelo según el relieve.- ⁽⁷⁰⁾

⁽⁶⁹⁾ Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

⁽⁷⁰⁾ Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

Las ecuaciones aplicables en este caso son las siguientes:

$$E_p = \frac{c}{H_m}$$

$$E_{m\acute{a}x} = \frac{c}{H_{m\acute{a}x}}$$

$$E_{m\acute{i}n} = \frac{c}{H_{m\acute{i}n}}$$

Donde:

- E_p = Escala promedio de la fotografía
- $E_{m\acute{a}x}$ = Escala máxima de la fotografía
- $E_{m\acute{i}n}$ = Escala mínima de la fotografía
- H_m = Altura de vuelo media
- $H_{m\acute{i}n}$ = Altura de vuelo mínima
- $H_{m\acute{a}x}$ = Altura de vuelo máxima

En síntesis, en el caso real la escala es puntual, es decir para cada punto de la imagen se tiene una escala distinta, debido a que el terreno tiene variaciones en altura y por tanto la altura relativa de vuelo cambia.

16.3.2.1.1 Recubrimientos

A la hora de realizar el plan de vuelo, es fundamental establecer los recubrimientos. Pues no se podrán extraer coordenadas tridimensionales de las zonas en las cuales no haya recubrimiento. Por ello, es fundamental comprender la geometría que hay detrás de este concepto, tanto en longitudinal como en transversal.

16.3.2.1.2 Recubrimiento longitudinal

Primero se presenta el caso ideal, para luego analizarlo en la situación real.

Considérese el eje principal vertical, el terreno llano y horizontal y el avión volando en línea recta y en altitud constante, de esta forma se obtienen imágenes a intervalos constantes e iguales.

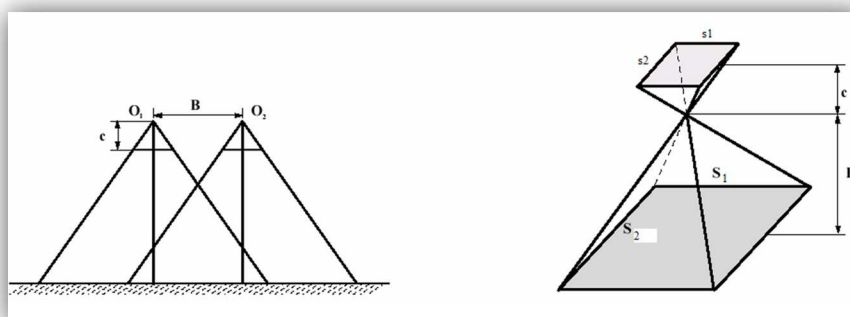


Ilustración 63: Toma de un modelo fotogramétrico en condiciones ideales.- ⁽⁷¹⁾

⁽⁷¹⁾ IGN. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección

De la ilustración 63 podemos apreciar los siguientes parámetros:

- s_1 = Lado logitudinal de la fotografía
- s_2 = Lado transversal de la fotografía
- S_1 = Lado logitudinal del terreno
- S_2 = Lado transversal del terreno

La relación entre estos parámetros está dado por las siguientes igualdades:

$$S_1 = \frac{s_1}{E}; S_2 = \frac{s_2}{E} \Rightarrow S_1 = \frac{s_1 * H}{c}; S_2 = \frac{s_2 * H}{c}$$

Así, sabiendo cual va a ser la altura de vuelo y las características de la cámara (distancia principal y tamaño de la imagen) se puede determinar el área que se cubrirá en una toma.

Para que exista solapamiento entre dos imágenes consecutivas, la distancia recorrida por el drone entre las dos tomas (B), debe ser menor al lado longitudinal del terreno, es decir

$$B \leq S_1$$

En la realidad, las suposiciones antes mencionadas tienen ciertas perturbaciones, dado que la superficie que abarca una foto depende en gran medida de tres factores:

1. La inclinación del eje vertical.

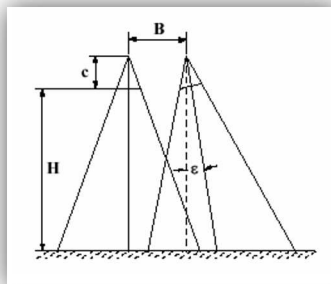


Ilustración 64: Inclinación del eje de la toma.- ⁽⁷²⁾

2. Variaciones en la altura de vuelo.

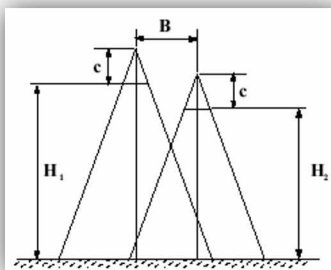


Ilustración 65: Variación de la altura relativa de vuelo.- ⁽⁷³⁾

⁽⁷²⁾ Fuente: IGN. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección

⁽⁷³⁾ Fuente: IGN. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección

3. El relieve del terreno.

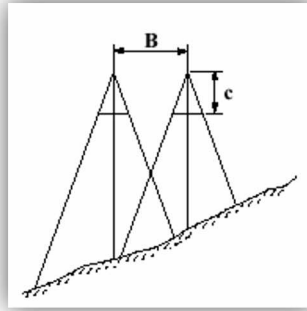


Ilustración 66: Variación del relieve.- ⁽⁷⁴⁾

Para que estos factores no afecten el producto que se desea obtener, es necesario que la base sea menor a la mitad del lado del terreno, es decir:

$$B < \frac{S_1}{2}$$

Optando por esta solución, se obtendría siempre un solape superior al 50%. Debe tenerse la precaución de no exceder demasiado este valor, ya que aumentaría la cantidad de modelos estereoscópicos, disminuyendo así el rendimiento.

Para poder calcular cuál es la base necesaria para obtener un determinado recubrimiento, se emplea una simple fórmula:

$$B = S_1 * (1 - p) = \frac{S_1}{E} * (1 - p)$$

Donde:

- p = Recubrimiento longitudinal expresado en porcentajes.

En el caso de conocer la altura de vuelo la ecuación es la siguiente:

$$B = \frac{S_1 * H}{c} * (1 - p)$$

⁽⁷⁴⁾ Fuente: IGN. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección

16.3.2.1.3 Recubrimiento lateral

En la mayoría de los casos, con una sola banda no se puede cubrir toda el área, por lo que es necesario realizar múltiples líneas de vuelo.

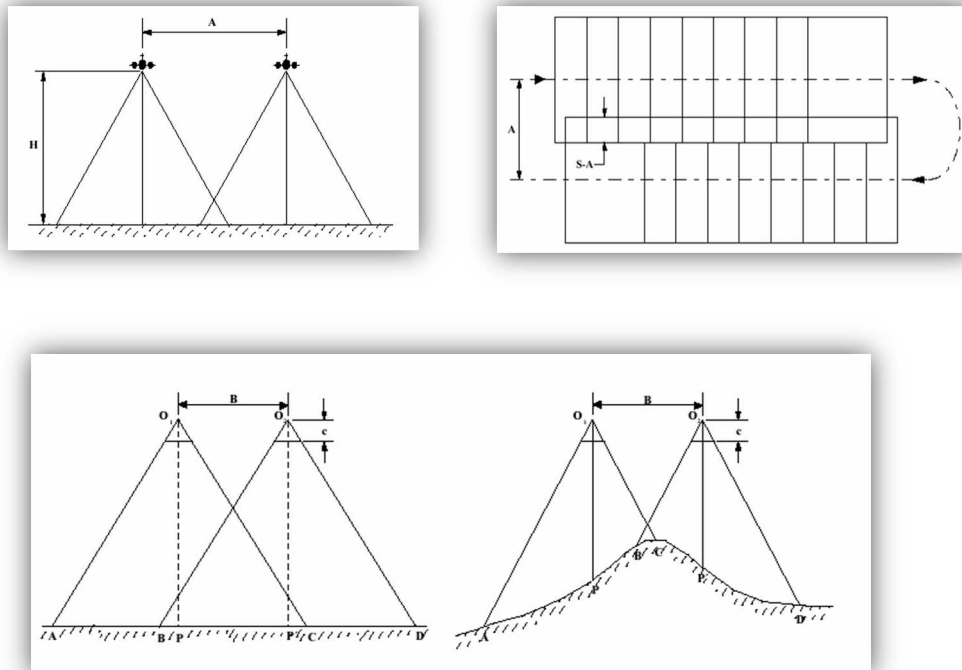


Ilustración 67: Recubrimiento lateral.-(75)

Se denomina A a la distancia que separa una línea de vuelo en relación a la siguiente.

Es necesario que el recubrimiento lateral ($q\%$) sea mínimo para disminuir el número de líneas. Para el caso ideal, se cumple:

$$A < S_2$$

Al igual que para el caso del recubrimiento longitudinal, existen variaciones en el recubrimiento, que se debe a:

- Inclinación del eje transversal.
- Relieve del terreno.
- Error en el mantenimiento de la altitud.
- Error en la apreciación de la magnitud A .
- Error en la corrección de la deriva.
- Errores en el mantenimiento de una ruta constante.

Teniendo todo esto en cuenta, se calcula la variable aplicando la siguiente formula:

$$A = S_2(1 - q)$$

⁽⁷⁵⁾ Fuente: IGN. Grupo A.2 Fotogrametría y Teledetección.

16.3.2.2 Otros conceptos y fórmulas de interés

16.3.2.2.1 Número de recorridos fotogramétricos

Este valor corresponde a la cantidad de líneas que se realizaran.

Para este cálculo, supondremos que el área a sobrevolar tiene forma rectangular de lados L_1 y L_2 ($L_1 > L_2$). Salvo algún caso en particular, las líneas de vuelos se definen de forma paralela al lado más largo, es decir a L_1 . Por lo tanto, la cantidad de líneas de vuelo estará determinada por el ancho a recorrer y el avance transversal, es decir:

$$\text{Lineas de vuelo} = \frac{L_2}{A}$$

16.3.2.2.2 Superficie estereoscópica y superficie útil

Cuando se habla de superficie estereoscópica, se hace referencia a la superficie de superposición longitudinal de dos fotografías consecutivas, esta se calcula de la siguiente manera:

$$S_E = (p * s_1 * Df) * (s_1 * Df) = p * (s_1 * Df)^2$$

Donde

$$- S_E = \text{Superficie estereoscópica.}$$

Se denomina superficie útil o neta, a la parte de la superficie estereoscópica comprendida entre los puntos principales de dos fotografías consecutivas y el sector comprendido entre dos líneas de vuelo. Analíticamente, la superficie útil es:

$$S_u = B * A = (s_1 * Df)^2 * (1 - p) * (1 - q)$$

Donde

$$- S_u = \text{Superficie útil.}$$

16.3.3 Factores influyentes en el vuelo

Es importante conocer cuáles son los factores que pueden afectar la toma de una imagen, ya sea por errores en el cálculo del plan de vuelo o por diferencia entre el vuelo real y el teórico.

16.3.3.1 FALTA DE VERTICALIDAD

Una imagen es considerada vertical cuando el eje de la cámara forma con la vertical del lugar un ángulo inferior a 10° .

Además de las fotografías verticales, existen las denominadas oblicuas. Se llaman oblicuas bajas, cuando el ángulo que se forma entre el eje de la cámara y la vertical del lugar se encuentra entre 10° y 30° ; cuando el ángulo que se forma es mayor se denominan oblicuas altas o panorámicas. Ver ilustración 68.

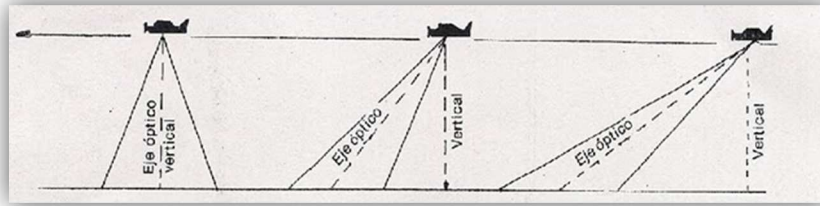


Ilustración 68: Relación entre el eje óptico de la cámara y la vertical del lugar.- (76)

Para aplicaciones fotogrametrías se utilizan las imágenes verticales.

La falta de verticalidad en la imagen produce desplazamientos, dificultando así la observación estereoscópica y la restitución de los modelos.

16.3.3.2 DERIVA, TILT Y TIP.

Defínase los siguientes conceptos:

- Cabeceo: Es el movimiento que realiza el avión sobre un eje imaginario que une los extremos de las alas.
- Alabeo: Es el movimiento que realiza el avión sobre un eje imaginario que se extiende desde la cabeza del avión hasta su cola.
- Guiñado: Es el movimiento que realiza el avión sobre un eje imaginario que pasa por el centro de gravedad del avión y es perpendicular a los otros dos ejes imaginarios definidos.

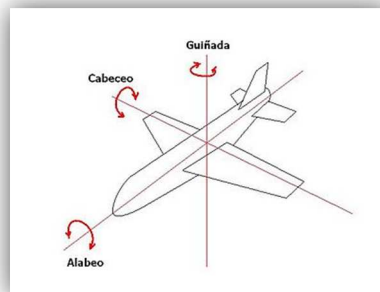


Ilustración 69: Los tres movimientos que afectan al avión.- (77)

Se denomina deriva al ángulo de desviación que sufre la trayectoria real que describe el avión respecto a la teórica, provocada por el movimiento de guiñada. Esta desviación es consecuencia de la influencia del viento sobre el avión.

Cuando un avión está sobre la trayectoria proyectada, la cámara está ubicada de modo que uno de los costados de la película / sensor, sea paralelo al eje de vuelo del avión. Cuando existe deriva, la película se encuentra rotada con respecto a la posición deseada, véase la siguiente figura.

⁽⁷⁶⁾ Fuente: es.wikipedia.org

⁽⁷⁷⁾ Fuente: es.wikipedia.org

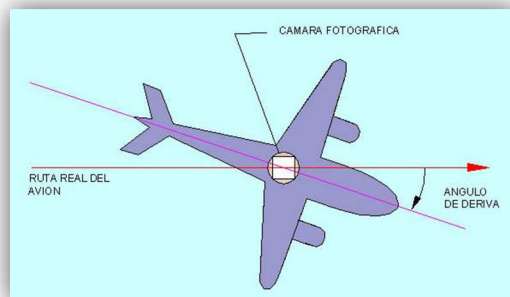


Ilustración 70: Posición de la cámara en la dirección de vuelo.- (78)

Cuando existe deriva, es necesario corregir la misma, haciendo girar la cámara en su eje vertical, de modo que quede orientada de la forma correcta. Si no se corrige la deriva, o se corrige de forma equivocada, se verá la faja de vuelo distorsionada, como se muestra en la ilustración siguiente.

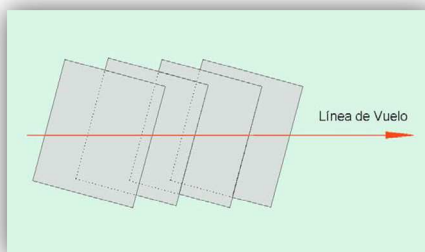


Ilustración 71: Efecto de deriva sobre las imágenes según la dirección de vuelo.- (79)

Las consecuencias que provocan el cabeceo y el alabeo son los denominados tip y tilt respectivamente. Se puede detectar su existencia al observar un par estereoscópico y ver por ejemplo, ríos subir pendientes o visualizar lagunas no horizontales.

FAJAS SINUOSAS.

Si no se logra una línea de vuelo continua, y se obtiene en cambio una sinuosa, puede haber zonas en las cuales el recubrimiento lateral no existiese, quedando lagunas o huecos sin cubrir, como se muestra en la siguiente ilustración.

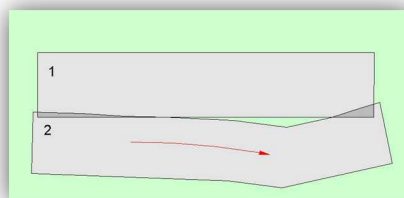


Ilustración 72: Efecto de línea de vuelo sinuoso.- (80)

(78) Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

(79) Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

(80) Fuente: CEFOCCA-UNSJ. (s/f) *Fotogrametría*

INFLUENCIA DEL RELIEVE

Si la topografía de la zona de vuelo es irregular, la escala varia de manera sensible de un punto a otro de la misma fotografía, así como de una foto a otra. Esto debe ser tenido en cuenta para establecer la cobertura fotográfica conservando los recubrimientos indispensables.

Recuérdese que cuando más cerca este el terreno de la cámara, se cubrirá menos superficie de terreno en una imagen, por lo que si para el cálculo de recubrimiento se consideran las zonas más bajas del terreno, se corre el riesgo de tener poco recubrimiento o inclusive no tener en las zonas de terreno más elevado. Para evitar este inconveniente se recomienda tomar la cota medio del terreno.

16.4 ANEXO: CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN UTILIZADO EN EL PROYECTO

A continuación se presentan los resultados del certificado de calibración de la cámara, aportado por la empresa UAV-Agrimensura Birriel & González, vigente a la fecha del vuelo.

Camera_calibration_file NEX-7_16.0_6000x4000

#Focal Length (mm) assuming a sensor width of 23.399999999999999x15.6mm

#Image size 6000x4000 pixel

FOCAL 15.822511945612925

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm (Inpho)

XPOFF -0.18159061574000696

YPOFF 0.14447927150051479

#Principal Point Offset xpoff ypoff in mm

XPOFF 0.18159061574000696

YPOFF 0.14447927150051479

#Principal Point Offset xpoff ypoff in pixel

XPOFF 46.561696343591393

YPOFF 37.045967051413982

#How many fiducial pairs (max 8):

NUM_FIDS 4

#Fiducials position

DATA_STRIP_SIDE left

#Fiducial x,y pairs in mm:

FID_PAIRS

11.699999999999999 -7.799999999999998

-11.699999999999999 -7.799999999999998

-11.699999999999999 7.799999999999998

11.699999999999999 7.799999999999998

#Symmetrical Lens Distortion Odd-order Poly Coeffs: K0,K1,K2,K3

SYM_DIST 0 -1.6752577052970018e-005 9.4508373432617847e-008 1.2956808409416067e-011

#Decentering Lens Coeffs p1,p2,p3

DEC_DIST -4.1935812779823216e-006 2.8665000454610265e-008 0

#How many distortion pairs (max 20):

NUM_DIST_PAIRS 20

16.5 ANEXO: RESTITUCIÓN

16.5.1 Generalidades

La fotogrametría se distingue de otras disciplinas por su capacidad de obtener información tridimensional a partir de registros bidimensionales. Esto se logra recurriendo al proceso conocido como restitución fotogramétrica, que en términos generales consiste en la formación de pares estereoscópicos escalados.

Para ello se requieren al menos dos fotografías que tengan un espacio en común, tomadas desde dos puntos de vista diferentes. En el proceso, deben reconstruirse los haces perspectivos, ubicándolos en su posición en el momento de la toma, con respecto a un sistema de referencia dado. De esta forma es posible obtener coordenadas tridimensionales de los puntos que pertenezcan a ambas fotografías. Ver ilustración siguiente.

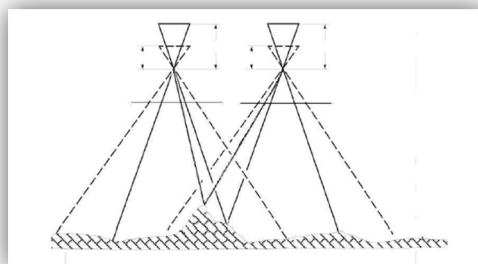


Ilustración 73: Reconstrucción de los haces perspectivos.- ⁽⁸¹⁾

Así pues, la restitución constituye un problema meramente geométrico. De forma analítica se resuelve a través de tres tipos de ecuaciones:

- Ecuación de colinealidad.
- Ecuación de coplanaridad.
- Ecuación de escala.

La restitución analítica es la que emplea la fotogrametría contemporánea, dado que su éxito se justifica en la tecnología existente.

16.5.2 Fases de la restitución

En términos generales pueden identificarse las siguientes etapas en la restitución:

1. *Orientación interior*: Implica la reconstrucción de cada uno de los haces perspectivos, es decir se reconstruyen las condiciones geométricas de la cámara en el momento de la toma.
2. *Orientación relativa*: Incluye la identificación de puntos homólogos en ambos fotogramas. Implica la intersección de los haces perspectivos y la visión estereoscópica.
3. *Orientación absoluta*: Se reduce a una transformación de semejanza (3D), en la que se dimensiona el modelo estereoscópico en base a coordenadas conocidas del terreno.

Actualmente, los software fusionan en un único paso las etapas 2 y 3, en lo que se conoce como *orientación exterior*. A continuación se realiza una breve reseña de las tareas vinculadas a cada una de las etapas, así como los parámetros asociados.

⁽⁸¹⁾ Fuente: www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf

16.5.3 Orientación interior

En términos ideales, la orientación interior se logra ubicándolo en el mismo sistema de coordenadas el centro perspectivo y la imagen. En la realidad, esta tarea no es tan simple, pues existen diversas fuentes de error:

1. El punto principal no coincide con el centro fiducial: La corrección asociada se logra a partir de una transformación de coordenadas bidimensionales, ver ilustración siguiente.

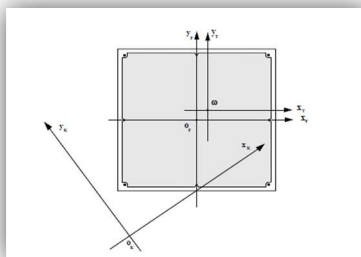


Ilustración 74: Ubicación del punto principal en la fotografía.- (82)

Los parámetros que intervienen en la transformación desde el punto de vista analítico surgen del certificado de calibración. Estos son la distancia focal y las coordenadas del punto principal.

2. El objetivo de la cámara está afectado por distorsiones: Estas se corrige en base a la curva de distorsión radial que incluye el certificado de calibración. En general, se indican cuatro curvas, cada una de ellas asociada a una de las semidiagonales. Véase a modo de ejemplo la ilustración siguiente.

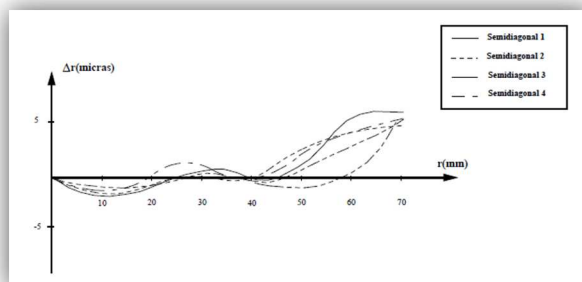


Ilustración 75: Representación de las distorsiones radiales.- (83)

La cuantificación de la distorsión radial (Δr), se realiza mediante el método de aproximación a un polinomio de distorsión de la lente:

$$\Delta r = a_1 r + a_2 r^3 + a_3 r^5 + a_4 r^7$$

Donde Δr es la distorsión radial de la lente para un punto ubicado a una distancia r radial del punto principal.

⁽⁸²⁾ Fuente: www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf

⁽⁸³⁾ Fuente: www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf

16.5.4 Orientación exterior

En la orientación exterior, se busca obtener el modelo estereoscópico referido al sistema de referencia terreno. Para ello se aplica la condición de colinealidad, exigiendo que el centro de proyección, el punto imagen y el punto terreno estén en una misma recta.

Estableciendo esta condición para las dos imágenes respecto al mismo punto, se logra la intersección de rayos homólogos para el punto dado. Ver ilustración siguiente.

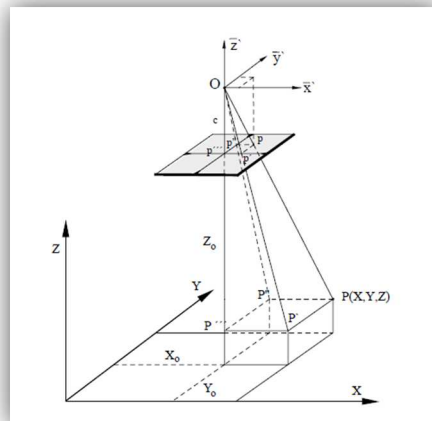


Ilustración 76: Condición de colinealidad.- ⁽⁸⁴⁾

La condición se cumple, si al sistema de coordenadas de la imagen se le imprimen tres rotaciones (ω, φ, κ).

Análíticamente, de la condición de colinealidad aplicada a una sola imagen se obtienen dos igualdades, en las que intervienen doce parámetros independientes. Estos son:

- Coordenadas imagen (x', y', c)
- Coordenadas de los centros de proyección (X_o, Y_o, Z_o)
- Coordenadas del punto objeto (X, Y, Z)
- Elementos de rotación (ω, φ, κ)

La distancia principal es siempre una cantidad conocida. Las coordenadas imagen son cantidades observables normalmente. De esta forma, si hay suficientes puntos del terreno con coordenadas conocidas, que puedan ser medidos en las imágenes, las incógnitas del sistema serán tres giros en cada imagen, es decir ($\omega_1, \varphi_1, \kappa_1$) y ($\omega_2, \varphi_2, \kappa_2$). En este caso se resolvería el problema de **intersección inversa en el espacio**.

En cambio, si se conocen los giros y las coordenadas de los centros de proyección de ambas tomas, las ecuaciones serán utilizadas para obtener las coordenadas de puntos, resolviéndose así el problema de **intersección directa en el espacio**.

⁽⁸⁴⁾ Fuente: www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_7.pdf

16.6 ANEXO: POSICIONAMIENTO GPS

El sistema de GPS, fue concebido como un sistema de navegación, basado en la emisión de señales de radio desde satélites que conforman una constelación orbitando alrededor de la tierra.

Cualquier usuario que reciba las señales GPS en la Tierra con un receptor, podrá determinar su posición, la hora y su velocidad en caso que se esté desplazando. Las aplicaciones típicas son: viajes terrestres, ubicación de vehículos, topografía, navegación marítima y aérea, control de maquinaria, etc.

Este sistema comenzó a desarrollarse en el año 1973 por el Departamento de Defensa de Estados Unidos.

La constelación está compuesta por 24 satélites artificiales (21 regulares y 3 de respaldo), la cual se denomina NAVSTAR (*Navigation Satellite Timing and Ranging*). Este sistema opera por completo desde el año 1995. Además de los satélites, el sistema cuenta con estaciones de apoyo y control en tierra.

16.6.1 Fundamentos

- Trilateración Satelital.
- Conocimiento preciso de la órbita de los satélites (efemérides).
- Medición de distancias desde los satélites.
- Medición precisa del tiempo (relojes atómicos).
- Corrección de errores en la propagación de la onda: Errores propios del satélite, errores por el medio de propagación y errores de recepción.

16.6.1.1 Trilateración Satelital

Supóngase que un receptor en la Tierra capta la señal de tres satélites determinando la distancia entre cada uno de ellos y el receptor. Esto determinará geométricamente la intersección de tres esferas de radios R_1 , R_2 y R_3 con sus respectivos centros en cada satélite.

El lugar geométrico de la intersección serán dos puntos, sobre el perímetro del círculo determinado por la intersección de dos esferas. Ver ilustración 77

Uno de estos dos puntos puede ser descartado por ser una respuesta incorrecta, bien sea por estar en el espacio o por moverse a una velocidad muy elevada.

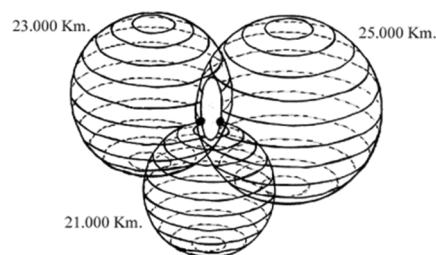


Ilustración 77: Posicionamiento básico del GPS.- ⁽⁸⁵⁾

16.6.1.2 Las Órbitas

Es necesario conocer la posición de cada uno de los satélites en el momento en que el receptor toma la información en tierra. O sea, es necesario conocer la posición del centro de cada esfera que se utilizará en la trilateración satelital. Las posiciones de los satélites en las órbitas (efemérides) son ajustadas en las estaciones de control en la Tierra, y los propios satélites son quienes emiten esa información, con la cual los receptores hacen los cálculos.

⁽⁸⁵⁾ Fuente: www.monografias.com

Los 24 satélites se distribuyen de manera irregular por los seis planos orbitales separados 60° en longitud y con una inclinación de 55° respecto al plano del Ecuador.

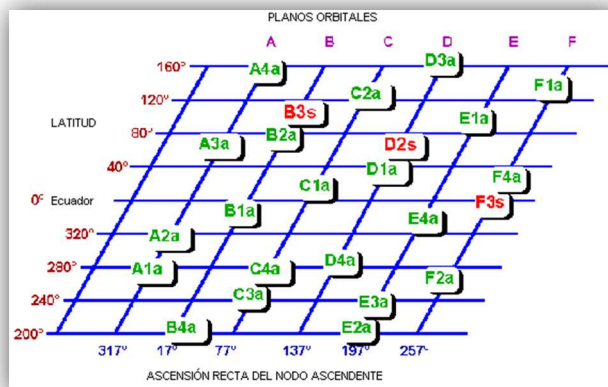


Ilustración 78: Distribución de la constelación de satélites GPS.- (86)

Estos satélites describen órbitas casi circulares con un período de 11 horas y 58 minutos a un promedio de 20.200 km de la superficie terrestre. Esta distribución garantiza que haya un mínimo de 4 satélites sobre la línea del horizonte en cualquier lugar del planeta.

Los datos de las órbitas de los satélites están referenciados en el sistema de coordenadas conocido como *World Geodetic System 84* (WGS84). Y por consecuencia, la posición que se obtiene del receptor en tierra también está referenciada a este sistema de coordenadas (WGS84).

Si se quiere tener los datos de las efemérides del sistema, con una precisión aun mayor de las que envían los propios satélites, se las pueden bajar de página web del IGS (*International GPS Service*: <http://igscb.jpl.nasa.gov>).

Estas órbitas están referenciadas al marco de referencia del sistema de coordenadas WGS84 con precisiones del orden del centímetro y su uso es aconsejado para aquellos trabajos de altísima precisión. Este marco se conoce como *International Terrestrial Reference Frame* (ITRF).

16.6.1.3 Medición de la distancia desde los satélites

Medición de la distancia satélite receptor

Como la velocidad de las ondas de radio es casi igual a la velocidad de la luz, medir el tiempo de viaje de la señal al receptor es una actividad difícil de realizar.

Debido a la gran velocidad de las señales de radio y a que las distancias entre los satélites y la Tierra son relativamente cortas (unos 20.200 kilómetros) para la velocidad de dichas señales, el tiempo promedio que tarda en viajar la señal desde un satélite hasta el receptor en la Tierra es de 0,067 segundos. Estos tiempos tan reducidos pueden ser medidos con los relojes atómicos que portan los satélites con precisiones de un nanosegundo, pero colocar este tipo de relojes en los receptores sería muy costoso. Para solucionar este problema los receptores corrigen los errores en la medición del tiempo mediante el cálculo de la distancia a un cuarto satélite.

El sistema utiliza la propagación de ondas de radio para medir las distancias a los satélites.

Esta medición se basa en la comparación entre la señal recibida por el receptor y una réplica producida por el propio equipo que pretende estar sincronizada con la señal emitida por el satélite. El desfase entre dichas señales permite calcular el tiempo de viaje entre el receptor y los satélites, permitiendo calcular la distancia entre ellos.

(86) Fuente: tel.abloque.com

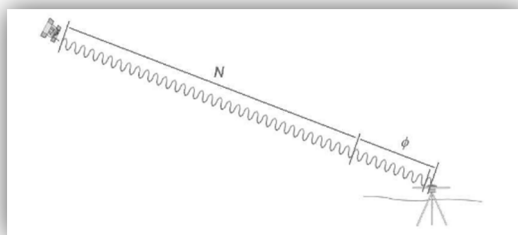


Ilustración 79: Cálculo de la distancia receptor-satélite por desfase de ondas.-

La sincronización entre estas señales tiene como referencia una escala de tiempo propia del sistema, conocida como *GPS Time* o GPST, y tiene como base en la tierra los relojes atómicos de las estaciones de control del sistema GPS y los relojes atómicos de los propios satélites. Las bases de control en la Tierra son: Colorado Springs, Cabo Cañaveral, Kwajalein, Diego Garcia, Ascensión y Hawaii.

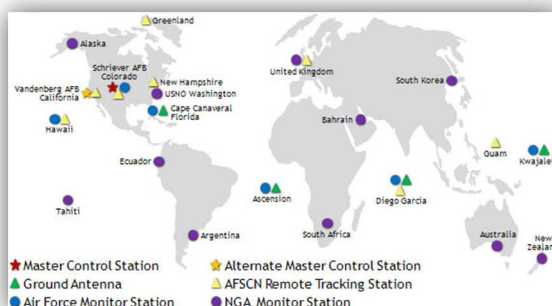


Ilustración 80: Distribución de los puntos de control terrestre.- (87)

Errores en la medición de la distancia satélite-receptor

Se mencionó anteriormente que la velocidad de las señales de GPS es cercana, pero no igual, a la velocidad de la luz. Esto ocurre por el efecto de la atmósfera terrestre sobre las señales electromagnéticas, sobre todo al pasar por la ionósfera y la tropósfera.

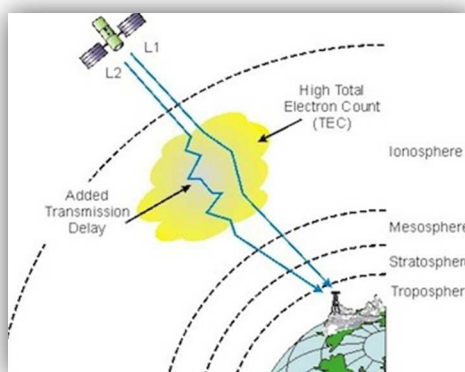


Ilustración 81: Efecto de la Ionósfera y la Tropósfera sobre la señal del satélite.- (88)

Los satélites transmiten los datos en dos frecuencias que se conocen como L1 y L2. En la frecuencia L1 hay dos códigos modulados. Ellos son:

(87) Fuente: www.gps.gov

(88) Fuente: www.xenon.colorado.edu

- *Clear Acquisition* (Código CA) que modula a una frecuencia de 1.023MHz. Tiene una duración de un milisegundo y su longitud de onda es de aproximadamente 300 m.
- El Código P o Código de Precisión que modula a una frecuencia de 10.23MHz. La secuencia de este código es de 267 días y su longitud de onda es de 29.31 cm.

La frecuencia L2 solo transmite el código P.

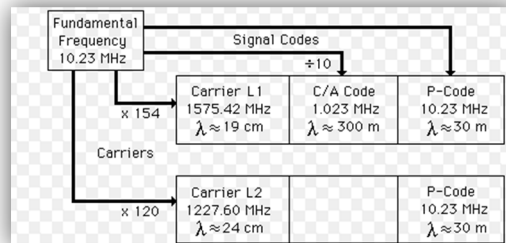


Ilustración 82: Estructura de la señal GPS.- ⁽⁸⁹⁾

Ambos códigos sirven para identificar a cada satélite y para medir el tiempo de viaje de la señal.

Estos códigos CA y P, fueron creados para brindar dos servicios diferentes, conocidos como:

- *Standard Positioning Service* (SPS)
- *Precise Positioning Service* (PPS)

El Servicio Estándar (SPS) tiene como base el código CA, que brinda una menor precisión en la medida del tiempo de viaje de la señal satélite – receptor, que el brindado por el código P.

Los receptores topográficos utilizan el Servicio Preciso (PPS) que utiliza ambos códigos.

Existen receptores de una sola frecuencia y receptores de frecuencia dual. Estos últimos rastrean las frecuencias L1 y L2, y al ser correlacionadas dichas frecuencias, es posible eliminar matemáticamente los errores de la ionósfera. Éste es una de las ventajas de usar un receptor de frecuencia dual. Los receptores de una sola frecuencia también pueden resolver los errores provocados por la ionósfera en tiempo real, pero les toma más tiempo, en algunos casos mucho más tiempo.

16.6.1.4 Determinación de la posición del receptor.

Posición Absoluta

La posición absoluta generalmente utiliza el tiempo de propagación de la señal desde el satélite, medido a través de los códigos modulados en las frecuencias portadoras. Ver ilustración siguiente.



Ilustración 83: Receptor Trimble R4.- ⁽⁹⁰⁾

⁽⁸⁹⁾ Fuente: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu

⁽⁹⁰⁾ Fuente: www.trimble.com

La posición absoluta se obtiene con un único receptor, y esto depende en gran medida de la configuración geométrica determinada por la posición de los satélites. El Factor de Dilución de la Precisión (*Dilution of Precision* – PDOP), es una función de la configuración geométrica los satélites, es la razón entre la desviación de la posición (σ) y la desviación de las distancias medidas (σ_0).

$$PDOP = \frac{\sigma}{\sigma_0}$$

El posicionamiento puntual es más preciso cuando los satélites tienen una buena distribución espacial en el cielo. Ver ilustración siguiente



Ilustración 84: Factor DOP para las componentes planimétricas (HDOP) y altimétrica (VDOP).-

El factor PDOP es inversamente proporcional al volumen de la figura geométrica con vértices en los satélites observados y en la antena receptora.

Un valor adecuado de PDOP, siendo mayor que uno, deberá ser menor a dos.

$$1 < PDOP < 2$$

GPS Diferencial

El sistema GPS ha ido evolucionando con el tiempo para lograr precisiones mayores, necesarias para diversos usos civiles. Una de esas evoluciones se logró con la implementación de la técnica de GPS Diferencial o dGPS, que redujo significativamente el error. Esta técnica está basada en la idea de utilizar y correlacionar las distintas medidas de dos o más receptores GPS. Ver ilustración siguiente.

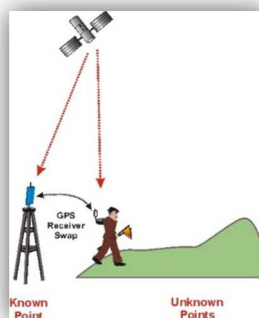


Ilustración 85: GPS diferencial.- ⁽⁹¹⁾

Para ello, se deja a uno de los receptores en una posición estática (estación base) y de esta forma su ubicación se determinará con alta precisión absoluta.

Luego, las posiciones calculadas por el otro receptor, en cada lugar, serán corregidas por la información enviada por la estación base, que está recalculando su posición a todo instante.

Para cada satélite, la diferencia entre la distancia medida y la distancia esperada contiene el efecto total del conjunto de errores externos al receptor. En receptores cercanos a la estación

⁽⁹¹⁾ Fuente: www.wirelessdictionary.com

base, el efecto total de estos errores es idéntico y es corregido por las estimaciones realizadas por la estación base. Esta corrección, en la distancia entre el satélite y el receptor móvil, es realizada de modo instantáneo, cuando el receptor móvil toma la posición de cada punto, logrando así una buena precisión.

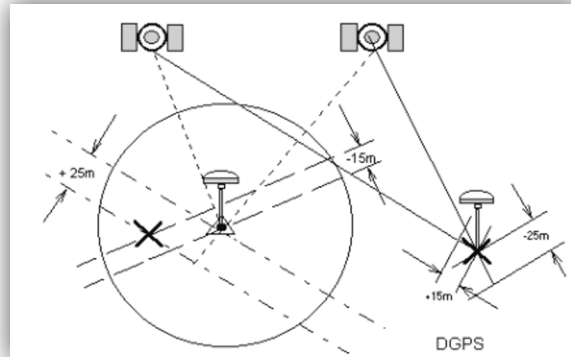


Ilustración 86: Método diferencial aplicado a dos antenas.-

16.7 ANEXO: COORDENADAS REPLANTEADAS

Véase a continuación en la tabla 38, las coordenadas de los puntos replanteados, con GPS en la zona de vuelo. Los mismos corresponden tanto a los puntos de control como de testeo.

Nº de punto	X	Y	Descripción
1	591468.984	6150385.423	TEST
2	591486.155	6150383.251	TEST
3	591520.079	6150380.780	TEST
4	591544.513	6150367.885	TEST
5	591556.551	6150386.002	TEST
6	591536.714	6150394.636	TEST
7	591512.058	6150392.857	TEST
8	591498.465	6150399.295	TEST
9	591480.366	6150406.511	TEST
10	591498.715	6150412.626	TEST
11	591512.451	6150410.247	TEST
12	591523.176	6150400.783	TEST
13	591530.705	6150412.811	TEST
14	591490.466	6150422.748	TEST
15	591482.823	6150432.407	TEST
16	591501.516	6150429.908	TEST
17	591514.011	6150429.557	TEST
18	591527.095	6150426.812	TEST
19	591540.845	6150428.396	TEST
20	591560.187	6150423.112	TEST
21	591493.718	6150440.060	TEST
22	591493.401	6150454.568	TEST
23	591505.590	6150453.750	TEST
24	591514.124	6150443.319	TEST
25	591527.009	6150445.761	TEST
26	591539.645	6150443.028	TEST
27	591547.771	6150446.363	TEST
28	591546.877	6150454.005	TEST
29	591523.954	6150459.454	TEST
30	591512.013	6150465.434	TEST
31	591497.249	6150469.472	TEST
32	591497.021	6150487.248	TEST
33	591507.584	6150477.330	TEST
34	591537.378	6150464.434	TEST
35	591561.398	6150461.071	TEST
36	591580.591	6150461.066	TEST
37	591547.023	6150472.833	TEST
38	591529.743	6150479.533	TEST
39	591518.634	6150483.417	TEST
40	591508.377	6150491.943	TEST
41	591518.580	6150495.560	TEST
42	591540.357	6150501.319	TEST
43	591558.038	6150496.275	TEST

Nº de punto	X	Y	Descripción
44	591576.924	6150496.195	TEST
45	591581.910	6150478.781	TEST
46	591507.625	6150515.358	TEST
100	591505.707	6150510.848	C
101	591505.707	6150436.561	C
102	591472.909	6150390.243	C
103	591552.157	6150366.405	C
104	591552.157	6150432.295	C
105	591586.858	6150489.642	C
400	591475.265	6150413.721	C
401	591492.452	6150446.094	C
402	591495.402	6150482.580	C
403	591548.604	6150475.891	C
404	591532.606	6150436.323	C
405	591527.745	6150393.091	C

Tabla 37: Planilla de coordenadas replanteadas-

Donde:

- TEST: Corresponde a los puntos de testeo.
- A: Corresponde a los puntos de control.

16.8 ANEXO: TRATAMIENTO DE DATOS TOPOGRÁFICOS

16.8.1 Relevamiento planimétrico.

A continuación se presentan en las columnas X_{est} e Y_{est} , los datos crudos relevados con estación total. En las columnas X_{def} e Y_{def} se muestran las coordenadas definitivas calculadas.

Punto N°	ID_est	X_{est} (m)	Y_{est} (m)	X_{def} (m)	Y_{def} (m)	Observaciones
102	1	57,449	108,308	57,449	108,307	
	2	57,448	108,306			
1	3	54,376	103,371	54,376	103,372	
	4	54,376	103,374			
2	5	71,412	103,273	71,412	103,274	
	6	71,413	103,274			
	R1	97,324	79,389			Relevamiento inicial de la red
	R2	108,604	133,336			Relevamiento inicial de la red
	R4	114,720	184,439			Relevamiento inicial de la red
	R3	138,443	166,296			Relevamiento inicial de la red
	R6	175,544	205,599			Relevamiento inicial de la red
	R5	118,006	218,516			Relevamiento inicial de la red
	R7	77,121	228,828			Relevamiento inicial de la red
	R8	53,765	106,941			Relevamiento inicial de la red
100	7	72,737	232,646	72,739	232,647	
	8	72,740	232,647			
46	9	73,890	237,180	73,887	237,180	
	10	73,884	237,180			
42	11	107,880	227,933	107,881	227,933	
	12	107,882	227,933			
43	13	126,435	225,625	126,416	225,612278	
	14	126,428	225,625			
	15	126,442	225,621			
	16	126,429	225,626			
7	17	96,152	116,842	96,151	116,842	
	18	96,150	116,842			
3	19	105,401	105,862	105,401	105,862	
	20	105,401	105,862			
6	21	119,924	121,980	119,923	121,980	
	22	119,922	121,979			
4	23	131,541	96,614	131,542	96,615	Descartado
	24	131,541	96,621			
	25	131,543	96,615			
103	26	139,225	96,149	139,225	96,148	
	27	139,225	96,147			
	28	97,322	79,389			Verificación R1
405	29	111,372	119,126	111,371	119,126	
	30	111,371	119,126			
12	31	105,403	126,743	105,403	126,743	
	32	105,402	126,743			
13	33	112,159	138,982	112,159	138,982	
	34	112,159	138,982			

Punto N°	ID_est	X_est (m)	Y_est (m)	X_def (m)	Y_def (m)	Observaciones
19	35	119,255	155,952	119,253	155,954	
	36	119,251	155,956			
	37	119,253	155,955			
18	38	106,037	151,971	106,036	151,971	
	39	106,036	151,971			
25	40	103,092	171,128	103,091	171,128	
	41	103,090	171,128			
404	42	109,863	162,702	109,862	162,702	
	43	109,861	162,702			
26	44	115,923	170,202	115,921	170,202	
	45	115,918	170,203			
	46	115,923	170,202			
27	47	123,472	174,671	123,472	174,671	
	48	123,471	174,671			
28	49	121,650	182,228	121,651	182,228	
	50	121,652	182,228			
104	51	129,860	161,365	129,858	161,366	
	52	129,855	161,368			
	53	129,860	161,365			
20	54	139,144	153,591	139,143	153,592	
	55	139,142	153,593			
36	56	153,804	193,861	153,803	193,862	
	57	153,802	193,863			
35	58	134,920	191,246	134,919	191,246	
	59	134,918	191,246			
37	60	119,055	200,825	119,054	200,825	
	61	119,053	200,824			
403	62	120,162	203,953	120,165	203,953	
	63	120,165	203,955			
	64	120,169	203,953			
	65	120,164	203,952			
34	66	110,154	191,156			
	67	118,015	218,514			Verificación R5
	68	118,016	218,516			Verificación R6
43	69	126,417	225,612	126,417	225,612	
	70	126,417	225,613			
44	71	145,079	228,251	145,079	228,251	
	72	145,079	228,251			
105	73	155,705	222,999	155,705	222,999	
	74	155,705	222,999			
45	75	156,168	213,330	156,168	213,333	
	76	156,167	213,335			
	77	156,168	213,333			

Punto N°	ID_est	X_est (m)	Y_est (m)	X_def (m)	Y_def (m)	Observaciones
41	78	87,408	219,298	87,407	219,297	Descartado
	79	87,393	219,302			
	80	87,406	219,297			
5	81	140,862	116,177	140,861	116,175	
	82	140,861	116,173			
	21	102,619	116,963			Verificación R2
400	200	56,429	131,909	56,429	131,910	
	201	56,428	131,910			
9	202	62,468	125,551	62,468	125,550	
	203	62,468	125,549			
8	204	81,444	120,953	81,445	120,952	
	205	81,446	120,951			
10	206	79,773	134,200	79,773	134,200	
	207	79,772	134,200			
14	208	70,185	143,092	70,185	143,094	
	209	70,184	143,096			
11	210	93,698	133,945	93,698	133,945	
	211	93,699	133,945			
17	212	92,366	153,138	92,353	153,141	
	213	92,353	153,141			
	214	92,354	153,140			
16	215	80,078	151,696	80,078	151,697	
	216	80,078	151,698			
15	217	63,348	152,418	63,348	152,418	
	218	63,347	152,418			
21	219	70,820	160,736	70,821	160,737	
	220	70,822	160,738			
401 b	221	80,839	165,024	80,840	165,024	
	222	80,841	165,025			
22	223	68,477	174,975	68,477	174,973	
	224	68,476	174,971			
401	225	68,825	166,540	68,825	166,540	
	226	68,825	166,540			
	227	68,824	166,539			
23	228	80,673	175,942	80,672	175,942	
	229	80,671	175,941			
101	230	83,317	159,037	83,318	159,037	
	231	83,318	159,037			
24	232	90,427	166,688	90,427	166,689	
	233	90,428	166,689			
	234	90,428	166,689			
	235	108,604	133,338			Verificación R2

Punto N°	ID_est	X_est (m)	Y_est (m)	X_def (m)	Y_def (m)	Observaciones
29	236	98,138	184,453	98,137	184,453	
	237	98,136	184,453			
30	238	85,376	188,420	85,375	188,419	
	239	85,374	188,419			
31	240	70,160	190,303	70,159	190,302	
	241	70,158	190,302			
38	242	100,882	204,911	100,881	204,911	
	243	100,880	204,911			
39	244	89,263	207,146	89,262	207,146	
	245	89,262	207,146			
40	246	77,820	214,071	77,816	214,071	Descartado
	247	77,815	214,071			
	248	77,816	214,070			
33	249	79,317	199,492	79,317	199,491	
	250	79,312	199,488			
	251	79,321	199,494			
32	253	67,328	207,882	67,327	207,879	
	254	67,323	207,880			
	255	67,327	207,875			
	256	67,331	207,878			
402	257	66,429	202,949	66,419	202,985	Descartado
	258	66,430	202,952			Descartado
	259	66,420	202,985			
	260	66,416	202,983			
	261	66,415	202,975			Descartado
	262	66,406	202,980			Descartado
	263	66,408	202,975			Descartado
	264	66,422	202,985			
	265	66,415	202,983			
	266	66,422	202,986			
	267	175,544	205,599			Verificación R6
	EST4	114,720	184,439			Estación
	EST2	53,765	106,941			Estación
	EST1	100,000	100,000			Estación
	EST3	122,181	211,863			Estación

Tabla 38: Cálculo de las coordenadas planimétricas definitivas relevadas topográficamente.-

16.8.2 Relevamiento altimétrico

16.8.2.1 Metodología de relevamiento

En líneas generales, el levantamiento de los datos de campo se realizó nivelando en circuitos cerrados interconectados, ver ilustración 87. Para cada tramo la diferencia de lecturas se midió por lo menos dos veces.



Ilustración 87: Circuitos realizados para relevar la cota de los puntos de control y testeo.- ⁽⁹²⁾

16.8.2.2 Datos crudos

En tal oportunidad se obtuvieron los siguientes datos.

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
400	2,548		2,565	
10	1,258	1,028	1,302	1,046
8	1,169	0,724	1,331	0,766
2	1,204	0,446	1,177	0,607
1	1,612	1,638	1,572	1,612
102	1,055	1,932	0,998	1,893
9	1,849	2,429	1,816	2,371
400		2,495		2,469

Tabla 39: Datos relevados en campo - Circuito 1.-

⁽⁹²⁾ Fuente de la imagen base: Google Earth.

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
10	2,174		2,203	
11		1,006		1,035

Tabla 40: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 1 y 2.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
7	1,392		1,417	
11	1,993	2,113	2,008	2,14
12	2,786	1,736	2,789	1,753
6	0,64	0,860	0,746	0,864
405	1,865	1,293	1,879	1,398
3	0,968	1,641	1,091	1,655
7		1,999		2,122

Tabla 41: Datos relevados en campo - Circuito 2.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
400	2,409		2,477	
14		1,204		1,271

Tabla 42: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 1 y 3.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
14	1,763		1,743	
15	1,505	1,524	1,535	1,505
21	1,634	1,577	1,623	1,605
401 b	1,618	1,626	1,608	1,615
22	1,587	1,602	1,576	1,593
23	1,616	1,583	1,634	1,572
24	1,259	1,26	1,194	1,279
101	1,635	1,602	1,614	1,537
17	0,928	0,948	0,956	0,928
16	1,606	1,636	1,656	1,664
14	1,821	1,79	1,814	1,84
401		1,631		1,625

Tabla 43: Datos relevados en campo - Circuito 3.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
41	2,371		2,388	
40		3,604		3,622

Tabla 44: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 3 y 4.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	<i>L_at (m)</i>	<i>L_ad (m)</i>	<i>L_at(m)</i>	<i>L_ad (m)</i>
42	1,256		1,198	
41	1,22	2,186	1,324	2,129
100	2,049	1,847	1,993	1,953
46	2,271	1,967	2,29	1,91
42		0,793		0,811

Tabla 45: Datos relevados en campo - Circuito 4.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	<i>L_at (m)</i>	<i>L_ad (m)</i>	<i>L_at(m)</i>	<i>L_ad (m)</i>
23	1,583		1,622	
30		1,56		1,599

Tabla 46: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 3 y 5.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	<i>L_at (m)</i>	<i>L_ad (m)</i>	<i>L_at(m)</i>	<i>L_ad (m)</i>
31	1,62		1,592	
30	1,634	1,611	1,606	1,583
29	1,635	0,828	1,588	0,802
38	0,92	1,376	0,901	1,331
39	0,637	2,069	0,746	2,052
40	0,49	0,842	0,537	0,952
32	2,421	2,376	2,491	2,421
402	2,233	2,451	2,153	2,521
33	2,559	1,054	2,591	0,972
31		1,532		1,564

Tabla 47: Datos relevados en campo - Circuito 5.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	<i>L_at (m)</i>	<i>L_ad (m)</i>	<i>L_at(m)</i>	<i>L_ad (m)</i>
6	0,714		0,724	
13		2,051		2,062

Tabla 48: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 2 y 6.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	<i>L_at (m)</i>	<i>L_ad (m)</i>	<i>L_at(m)</i>	<i>L_ad (m)</i>
104	1,695		1,722	
20	1,169	1,324	1,213	1,349
13	2,217	2,172	2,206	2,217
18	2,782	2,717	2,748	2,706
404	2,743	2,884	2,771	2,849
19	1,961	1,933	1,752	1,961
104		1,537		1,326

Tabla 49: Datos relevados en campo - Circuito 6.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
5	2,609		2,564	
6		2,27		2,223

Tabla 50: Datos relevados en campo - Enlace entre circuitos 2 y 7.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
5	2,556		2,489	
4	2,066	2,128	2,087	2,059
103	1,629	1,602	1,635	1,623
5		2,52		2,526

Tabla 51: Datos relevados en campo - Circuito 7.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
25	2,808		2,833	
404		2,814		2,839

Tabla 52: Datos c relevados en campo - Enlace entre circuito 6 y 8.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
37	1,677		1,718	
34	2,472	2,531	2,45	2,572
25	2,706	2,413	2,643	2,389
26	1,699	1,76	1,599	1,698
27	1,376	1,677	1,467	1,579
28	1,652	1,498	1,638	1,588
37		1,692		1,676

Tabla 53: Datos relevados en campo - Circuito 8.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
28	1,718		1,708	
35		1,524		1,516

Tabla 54: Datos relevados en campo - Enlace entre circuito 8 y 9.-

PUNTO	PRIMERA LECTURA		SEGUNDA LECTURA	
	$L_{at} (m)$	$L_{ad} (m)$	$L_{at}(m)$	$L_{ad} (m)$
403	1,809		1,833	
35	1,882	1,602	1,946	1,626
36	1,524	1,188	1,568	1,25
45	1,463	2,035	1,463	2,079
105	1,58	1,579	1,555	1,58
44	1,627	1,743	1,638	1,718
403		1,722		1,731

Tabla 55: Datos relevados en campo - Circuito 9.-

16.8.2.3 Tratamiento de los datos

16.8.2.3.1 Tratamiento de los datos - cálculo

A continuación se presentan los valores obtenidos.

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
400	2,557		12,557	10,000
10	1,28	1,037	12,800	11,520
8	1,25	0,745	13,305	12,055
2	1,191	0,527	13,969	12,778
1	1,592	1,625	13,936	12,344
102	1,027	1,913	13,050	12,023
9	1,833	2,4	12,482	10,650
400		2,482		10,000
SUMA (m)	10,728	10,728		
ERROR DE CIERRE (m)	0			

Tabla 56: Cálculo de cotas - Circuito 1.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
10	2,1885		13,708	11,520
11		1,0205		12,688

Tabla 57: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 1 y 2.-

Circuito 2

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
7	1,405		14,814	13,410
11	2,001	2,127	14,688	12,688
12	2,788	1,745	15,731	12,944
6	0,693	0,862	15,562	14,869
405	1,872	1,346	16,0885	14,217
3	1,030	1,648	15,47	14,441
7		2,061		13,410
SUMA (m)	9,787	9,787		
ERROR DE CIERRE (m)	0			

Tabla 58: Cálculo de cotas - Circuito 2.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
400	2,443		12,443	10,000
14		1,2375		11,206

Tabla 59: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 1 y 3.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$		
14	1,753		1,753		12,958	11,206
15	1,520	1,515	1,520	1,515	12,964	11,444
21	1,629	1,591	1,628	1,591	13,001	11,373
401 b	1,613	1,621	1,613	1,621	12,993	11,380
22	1,582	1,598	1,581	1,598	12,977	11,396
23	1,625	1,578	1,625	1,578	13,024	11,400
24	1,227	1,270	1,226	1,270	12,981	11,755
101	1,625	1,570	1,624	1,570	13,036	11,412
17	0,942	0,938	0,942	0,938	13,040	12,098
16	1,631	1,650	1,631	1,650	13,021	11,390
14	1,818	1,815	1,817	1,815	13,023	11,206
401		1,628		1,628	11,395	11,395
SUMA (m)	15,145	15,143				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,002					

Tabla 60: Cálculo de cotas - Circuito 3.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$		
41	2,380		14,739	12,360
40		3,613		11,126

Tabla 61: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 3 y 4.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$		
42	1,256		1,255	0,000	14,546	13,290
41	1,22	2,186	1,219	2,186	13,579	12,360
100	2,049	1,847	2,048	1,847	13,780	11,732
46	2,271	1,967	2,270	1,967	14,083	11,813
42		0,793		0,793	13,290	13,290
SUMA (m)	6,796	6,793				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,003					

Tabla 62: Cálculo de cotas - Circuito 4.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	$L_{ad}(m)$		
23	1,6025		13,002	11,3995
30		1,5795		11,4225

Tabla 63: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 3 y 5.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
31	1,606		1,6051	0,0000	13,0195	11,4144
30	1,62	1,597	1,6191	1,5970	13,0416	11,4225
29	1,6115	0,815	1,6106	0,8150	13,8371	12,2266
38	0,9105	1,3535	0,9096	1,3535	13,3932	12,4836
39	0,6915	2,0605	0,6906	2,0605	12,0232	11,3327
40	0,5135	0,897	0,5126	0,8970	11,6388	11,1262
32	2,456	2,3985	2,4551	2,3985	11,6953	9,2403
402	2,193	2,486	2,1921	2,4860	11,4014	9,2093
33	2,575	1,013	2,5741	1,0130	12,9624	10,3884
31		1,548		1,5480	11,4144	11,4144
SUMA (m)	14,177	14,1685				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,0085					

Tabla 64: Cálculo de cotas - Circuito 5.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
6	0,719		15,588	14,869
13		2,0565		13,532

Tabla 65: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 2 y 6.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
104	1,709		1,708		15,872	14,164
20	1,191	1,337	1,191	1,337	15,726	14,535
13	2,212	2,195	2,211	2,195	15,743	13,532
18	2,765	2,712	2,765	2,712	15,796	13,031
404	2,757	2,867	2,757	2,867	15,686	12,929
19	1,857	1,947	1,856	1,947	15,595	13,739
104		1,432		1,432	14,164	14,164
SUMA (m)	12,490	12,488				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,002					

Tabla 66: Cálculo de cotas - Circuito 6.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
5	2,5865		17,1155	14,529
6		2,2465		14,869

Tabla 67: Cálculo de cotas - Enlace entre circuitos 2 y 7.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
5	2,523		2,522		17,051	14,529
4	2,077	2,094	2,076	2,094	17,033	14,957
103	1,632	1,613	1,631	1,613	17,052	15,421
5	0,000	2,523		2,523	14,529	14,529
SUMA (m)	6,231	6,229				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,002					

Tabla 68: Cálculo de cotas - Circuito 7.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
25	2,821		15,756	12,935
404		2,827		12,929

Tabla 69: Cálculo de cotas - Enlace entre circuito 6 y 8.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
37	1,698		1,696		15,429	13,733
34	2,461	2,552	2,459	2,552	15,336	12,877
25	2,675	2,401	2,673	2,401	15,608	12,935
26	1,649	1,729	1,647	1,729	15,526	13,879
27	1,422	1,628	1,420	1,628	15,317	13,898
28	1,645	1,543	1,643	1,543	15,417	13,774
37		1,684		1,684		13,733
SUMA (m)	11,549	11,537				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,012					

Tabla 70: Cálculo de cotas - Circuito 8.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
28	1,713		13,233	11,520
35		1,52		11,713

Tabla 71: Cálculo de cotas - Enlace entre circuitos 8 y 9.-

PUNTO	LECTURA PROMEDIO		LECTURA CORREGIDA		COTA DEL PLANO COLIMADOR (m)	COTA (m)
	L_{at} (m)	L_{ad} (m)	L_{at} (m)	L_{ad} (m)		
403	1,821		1,818		13,327	11,508
35	1,914	1,614	1,911	1,614	13,624	11,713
36	1,546	1,219	1,543	1,219	13,948	12,405
45	1,463	2,057	1,460	2,057	13,351	11,891
105	1,568	1,580	1,565	1,580	13,336	11,771
44	1,633	1,731	1,630	1,731	13,235	11,605
403		1,727		1,727		11,508
SUMA (m)	9,944	9,927				
ERROR DE CIERRE (m)	-0,018					

Tabla 72: Cálculo de cotas - Circuito 9.-

16.9 ANEXO: COORDENADAS DEFINITIVAS RELEVADAS TOPOGRÁFICAMENTE

<i>Nº de punto</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Z (m)</i>
1	54,376	103,372	12,344
2	71,412	103,274	12,778
3	105,401	105,862	14,441
4	131,542	96,615	14,957
5	140,861	116,175	14,529
6	119,923	121,980	14,869
7	96,151	116,842	13,410
8	81,445	120,952	12,055
9	62,468	125,550	10,650
10	79,773	134,200	11,520
11	93,698	133,945	12,688
12	105,403	126,743	12,944
13	112,159	138,982	13,532
14	70,185	143,094	11,206
15	63,348	152,418	11,444
16	80,078	151,697	11,390
17	92,353	153,141	12,098
18	106,036	151,971	13,031
19	119,253	155,954	13,739
20	139,143	153,592	14,535
21	70,821	160,737	11,373
22	68,477	174,973	11,396
23	80,672	175,942	11,400
24	90,427	166,689	11,755
25	103,091	171,128	12,935
26	115,921	170,202	13,879
27	123,472	174,671	13,898
28	121,651	182,228	13,774
29	98,137	184,453	12,227
30	85,375	188,419	11,423
31	70,159	190,302	11,414
32	67,327	207,879	9,240
33	79,317	199,491	10,388
34	114,084	204,835	12,877
35	134,919	191,246	11,713
36	153,803	193,862	12,405
37	119,054	200,825	13,733
38	100,881	204,911	12,484
39	89,262	207,146	11,333
40	77,816	214,071	11,126
41	87,407	219,297	12,363
42	107,881	227,933	13,293

<i>Nº de punto</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Z (m)</i>
43	126,417	225,612	- ⁹³
44	145,079	228,251	11,605
45	156,168	213,333	11,891
46	73,887	237,180	11,816
100	72,739	232,647	11,735
101	83,318	159,037	11,412
102	57,449	108,307	12,023
103	139,225	96,148	15,421
104	129,858	161,366	14,164
105	155,705	222,999	11,771
400	56,429	131,910	10,000
401	80,840	165,024	11,395
402	66,419	202,985	9,209
403	120,165	203,953	11,508
404	109,862	162,702	12,929
405	111,371	119,126	14,217
401 b	68,825	166,540	11,380

Tabla 73: Coordenadas definitivas del relevamiento topográfico.-

⁽⁹³⁾ No fue posible calcular la coordenada Z del punto 43.

16.10 ANEXO: PROCEDIMIENTO DE RESTITUCIÓN LPS- ERDAS

16.10.1 Resumen

El procedimiento que dio lugar a la extracción de coordenadas tridimensionales de los puntos relevados fotogramétricamente se sintetiza en los siguientes ítems:

1. Crear un nuevo archivo, configurando:
 - Tipo de cámara.
 - El sistema de referencia/proyección de los puntos de control.
 - El sistema de referencia (tridimensional) de las imágenes.
2. Cargar las imágenes.
3. Realizar la orientación interior:
 - Ingresando los parámetros del certificado de calibración.
 - Indicando la posición de las marcas fiduciales.
4. Utilizar la herramienta de medición de puntos para:
 - Generar puntos de control.
 - Cargar archivo de coordenadas de los puntos de control.
 - Identificar la posición de los puntos de control.
 - Generar puntos de enlace
 - De forma manual.
 - De forma automática.
5. Correr la triangulación.
6. Extracción de coordenadas de los puntos de control.

16.10.2 Desarrollo

A continuación se presenta el paso a paso ejecutado en el software, mostrándose las capturas de pantalla asociadas a cada etapa.⁽⁹⁴⁾

16.10.2.1 Crear un nuevo archivo

- Abrir el complemento LPS del programa ERDAS IMAGINE 2013.



Ilustración 88: Pantalla inicial de la aplicación LPS.-

⁽⁹⁴⁾ Todas las imágenes que en este anexo se presentan son capturas de pantalla del software ERDAS IMAGINE 2013.

- Crear un nuevo proyecto: “File/New”
- Definir el nombre del archivo (*block file*: “.blk”) y su ubicación.

Es recomendable no dejar espacios, ni utilizar tildes en el nombre del archivo.

Automáticamente se despliegan 3 ventanas, en las cuales hay que ingresar información asociada al proyecto.

Es importante dejar en claro que la configuración de estas tres ventanas se configura al comienzo del proyecto y no puede modificarse en instancias posteriormente.

1. Tipo de cámara: Se puede seleccionar cuatro opciones.
 - a. “Frame Camera” – Cámara métrica: Este tipo de sensor se utiliza en los casos en los cuales se cuenta con un certificado de calibración completo, es decir, para aquellos sensores en los cuales se conoce: La distancia focal, las coordenadas del punto principal, las distracciones de los lentes y las coordenadas de las marcas fiduciales.
 - b. “Digital Camera”- Cámara digital: Son sensores considerados no métricos, en este caso se conoce menos información de la configuración geométrica del aparato. Cuando se utiliza este sensor se tiene el dato de la distancia focal y el tamaño del sensor.
 - c. “Video Camera” – Cámara de video: Corresponde aquellos sensores cuyo fin es generar videos, pero que también se pueden obtener imágenes. Al igual que en el caso anterior, solo se conoce la distancia focal y el tamaño del sensor.
 - d. “Non-Metric Camera” – Cámara no métrica: Se considera una cámara no métrica a aquella que no ha sido calibrada en un laboratorio para definir su geometría interna. Para utilizar este sensor se debe conocer de forma aproximada la distancia focal.

Es importante remarcar que no es posible utilizar varios tipos de sensores en un mismo proyecto, por lo tanto todas las imágenes cargadas en el proyecto deben ser capturadas con la misma cámara.

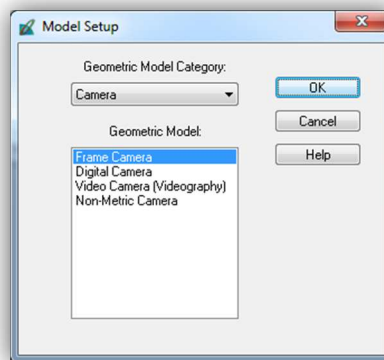


Ilustración 89: Ventana de selección de tipo de cámara.-

Para el caso de estudio se utilizó el sensor “Frame Camera” (cámara métrica) debido a que se contaba con un certificado de calibración realizado en laboratorio. Este fue proporcionado por la empresa UAV-Agrimensura Birriel& González.

2. Sistema de referencia: Se configura el sistema de referencia y el tipo de proyección aplicada en el bloque de trabajo. Este sistema será el que luego de la restitución tendrá las coordenadas del modelo. Se puede establecer un sistema de referencia determinado o en caso contrario uno arbitrario/local. Para el presente proyecto se

configura un sistema local, dado que las coordenadas tanto de los puntos de control como de los puntos de testeo fueron medidos con estación local en un sistema arbitrario.

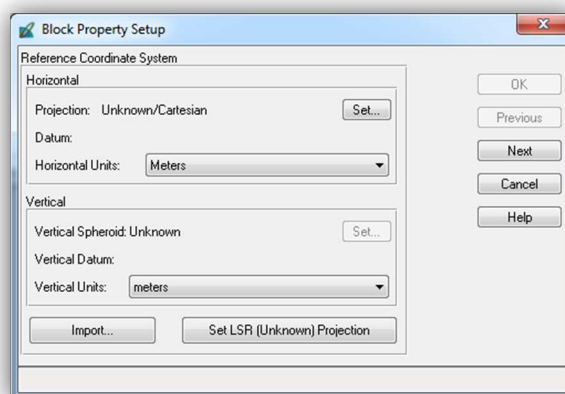


Ilustración 90: Ventana de selección del sistema de referencia.-

3. Propiedades del bloque de imágenes: Aquí se configuran los ángulos de rotación adecuados para el sensor que se utiliza: Omega, phi y kappa. Estos son tres ángulos que definen la orientación del sensor, es decir definen la relación entre el eje del sistema de coordenada terreno y el sistema imagen.

Es importante en esta etapa definir una altura promedio de vuelo o lo que es lo mismo, la altura de toma de la imagen. Dicha altura es utilizada para calcular una primera aproximación en la orientación exterior.

También se configura las unidades de las magnitudes angulares y la dirección del eje z.

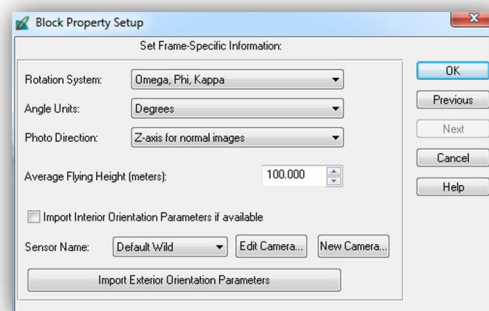


Ilustración 91: Pantalla de configuración de las propiedades de bloque de imágenes.-

Clicando en *new camera* es posible ingresar los parámetros de la cámara, según lo establecido en el certificado de calibración.

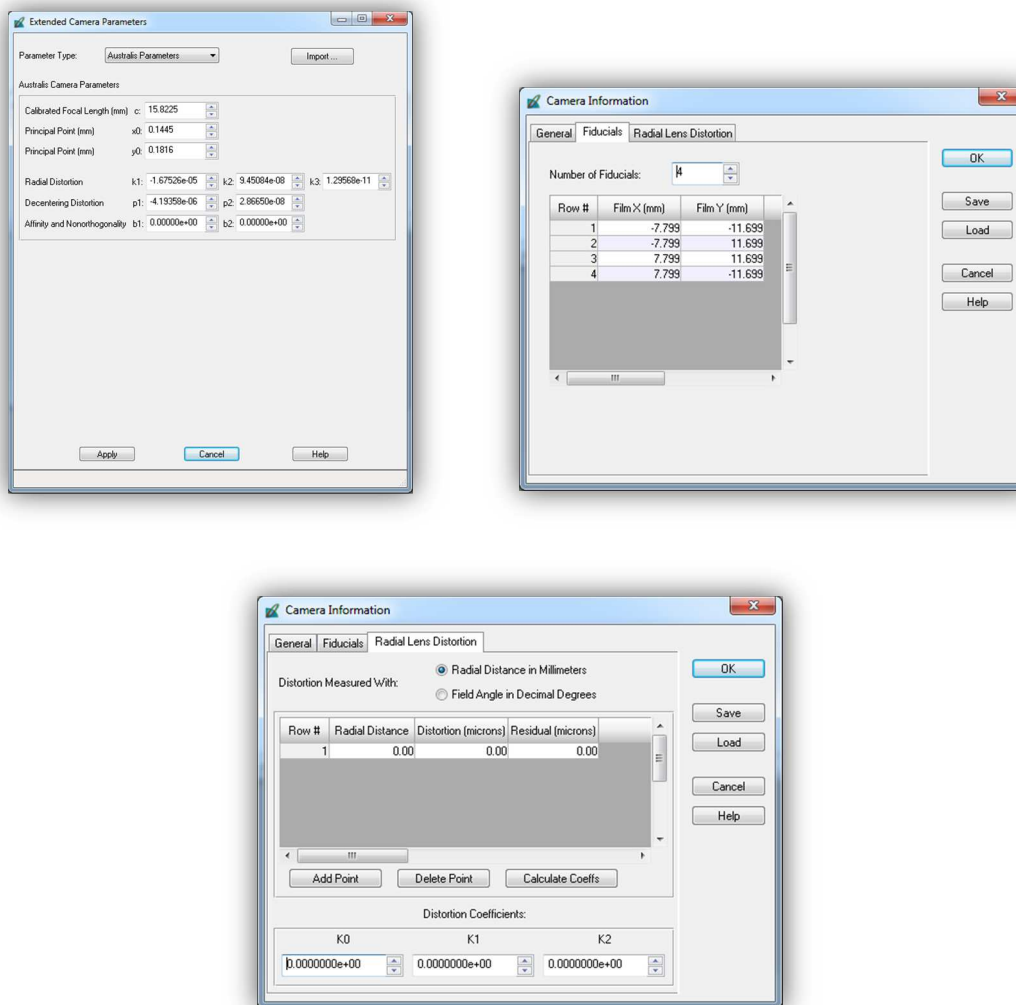


Ilustración 92: Pantallas de configuración de la cámara.-

16.10.2.2 Cargar las imágenes

Luego de realizado la configuración del proyecto se procede a cargar las imágenes del mismo.

Previamente el grupo se vio obligado a realizar una rotación a las imágenes tomadas, para que las mismas estén orientadas según la dirección de vuelo del drone. Para ello se utilizó en software ERDAS IMAGINE 2013 la herramienta *“Transform & Ortho”* (*“Raster / Multispectral / Transform & Ortho / Perform Affine Resample / Rotation angle = 90°”*), de esta forma se logra una rotación de 90° en sentido anti horario con origen en el pixel central de la imagen.

Una vez rotadas las imágenes se procede a cargarlas en el proyecto, según el orden establecido en el fotoíndice. En la pantalla principal se puede visualizar las imágenes cargadas.

Luego de cargadas las imágenes, se crean las capas de piramidación de las imágenes, creando un nuevo archivo con extensión *.rrd externa para cada imagen. Las capas piramidales se utilizan para facilitar y optimizar la visualización de las mismas al hacerle zoom, paneas e iteraciones, y son fundamentales a la hora de re ejecutar la búsqueda automática de puntos homólogos. El LPS crea las pirámides aplicando un algoritmo de interpolación binomial. Para realizar esta acción la ruta a seguir es *“Edit – Compute Pyramid Layer...”*. A continuación se despliega una ventana, en el cual la opción a seleccionar es *“All Images Without Pyramids”*

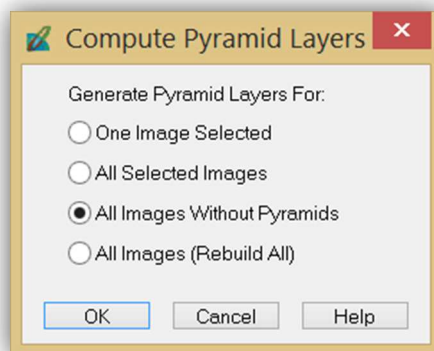


Ilustración 93: Ventana de configuración de Capas Piramidales.-

Luego de finalizado el proceso, en la parte inferior de la ventana interactiva se visualizan las imágenes cargadas y en la celda correspondiente a “Pyr.” se visualiza un color verde, indicando que el proceso de piramidación se realizó con éxito.

Row #	Image ID	Description	Image Name	Active	Pyr	Int	Ext	DTM	Ortho	Online
1	1		users\ingenieria\desk.top\proyecto setenbas\imagenes_rotadas\1r	✓	green	red	red	red	red	green
2	2		users\ingenieria\desk.top\proyecto setenbas\imagenes_rotadas\2r	✓	green	red	red	red	red	green
3	3		users\ingenieria\desk.top\proyecto setenbas\imagenes_rotadas\3r	✓	green	red	red	red	red	green
4	4		users\ingenieria\desk.top\proyecto setenbas\imagenes_rotadas\4r	✓	green	red	red	red	red	green

Ilustración 94: Proceso de piramidación finalizado.-

16.10.2.3 Orientación interior

Aquí es donde se especifican los elementos necesarios que el software pueda generar las condiciones geométricas de la cámara al momento de la toma. Para ello se debe acceder a la ventana “Frame editor” (“Edit” / “Frame Editor...”). En esta ventana se visualizan tres solapas:

1. “Sensor”: por defecto el sensor es definido en pantallas anteriores. Si se quiere ver la configuración antes ingresada se presiona sobre la opción “Edit camera”.

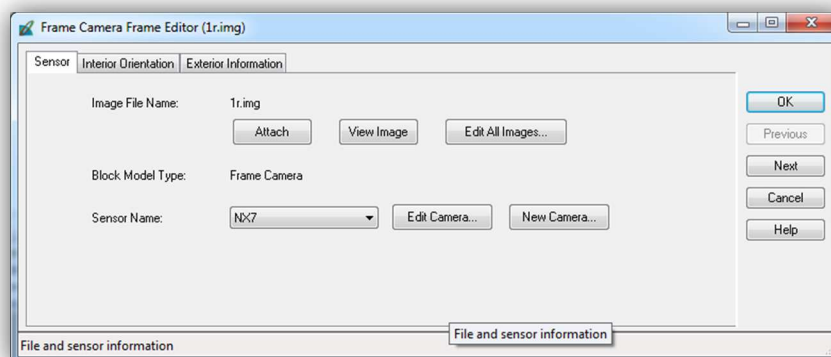


Ilustración 95: Ventana de configuración del sensor.-

2. “Interior Orientation” - Orientación interior: En esta etapa se miden las marcas de referencia en la imagen y se comparan con las coordenadas ingresadas del certificado de calibración, de esta forma se realiza una transformación afín en dos dimensiones que se utiliza para determinar el origen de coordenadas foto. Para ellos se presiona sobre el botón “Open/Close viewer for fiducial measurement”, en el cual se puede visualizar las imágenes y de esa forma indicar la ubicación de cada pixel correspondiente a una determinada marca fiducial.

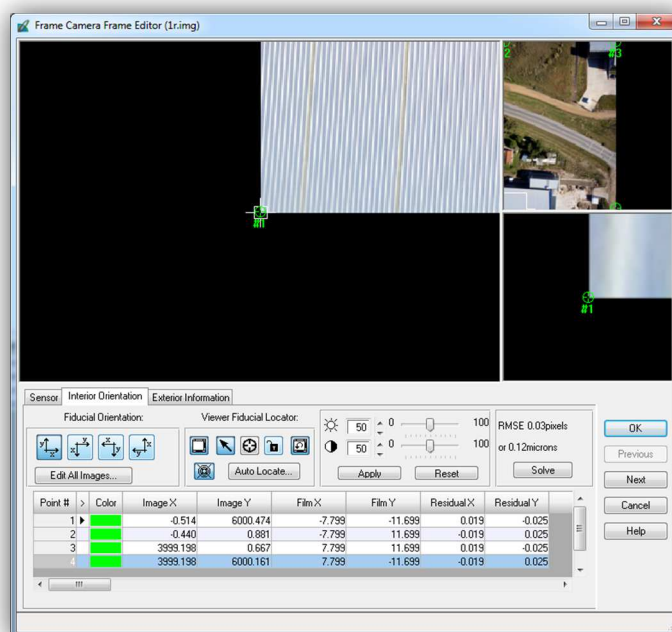


Ilustración 96: Determinación de las marcas fiduciales.-

El programa permite seleccionar la orientación de los ejes del sistema imagen, dando las cuatro opciones que se muestran a continuación:

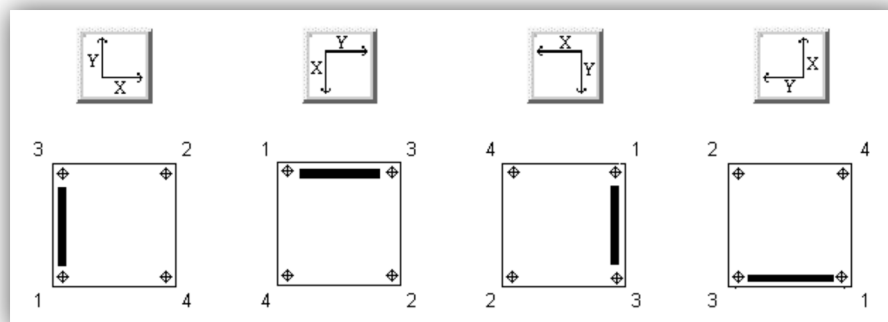


Ilustración 97: Opciones de sistemas de coordenadas imagen.-

3. “Exterior Information” - Información exterior: Aquí el software permite especificar los parámetros de orientación externa de la cámara, reconstruyendo la posición de la misma en el momento de toma. Para el proyecto no se tuvieron en cuenta estos los parámetros, por lo que se indicó $(X_o, Y_o, Z_o) = (0,0,0)$ en estado desconocido (Unknown) para todas las imágenes.

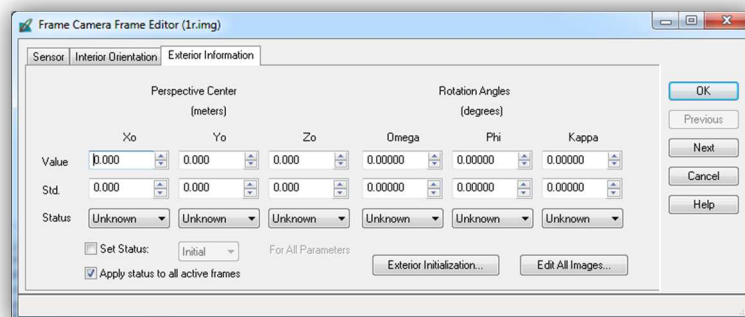


Ilustración 98: Ventana de configuración de orientación exterior.-

Una vez aceptada la configuración para todas las imágenes, en la pantalla inicial puede verse que la orientación interior se ha realizado con éxito.

Point ID	Image ID	Description	Image Name	Active	Pys	Int	Ext	DTM	Ortho	Online
1	1		c:\Users\Ingenieria\Desktop\proyecto\refrenda\imagenes_schadus\1r	✓						
2	2		c:\Users\Ingenieria\Desktop\proyecto\refrenda\imagenes_schadus\2r	✓						
3	3		c:\Users\Ingenieria\Desktop\proyecto\refrenda\imagenes_schadus\3r	✓						
4	4		c:\Users\Ingenieria\Desktop\proyecto\refrenda\imagenes_schadus\4r	✓						

Ilustración 99: Proceso de orientación interior finalizado.-

16.10.2.4 Medición y generación de puntos

La herramienta de medición de puntos (*Point measurement tool*), permite crear, medir, modificar y calcular los puntos de control.

El programa proporciona dos tipos de vista para utilizar esta herramienta, una de visión clásica y otra visión estéreo. Para el grupo fue mejor utilizar la visión clásica, debido a que la pantalla interactiva en este caso es más intuitiva.

Es importante destacar que esta visión no proporciona capacidad de edición en tres dimensiones, igualmente las tareas realizadas en la ventana de *Medición de puntos* no requirieron análisis tridimensional.

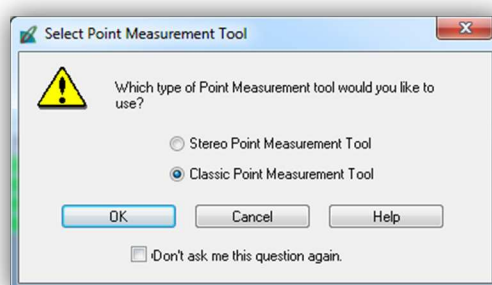


Ilustración 100: Opciones de visualización de la herramienta Point Mensurament Tool.-

Tanto la vista estéreo como la clásica contienen tres ventanas por imagen. La ventana de vista general proporciona una vista de toda la imagen. Un cursor de enlace vincula dicha vista con la vista principal, donde se amplía la parte de adentro de la caja de enlace. Del mismo modo, un cursor de enlace en la vista principal vincula esta con la vista de detalle, donde la imagen se amplía aún más. El cursor de enlace puede cambiar de tamaño provocando un cambio en el área

de visualización, así como también cambiar su ubicación viéndose otro sector de la imagen en la ventana correspondiente.

Esta triple visualización ayuda a encontrar el punto deseado de forma más eficiente, así como también marcar el pixel correspondiente a la coordenada ingresada de forma más precisa.



Ilustración 101: Visualización del cursor.-

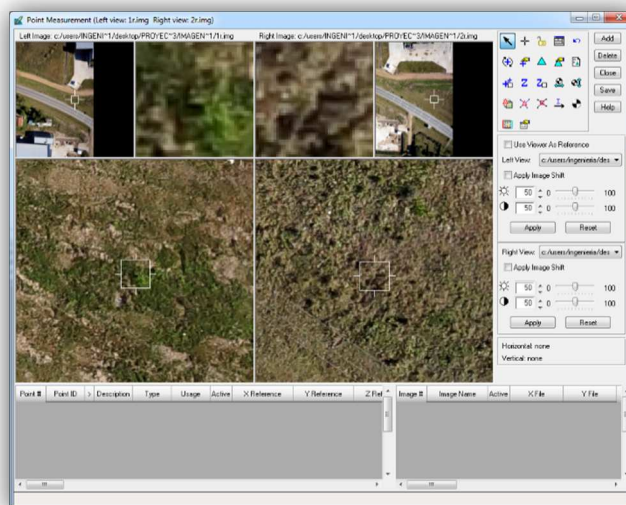


Ilustración 102: Ventana interactiva de medición de puntos – Visualización clásica.-

16.10.2.4.1 Puntos de control

Para indicarle al software la ubicación de los puntos de control solo basta realizar tres pasos.

1. Importar un archivo ASCII, con las coordenadas terreno de los puntos de control.

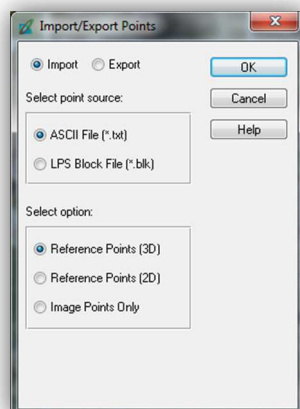


Ilustración 103: Ventana de importación de coordenadas.-

Definiendo los campos correspondientes al archivo ASCII a importar.

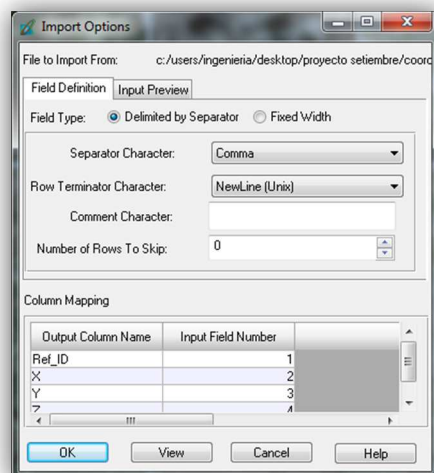


Ilustración 104: Identificación de campos incluidos en archivo ASCII.-

Finalizada esta operación, es posible observar las coordenadas (X,Y,Z) cargadas en la parte inferior izquierda de la venta.

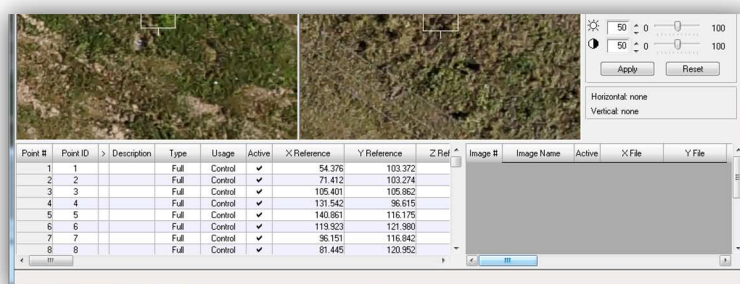


Ilustración 105: Visualización de las coordenadas de los puntos de control.-

2. Ubicar en las imágenes los puntos de control.

Para ello es necesario tener seleccionada la fila correspondiente al punto cuya posición se va a identificar, en la tabla inferior izquierda. La fila seleccionada es aquella en la cual en la tercera columna aparece el símbolo ">".

Una vez indicado el punto se procede a localizar el mismo utilizando la vista general, ubicado el cursor en el lugar aproximado, se busca en la pantalla principal con más detalla la ubicación del mismo, una vez encontrado se colora el cursor sobre ella de forma tal que en la vista de detalle pueda visualizarse el punto. Luego se identifica el pixel que corresponde a dicha coordenada.



Ilustración 106: Medición de un punto.-

3. Indicar al software que el punto ubicado corresponde a un punto de control, “Usage: Control” y se procede a medir el mismo. Obsérvese como en la parte inferior a la derecha de la pantalla aparece la medición del punto y en qué imágenes se encuentra.

Point #	Point ID	Description	Type	Usage	Active	X Reference	Y Reference	Z Reference	Image #	Image Name	Active	X File	Y File
54	401		Full	Check	✓	80.840	165.024		1	2r	✓	2504.909	792.423
55	402		Full	Check	✓	66.419	202.985		2	3r	✓	1192.675	1010.625
56	403		Full	Check	✓	120.165	203.953						
57	404		Full	Check	✓	103.662	162.702						
58	405		Full	Check	✓	111.371	119.126						
59	406	401b	Full	Check	✓	68.825	166.540						

Ilustración 107: Identificación del punto medido.-

16.10.2.4.2 Puntos de enlace

Para agregar puntos de enlace u homólogos, el software permite dos alternativas:

1. Agregar puntos de enlace de forma manual.
 - Clicando en el botón “Add”, se agrega un nuevo punto (este no tiene coordenadas (X, Y, Z) en el sistema tridimensional definitivo).
 - Se identifica la posición de cada uno de los puntos agregados, habiendo seleccionado previamente la fila correspondiente.
 - Debe definirse el uso del punto como “Tie”.
2. Puntos de enlace generados de forma automática

Es necesario clicar en “Automatic tie properties”, a continuación se abre una ventana el cual tiene tres pestañas que deben ser configuradas:

- “General”: Aquí se configura
 - “Images Used”: Que imágenes tener en cuenta (todas o algunas),
 - “Initial Type”: La tipología del punto a generar, en nuestro caso “Tie”

- “Image Layer Used for Computation”: La capa a ser utilizada: en los casos en los que la imagen cuente con más de una capa, por ejemplo: color, imagen Multiespectral, etc. En nuestro caso solo se tiene una capa, por lo que se introduce un “1”.
- “Existing Point Transfer”: Puede utilizarse esta opción cuando se desee transferir puntos de enlace existentes entre las imágenes y las líneas de vuelo.

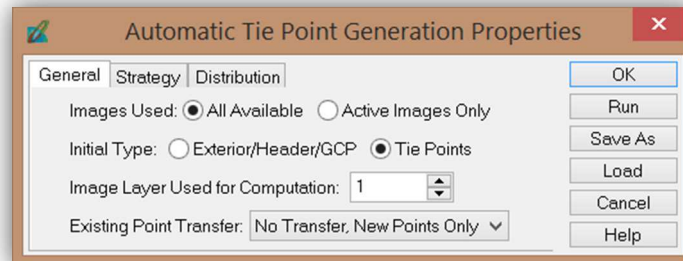


Ilustración 108: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña general.-

- “Strategy” - Estrategia: En esta pestaña se configuran los parámetros de búsqueda de puntos. Los parámetros de la estrategia pueden ser utilizados para optimizar el funcionamiento.
- “Search Size”: Aquí se define el tamaño de la ventana, en pixeles, que se utiliza para buscar los puntos correspondientes. El LPS busca el punto correspondiente dentro de una ventana cuadrada según el tamaño configurado. En nuestro caso se usó el que define por defecto el software “21”, el cual indica que la ventana de búsqueda es de 21×21 , dado la zona de estudio no es un muy plana ni muy escarpada.
- “Correlation Size”: Muestra el tamaño de la ventana en pixeles para la correlación cruzada. Por defecto el LPS configura esta ventana con un tamaño de 7×7 , un tamaño más grande puede generar un coeficiente de correlación más pequeño dado la diferencia geométrica dentro de las dos ventas de correlación, y como consecuencia menos putos iguales, en cambio un tamaño menor podría dar un coeficiente de correlación más grande por la insuficiencia de los contenidos y como consecuencia, más puntos errados. Además el software recomienda este tamaño para el tipo de relieve predominante en la zona de estudio.
- “Least Square Size”: Corresponde al tamaño de la ventana en la que se calcula el ajuste de mínimo cuadrado para la correspondencia de homólogos. Por defecto el LPS está configurado para trabajar con una ventana de 21×21 , un tamañas más pequeño puede reducir la cantidad de homólogos mal encontrados pero podría producir menor cantidad de puntos buenos. Un tamaño mayor podría contener más puntos buenos y malos.
- “Feature Pt Density”: Muestra el porcentaje de densidad de puntos con relación a la densidad por defecto, por ejemplo: Un valor de 300% estipula que LPS recoge automáticamente tres veces el número de puntos que generalmente se acumula, y un valor de 50% significa que el LPS recoge automáticamente 50% menos puntos de lo que recauda normalmente.
- “Coefficient Limit”: Aquí se define el umbral del coeficiente de correlación que se utiliza para determinar si dos puntos son o no homólogos. Cuando el LPS detecta

dos puntos como homólogos calcula el coeficiente de correlación, este valor es comparado con el coeficiente límite, si resulta menor entonces se rechazan los puntos como homólogos. El LPS por defecto fija un umbral de 0.80, un valor mayor puede arrojar mayor precisión, aunque menos puntos, para un valor menos pueden aumentar los puntos aunque se determinan con menor precisión.

- “Initial Accuracy”: Muestra la precisión relativa de los valores iniciales utilizados por el proceso de generación automática de punto de enlace. Este valor puede ser visto como la precisión relativa de la fuente que ha elegido para los valores iniciales. Generalmente, un valor alto aumenta el área de búsqueda inicial de posibles puntos homólogos en la fase inicial de búsqueda. El valor por defecto es 10%.
- “Avoid Shadow”: Esta opción se debe seleccionar cuando la zona posea muchas sombras.

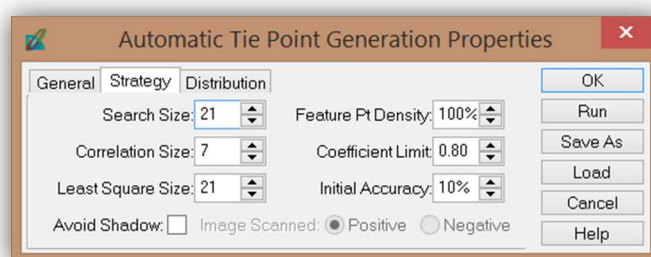


Ilustración 109: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña estrategia.-

- “Distribution”: Aquí se configura la ubicación de los puntos de enlace generados automáticamente.
 - “Find Point”: Se puede elegir entre la distribución que está por defecto en el LPS o realizar la configuración deseada.

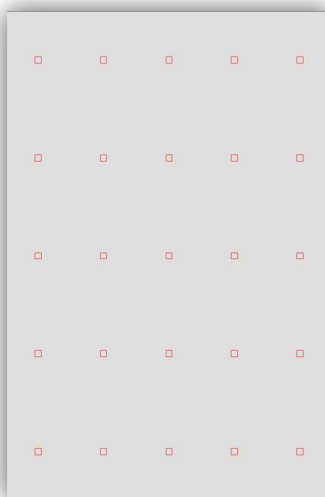


Ilustración 110: Distribución por defecto de las ventanas de búsqueda de puntos de enlace.-

- “Intended Number of Points/Image”: Corresponde a la cantidad de puntos que se quiere que se busquen en cada imagen.

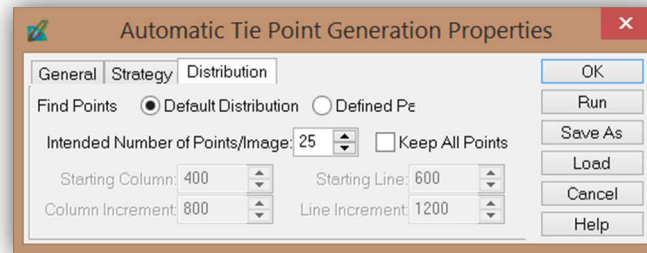


Ilustración 111: Ventana de configuración automática de puntos de enlace – Pestaña distribución.-

16.10.2.5 Aerotriangulación

En esta ventana se configura la ejecución de la aerotriangulación. Recuérdese que la aerotriangulación es una técnica empleada para estimar la orientación externa asociada a cada imagen del proyecto y para determinar las coordenadas terreno de los puntos de enlace.

Una vez identificados al menos tres puntos de control y varios puntos de enlace, se procede a configurar la triangulación, esto se realiza en cinco pestañas:

1. “General”: Aquí se configuran los parámetros básicos de la aerotriangulación
 - a. “Maximum Iteration”: Corresponde al valor máximo de iteraciones máximas que efectúa el software para calcular la aerotriangulación.
 - b. “Compute Value (meters)”: Aquí se especifica el límite, en metros, de la corrección de las coordenadas terreno en cada iteración.

Se considera oportuno aclarar las diferentes situaciones que se puede generar en cuanto a la continuidad o no de las iteraciones:

- El proceso de iteración de detiene cuando se alcanza el nivel de convergencia.
- Si no se logra el límite de convergencia, el proceso se finaliza al culminarse la última iteración determinada, en cuyo caso se compara el valor de las desviaciones estándar de los dos últimos procesos:
 - Si el mismo es menor a un 2%, la triangulación se considera convergente.
 - Si no se considera convergente se debe localizar y corregir los errores que lo provocan, corregirlo y correr nuevamente el proceso.
- c. “Image Coordinate Units for Report”: Aquí se indican las unidades de las coordenadas del reporte de la aerotriangulación.

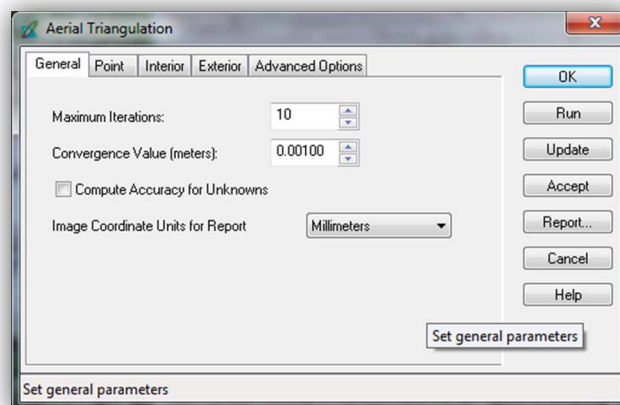


Ilustración 112: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña general.-

2. “Point”: Esta pestaña permite configurar las desviaciones asociadas a las coordenadas imagen y terreno. Es también aquí donde puede se puede asignar distintos pesos de los puntos de control.
 - a. “Image Point Standard Desviation (pixeles)”: Se determina la desviación estándar de las coordenadas de las imágenes (x, y) en pixeles. El valor establecido por defecto es 0.33 para ambas coordenadas.
 - b. “GCP Type and Standard Desviations (X, Y : meters; Z : meters)”: Aquí se ingresan los pesos de los puntos de control. En el caso en estudio, todos los puntos poseen igual peso, por lo que esta función no se utiliza.

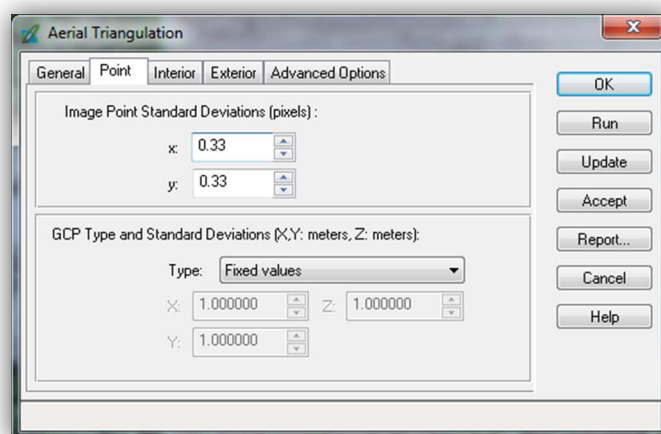


Ilustración 113: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña puntos.-

3. “Interior”: En esta pestaña se establecen las desviaciones estándar de los parámetros de orientación interior.
 - “Type”: Se selecciona el tipo de desviación estándar a aplicar. En este caso se configura como “Fixed for all images”, lo cual significa que no se asigna desviaciones a los parámetros antes ingresados, es decir no se cambian los valores ingresados del certificado de calibración de la cámara.

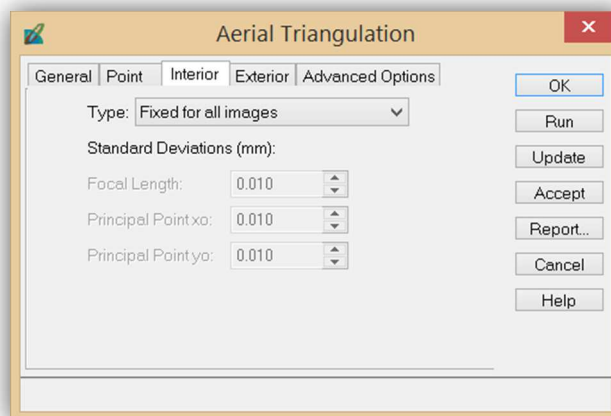


Ilustración 114: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña interior.-

4. “Exterior”: Aquí se permite fijar las desviaciones estándar de los parámetros de orientación exterior.
 - “Type”: Se elige el método a emplearse para asignar las desviaciones estándar. En el presente proyecto se utilizó “No weight”.

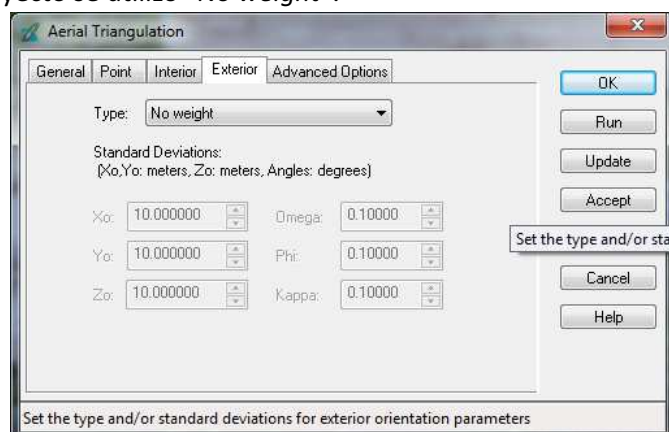


Ilustración 115: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña exterior.-

5. “Advanced Options”: Opciones avanzadas:
 - a. “Additional Parameter Model”: En esta opción se puede seleccionar el modelo de parámetros a ser utilizados en la triangulación para corregir errores sistemáticos en la imagen. Se selecciona “No additional parameters” dado que no se desea introducir ningún modelo.
 - b. “Use Additional Parameters As Weighted Variables”: Se debe seleccionar para utilizar los parámetros adicionales como observaciones pseudo ponderadas, asignándose así un pequeño peso estadístico a cada uno de ellos.
 - c. “Blunder Checking Model”: Aquí se puede seleccionar el método de detección de errores groseros tanto en los puntos imagen como los puntos de control. La opción elegida es “No automatic blunder cheking” indica que no se busquen errores groseros.
 - d. “Use Image Observation of Check Points in Triangulation”: Esta opción debe ser marcada cuando se desea que se utilicen los puntos de testeo para la triangulación. En este caso la misma no fue cliqueada.

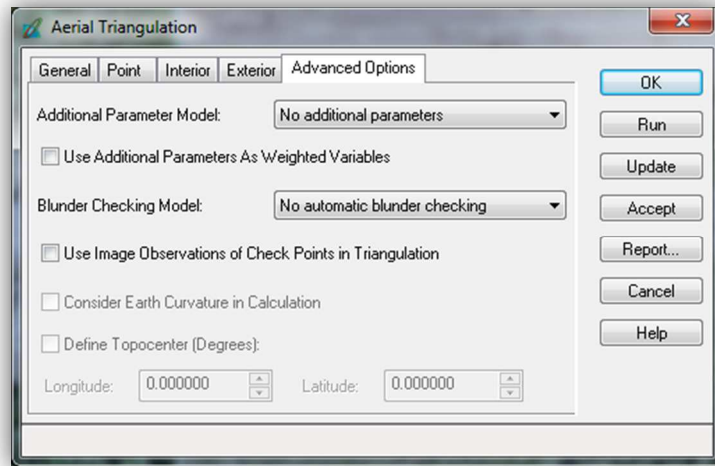


Ilustración 116: Ventana de configuración de la triangulación aérea – Pestaña de opciones avanzadas.-

16.10.2.5.1 Resultado

Finalizada la configuración, se cliquea *Run*, corriendo la triangulación. Automáticamente el software arroja una ventana de resultados.

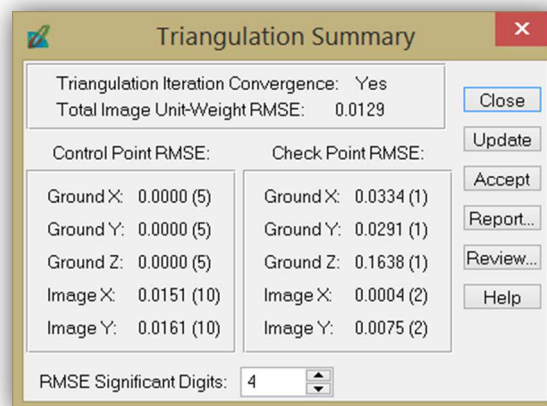


Ilustración 117: Ventana de resultados de la triangulación.-

En esta se indica:

- “*Triangulation Iteration Convergence*”: Indica si la triangulación convergió o no.
- “*Total Image Unit-Weight RMSE*”: Representa a la raíz del error cuadrático medio de la triangulación. Es un indicador de la precisión global de la solución.
- “*Control Point RMSE*”: Se indica la raíz de los errores al cuadrado de los puntos de control utilizados en el proceso, calculándose los errores de los puntos como el valor de las coordenadas ingresadas menos las calculadas.
 - “*Graud*”: Indica el error cuadrático medio de las coordenadas de los puntos de control.
 - “*Image*”: Indica el error cuadrático medio de las coordenadas imagen.
- “*Check Point RMSE*”: Se indica la raíz de los errores al cuadrado de los puntos de testeo utilizados en el proceso.

- “Graud”: Indica el error cuadrático medio de las coordenadas de los puntos de control.
- “Image”: Indica el error cuadrático medio de las coordenadas imagen.
- “*RMSE Significan Digits*”: Aquí se indica cuántos dígitos después de la coma se desean observar.

16.10.2.6 Obtención de las coordenadas de testeo

El grupo utilizó dos métodos diferentes para la obtención de las coordenadas de los puntos de testeo, los cuales se procede a desarrollar a continuación.

16.10.2.6.1 Haciendo uso de la estereoscopía

Para realizar la visualización en estereoscopia se hizo uso de la aplicación “*Stereo Analyst*” también perteneciente al software ERDAS IMAGINE 2013.

Esta emplea la técnica del anáglifo para lograr la visión en tres dimensiones (3D).

De forma simplificada las imágenes de anáglifo se componen de dos capas de color, superpuestas pero movidas ligeramente una respecto a la otra, esto provoca el efecto de profundidad. Consta de dos imágenes filtradas por color, una imagen para cada ojo. Con el uso de gafas específicas como las que se muestran en la ilustración 100, se ve una imagen por ojo, luego el cerebro la fusiona en una sola haciendo la ilusión de ver en tres dimensiones.



Ilustración 118: Gafas para ver imágenes en anáglifo.-

La interface interactiva del “*Stereo Analyst*”, consta de tres ventanas:

- Vista general: Muestra el alcance total de la estereoscopia, y a través de un cursor de enlace se indica la zona que se muestra en la vista principal.
- Vista principal: Es en esta ventana donde se realiza la mayor parte del trabajo. Aquí se puede ajustar la estereoscopia recoger las características y medir las coordenadas en tres dimensiones.
- Vista izquierda y derecha: En estas vistas proporciona detalles monoscópicos de las imágenes izquierda y derecha. Con la ayuda de un cursor se logra determinar la intersección de los rayos homólogos.

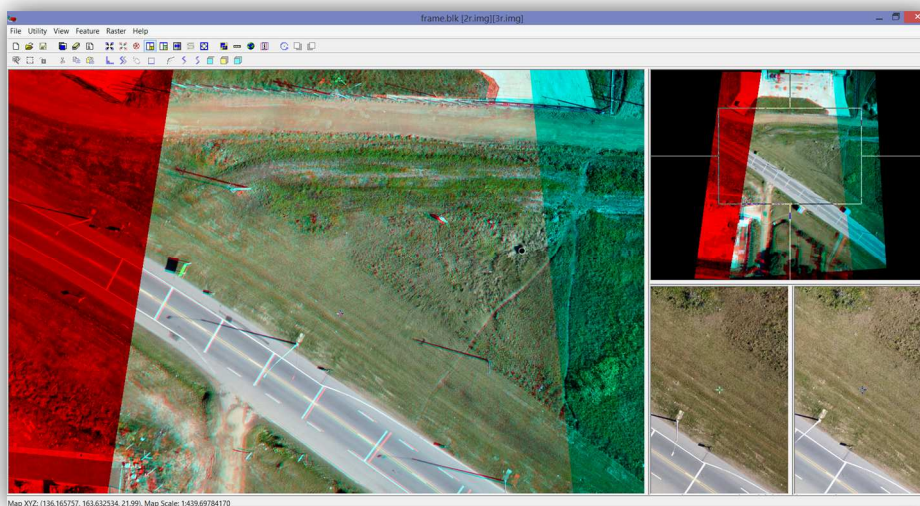


Ilustración 119: Interface de Stereo Analyst.-

Para obtener las coordenadas se utiliza la herramienta “3DMeasure Tool”. Se visualiza en la vista principal el punto a medir, con el uso de la visión en estereoscopia se coloca el cursor sobre la marca de forma de lograr la intersección de los rayos homólogos. Se puede utilizar como ayuda las vistas izquierda y derecha. Una vez logrado eso, se procede a medir el punto. Luego de medido todos los puntos se baja un archivo *.txt con las coordenadas de todos los puntos.

16.10.2.6.2 Haciendo uso de la triangulación

Para obtener las coordenadas de los puntos por este método se hace utiliza la herramienta para medir puntos, es decir se utiliza la herramienta “Point Measurements Tools”.

El procedimiento utilizado es análogo al explicado en 16.10.2.4. *Medición y generación de puntos*. Se identifican los puntos que serán utilizados como puntos de testeo en las vistas que proporciona esta herramienta, asignándole como uso “Check”.

Una vez identificado todos los puntos de testeo se realiza la triangulación. En este caso hay que tener especial atención en el momento de la configuración de la triangulación, Verificando que la opción “Use Image Observation of Check Points in Triangulation” no se encuentra seleccionada. Una vez finalizado la triangulación el LPS informa los valores residuales de los puntos de testeo localizado.

Para el cálculo de las coordenadas finales de los puntos, basta aplicar la siguiente fórmula:
$$(X_{LPS}, Y_{LPS}, Z_{LPS}) = (X_{topo}, Y_{topo}, Z_{topo}) + (dX, dY, dZ)$$

Donde:

- $(X_{LPS}, Y_{LPS}, Z_{LPS})$: son las coordenadas de los puntos de testeo calculadas por el software.
- $(X_{topo}, Y_{topo}, Z_{topo})$: Son las coordenadas de los puntos de testeo relevadas de forma tradicional.
- (dX, dY, dZ) : Son las coordenadas de los residuales asociados a los puntos de testeo.

16.11 ANEXO: COORDENADAS DEFINITIVAS RELEVADAS CON PROCEDIMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS

<i>Nº de punto</i>	<i>X (m)</i>	<i>Y (m)</i>	<i>Z (m)</i>
3	105,308	105,878	14,452
5	140,757	116,249	14,867
7	96,118	116,813	13,246
9	62,786	125,699	10,021
10	79,827	134,217	11,444
12	105,386	126,752	12,812
13	112,157	139,024	13,694
14	70,298	143,148	10,717
16	80,041	151,640	11,053
18	106,120	151,892	12,880
19	119,385	155,832	13,506
20	139,232	153,518	14,643
21	70,815	160,665	10,831
22	68,470	174,861	10,121
23	80,689	175,918	11,227
25	103,157	171,089	13,235
26	116,006	170,137	14,276
28	121,763	182,166	14,284
29	98,230	184,450	12,675
30	85,439	188,399	11,641
31	70,219	190,116	10,488
33	79,315	199,399	10,005
36	153,776	193,929	11,668
38	101,037	204,882	13,072
39	89,387	207,172	11,990
41	87,524	219,329	13,173
42	108,115	227,927	14,749
43	126,604	225,563	-
44	145,072	228,214	11,788

Tabla 74: Coordenadas definitivas del relevamiento fotogramétrico.-

16.12 ANEXO: CÁLCULOS ASOCIADOS A LOS REQUERIMIENTOS PREVIOS DEL ESTÁNDAR NSSDA

16.12.1 Test de rachas

Corresponde aclarar que para una fila i , la columna Tendencia adopta el valor 1, si $dx_i < dx_{i+1}$. En caso contrario adopta el valor 0.

En lo que refiere a la columna Nº de rachas, los valores se corresponden al conteo de valores 1 y 0 secuenciales de la columna Tendencia.

Punto	dX	Tendencia	Nº de racha
3	0,093	1	1
5	0,104	0	2
7	0,033	0	
9	-0,318	1	3
10	-0,054	1	
12	0,017	0	4
13	0,002	0	
14	-0,113	1	5
16	0,037	0	6
18	-0,084	0	
19	-0,132	1	7
20	-0,089	1	
21	0,006	1	
22	0,007	0	8
23	-0,017	0	
25	-0,066	0	
26	-0,085	0	
28	-0,112	1	9
29	-0,093	1	
30	-0,064	1	
31	-0,06	1	
33	0,002	1	
36	0,027	0	10
38	-0,156	1	11
39	-0,125	1	
41	-0,117	0	12
42	-0,234	1	13
43	-0,187	1	
44	0,007		

Tabla 75: Determinación del número de rachas en la muestra dX

Punto	dY	Tendencia	Nº de racha
3	-0,016	0	1
5	-0,074	1	2
7	0,029	0	3
9	-0,149	1	4
10	-0,017	1	
12	-0,009	0	5
13	-0,042	0	
14	-0,054	1	6
16	0,057	1	
18	0,079	1	
19	0,122	0	7
20	0,074	0	
21	0,072	1	8
22	0,112	0	9
23	0,024	1	10
25	0,039	1	
26	0,065	0	11
28	0,062	0	
29	0,003	1	12
30	0,02	1	
31	0,186	0	13
33	0,092	0	
36	-0,067	1	14
38	0,029	0	15
39	-0,026	0	
41	-0,032	1	16
42	0,006	1	
43	0,049	0	17
44	0,037		

Tabla 76: Determinación del número de rachas en la muestra dY

Punto	dZ	Tendencia	Racha Nº
3	-0,011	0	1
5	-0,338	1	2
7	0,164	1	
9	0,629	0	3
10	0,076	1	4
12	0,132	0	5
13	-0,162	1	6
14	0,489	0	7
16	0,337	0	
18	0,151	1	8
19	0,233	0	9
20	-0,108	1	10
21	0,542	1	
22	1,275	0	11
23	0,173	0	
25	-0,3	0	
26	-0,397	0	12
28	-0,51	1	
29	-0,448	1	
30	-0,218	1	13
31	0,926	0	
33	0,383	1	14

Punto	dZ	Tendencia	Racha N°
36	0,737	0	15
38	-0,588	0	
39	-0,657	0	
41	-0,81	0	
42	-1,456	1	16
44	-0,183		

Tabla 77: Determinación del número de rachas en la muestra dZ

16.12.2 Construcción de la función empírica: Test Kolmogrov Sminoff

Punto No.	Orden	dX	Tipificado	Empírica	Teórica	D _i
9	1	-0,318	-2,7768	0,0345	0,0027	0,0317
42	2	-0,234	-1,8690	0,0690	0,0308	0,0382
43	3	-0,187	-1,3610	0,1034	0,0868	0,0167
38	4	-0,156	-1,0260	0,1379	0,1524	-0,0145
19	5	-0,132	-0,7666	0,1724	0,2217	-0,0492
39	6	-0,125	-0,6909	0,2069	0,2448	-0,0379
41	7	-0,117	-0,6045	0,2414	0,2728	-0,0314
14	8	-0,113	-0,5613	0,2759	0,2873	-0,0114
28	9	-0,112	-0,5504	0,3103	0,2910	0,0193
29	10	-0,093	-0,3451	0,3448	0,3650	-0,0202
20	11	-0,089	-0,3019	0,3793	0,3814	-0,0021
26	12	-0,085	-0,2586	0,4138	0,3980	0,0158
18	13	-0,084	-0,2478	0,4483	0,4021	0,0461
25	14	-0,066	-0,0533	0,4828	0,4787	0,0040
30	15	-0,064	-0,0317	0,5172	0,4874	0,0299
31	16	-0,06	0,0116	0,5517	0,5046	0,0471
10	17	-0,054	0,0764	0,5862	0,5304	0,0558
23	18	-0,017	0,4763	0,6207	0,6831	-0,0624
13	19	0,002	0,6816	0,6552	0,7523	-0,0971
33	20	0,002	0,6816	0,6897	0,7523	-0,0626
21	21	0,006	0,7249	0,7241	0,7657	-0,0416
22	22	0,007	0,7357	0,7586	0,7690	-0,0104
44	23	0,007	0,7357	0,7931	0,7690	0,0241
12	24	0,017	0,8437	0,8276	0,8006	0,0270
36	25	0,027	0,9518	0,8621	0,8294	0,0327
7	26	0,033	1,0167	0,8966	0,8453	0,0512
16	27	0,037	1,0599	0,9310	0,8554	0,0756
3	28	0,093	1,6651	0,9655	0,9521	0,0135
5	29	0,104	1,7840	1,0000	0,9628	0,0372

Tabla 78: Construcción de la función empírica de dX

Punto No.	Orden	dY	Tipificado	Empírica	Teórica	D _i
9	1	-0,149	-2,568	0,034	0,005	0,029
5	2	-0,074	-1,449	0,069	0,074	-0,005
36	3	-0,067	-1,344	0,103	0,089	0,014
14	4	-0,054	-1,151	0,138	0,125	0,013
13	5	-0,042	-0,972	0,172	0,166	0,007
41	6	-0,032	-0,822	0,207	0,205	0,001
39	7	-0,026	-0,733	0,241	0,232	0,010
10	8	-0,017	-0,599	0,276	0,275	0,001
3	9	-0,016	-0,584	0,310	0,280	0,031
12	10	-0,009	-0,479	0,345	0,316	0,029

Punto No.	Orden	dY	Tipificado	Empírica	Teórica	$ D_i $
29	11	0,003	-0,300	0,379	0,382	-0,003
42	12	0,006	-0,256	0,414	0,399	0,015
30	13	0,02	-0,047	0,448	0,481	-0,033
23	14	0,024	0,013	0,483	0,505	-0,022
7	15	0,029	0,087	0,517	0,535	-0,018
38	16	0,029	0,087	0,552	0,535	0,017
44	17	0,037	0,207	0,586	0,582	0,004
25	18	0,039	0,237	0,621	0,594	0,027
43	19	0,049	0,386	0,655	0,650	0,005
16	20	0,057	0,505	0,690	0,693	-0,004
28	21	0,062	0,580	0,724	0,719	0,005
26	22	0,065	0,624	0,759	0,734	0,025
21	23	0,072	0,729	0,793	0,767	0,026
20	24	0,074	0,759	0,828	0,776	0,052
18	25	0,079	0,833	0,862	0,798	0,064
33	26	0,092	1,027	0,897	0,848	0,049
22	27	0,112	1,325	0,931	0,907	0,024
19	28	0,122	1,475	0,966	0,930	0,036
31	29	0,186	2,429	1,000	0,992	0,008

Tabla 79: Construcción de la función empírica de dY

Punto No.	Orden	dZ	Tipificado	Empírica	Teórica	$ D_i $
42	1	-1,456	-2,591	0,036	0,005	0,031
41	2	-0,81	-1,443	0,071	0,074	-0,003
39	3	-0,657	-1,171	0,107	0,121	-0,014
38	4	-0,588	-1,049	0,143	0,147	-0,004
28	5	-0,51	-0,910	0,179	0,181	-0,003
29	6	-0,448	-0,800	0,214	0,212	0,002
26	7	-0,397	-0,709	0,250	0,239	0,011
5	8	-0,338	-0,604	0,286	0,273	0,013
25	9	-0,3	-0,537	0,321	0,296	0,026
30	10	-0,218	-0,391	0,357	0,348	0,009
44	11	-0,183	-0,329	0,393	0,371	0,022
13	12	-0,162	-0,292	0,429	0,385	0,043
20	13	-0,108	-0,196	0,464	0,422	0,042
3	14	-0,011	-0,023	0,500	0,491	0,009
10	15	0,076	0,131	0,536	0,552	-0,016
12	16	0,132	0,231	0,571	0,591	-0,020
18	17	0,151	0,264	0,607	0,604	0,003
7	18	0,164	0,288	0,643	0,613	0,030
23	19	0,173	0,304	0,679	0,619	0,059
19	20	0,233	0,410	0,714	0,659	0,055
16	21	0,337	0,595	0,750	0,724	0,026
33	22	0,383	0,677	0,786	0,751	0,035
14	23	0,489	0,865	0,821	0,807	0,015
21	24	0,542	0,959	0,857	0,831	0,026
9	25	0,629	1,114	0,893	0,867	0,026
36	26	0,737	1,306	0,929	0,904	0,024
31	27	0,926	1,642	0,964	0,950	0,015
22	28	1,275	2,262	1,000	0,988	0,012

Tabla 80: Construcción de la función empírica de dZ

16.13 ANEXO: CÁLCULOS REFERENTES A LA CALIDAD POSICIONAL RELATIVA

16.13.1 Insumo

Como se expuso en el cuerpo principal del proyecto, el insumo principal del testeo de calidad son las coordenadas de los puntos. Ver tabla 82.

Nº de punto	Coordenadas relevadas topográficamente			Coordenadas relevadas fotogramétricamente		
	X (m)	Y (m)	Z (m)	X (m)	Y (m)	Z (m)
3	105,401	105,862	14,441	105,308	105,878	14,452
5	140,861	116,175	14,529	140,757	116,249	14,867
7	96,151	116,842	13,410	96,118	116,813	13,246
9	62,468	125,550	10,650	62,786	125,699	10,021
10	79,773	134,200	11,520	79,827	134,217	11,444
12	105,403	126,743	12,944	105,386	126,752	12,812
13	112,159	138,982	13,532	112,157	139,024	13,694
14	70,185	143,094	11,206	70,298	143,148	10,717
16	80,078	151,697	11,390	80,041	151,640	11,053
18	106,036	151,971	13,031	106,120	151,892	12,880
19	119,253	155,954	13,739	119,385	155,832	13,506
20	139,143	153,592	14,535	139,232	153,518	14,643
21	70,821	160,737	11,373	70,815	160,665	10,831
22	68,477	174,973	11,396	68,470	174,861	10,121
23	80,672	175,942	11,400	80,689	175,918	11,227
25	103,091	171,128	12,935	103,157	171,089	13,235
26	115,921	170,202	13,879	116,006	170,137	14,276
28	121,651	182,228	13,774	121,763	182,166	14,284
29	98,137	184,453	12,227	98,230	184,450	12,675
30	85,375	188,419	11,423	85,439	188,399	11,641
31	70,159	190,302	11,414	70,219	190,116	10,488
33	79,317	199,491	10,388	79,315	199,399	10,005
36	153,803	193,862	12,405	153,776	193,929	11,668
38	100,881	204,911	12,484	101,037	204,882	13,072
39	89,262	207,146	11,333	89,387	207,172	11,990
41	87,407	219,297	12,363	87,524	219,329	13,173
42	107,881	227,933	13,293	108,115	227,927	14,749
43	126,417	225,612	-	126,604	225,563	-
44	145,079	228,251	11,605	145,072	228,214	11,788

Tabla 81: Coordenadas relevadas.-

16.13.2 Planimetría

Número de combinaciones de puntos:

$$n = 29 \rightarrow m = 406$$

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
3 5	0,011	-0,058
3 7	-0,060	0,045
3 9	-0,411	-0,133
3 10	-0,147	-0,001
3 12	-0,076	0,007
3 13	-0,091	-0,026
3 14	-0,206	-0,038
3 16	-0,056	0,073
3 18	-0,177	0,095
3 19	-0,225	0,138
3 20	-0,182	0,090
3 21	-0,087	0,088
3 22	-0,086	0,128
3 23	-0,110	0,040
3 25	-0,159	0,055
3 26	-0,178	0,081
3 28	-0,205	0,078
3 29	-0,186	0,019
3 30	-0,157	0,036
3 31	-0,153	0,202
3 33	-0,091	0,108
3 36	-0,066	-0,051
3 38	-0,249	0,045
3 39	-0,218	-0,010
3 41	-0,210	-0,016
3 42	-0,327	0,022
3 43	-0,280	0,065
3 44	-0,086	0,053
5 7	-0,071	0,103
5 9	-0,422	-0,075
5 10	-0,158	0,057
5 12	-0,087	0,065
5 13	-0,102	0,032
5 14	-0,217	0,020
5 16	-0,067	0,131
5 18	-0,188	0,153
5 19	-0,236	0,196

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
5 20	-0,193	0,148
5 21	-0,098	0,146
5 22	-0,097	0,186
5 23	-0,121	0,098
5 25	-0,170	0,113
5 26	-0,189	0,139
5 28	-0,216	0,136
5 29	-0,197	0,077
5 30	-0,168	0,094
5 31	-0,164	0,260
5 33	-0,102	0,166
5 36	-0,077	0,007
5 38	-0,260	0,103
5 39	-0,229	0,048
5 41	-0,221	0,042
5 42	-0,338	0,080
5 43	-0,291	0,123
5 44	-0,097	0,111
7 9	-0,351	-0,178
7 10	-0,087	-0,046
7 12	-0,016	-0,038
7 13	-0,031	-0,071
7 14	-0,146	-0,083
7 16	0,004	0,028
7 18	-0,117	0,050
7 19	-0,165	0,093
7 20	-0,122	0,045
7 21	-0,027	0,043
7 22	-0,026	0,083
7 23	-0,050	-0,005
7 25	-0,099	0,010
7 26	-0,118	0,036
7 28	-0,145	0,033
7 29	-0,126	-0,026
7 30	-0,097	-0,009
7 31	-0,093	0,157
7 33	-0,031	0,063

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
7 36	-0,006	-0,096
7 38	-0,189	0,000
7 39	-0,158	-0,055
7 41	-0,150	-0,061
7 42	-0,267	-0,023
7 43	-0,220	0,020
7 44	-0,026	0,008
9 10	0,264	0,132
9 12	0,335	0,140
9 13	0,320	0,107
9 14	0,205	0,095
9 16	0,355	0,206
9 18	0,234	0,228
9 19	0,186	0,271
9 20	0,229	0,223
9 21	0,324	0,221
9 22	0,325	0,261
9 23	0,301	0,173
9 25	0,252	0,188
9 26	0,233	0,214
9 28	0,206	0,211
9 29	0,225	0,152
9 30	0,254	0,169
9 31	0,258	0,335
9 33	0,320	0,241
9 36	0,345	0,082
9 38	0,162	0,178
9 39	0,193	0,123
9 41	0,201	0,117
9 42	0,084	0,155
9 43	0,131	0,198
9 44	0,325	0,186
10 12	0,071	0,008
10 13	0,056	-0,025
10 14	-0,059	-0,037
10 16	0,091	0,074
10 18	-0,030	0,096

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
10 19	-0,078	0,139
10 20	-0,035	0,091
10 21	0,060	0,089
10 22	0,061	0,129
10 23	0,037	0,041
10 25	-0,012	0,056
10 26	-0,031	0,082
10 28	-0,058	0,079
10 29	-0,039	0,020
10 30	-0,010	0,037
10 31	-0,006	0,203
10 33	0,056	0,109
10 36	0,081	-0,050
10 38	-0,102	0,046
10 39	-0,071	-0,009
10 41	-0,063	-0,015
10 42	-0,180	0,023
10 43	-0,133	0,066
10 44	0,061	0,054
12 13	-0,015	-0,033
12 14	-0,130	-0,045
12 16	0,020	0,066
12 18	-0,101	0,088
12 19	-0,149	0,131
12 20	-0,106	0,083
12 21	-0,011	0,081
12 22	-0,010	0,121
12 23	-0,034	0,033
12 25	-0,083	0,048
12 26	-0,102	0,074
12 28	-0,129	0,071
12 29	-0,110	0,012
12 30	-0,081	0,029
12 31	-0,077	0,195
12 33	-0,015	0,101
12 36	0,010	-0,058
12 38	-0,173	0,038
12 39	-0,142	-0,017
12 41	-0,134	-0,023
12 42	-0,251	0,015
12 43	-0,204	0,058
12 44	-0,010	0,046

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
13 14	-0,115	-0,012
13 16	0,035	0,099
13 18	-0,086	0,121
13 19	-0,134	0,164
13 20	-0,091	0,116
13 21	0,004	0,114
13 22	0,005	0,154
13 23	-0,019	0,066
13 25	-0,068	0,081
13 26	-0,087	0,107
13 28	-0,114	0,104
13 29	-0,095	0,045
13 30	-0,066	0,062
13 31	-0,062	0,228
13 33	0,000	0,134
13 36	0,025	-0,025
13 38	-0,158	0,071
13 39	-0,127	0,016
13 41	-0,119	0,010
13 42	-0,236	0,048
13 43	-0,189	0,091
13 44	0,005	0,079
14 16	0,150	0,111
14 18	0,029	0,133
14 19	-0,019	0,176
14 20	0,024	0,128
14 21	0,119	0,126
14 22	0,120	0,166
14 23	0,096	0,078
14 25	0,047	0,093
14 26	0,028	0,119
14 28	0,001	0,116
14 29	0,020	0,057
14 30	0,049	0,074
14 31	0,053	0,240
14 33	0,115	0,146
14 36	0,140	-0,013
14 38	-0,043	0,083
14 39	-0,012	0,028
14 41	-0,004	0,022
14 42	-0,121	0,060
14 43	-0,074	0,103

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
14 44	0,120	0,091
16 18	-0,121	0,022
16 19	-0,169	0,065
16 20	-0,126	0,017
16 21	-0,031	0,015
16 22	-0,030	0,055
16 23	-0,054	-0,033
16 25	-0,103	-0,018
16 26	-0,122	0,008
16 28	-0,149	0,005
16 29	-0,130	-0,054
16 30	-0,101	-0,037
16 31	-0,097	0,129
16 33	-0,035	0,035
16 36	-0,010	-0,124
16 38	-0,193	-0,028
16 39	-0,162	-0,083
16 41	-0,154	-0,089
16 42	-0,271	-0,051
16 43	-0,224	-0,008
16 44	-0,030	-0,020
18 19	-0,048	0,043
18 20	-0,005	-0,005
18 21	0,090	-0,007
18 22	0,091	0,033
18 23	0,067	-0,055
18 25	0,018	-0,040
18 26	-0,001	-0,014
18 28	-0,028	-0,017
18 29	-0,009	-0,076
18 30	0,020	-0,059
18 31	0,024	0,107
18 33	0,086	0,013
18 36	0,111	-0,146
18 38	-0,072	-0,050
18 39	-0,041	-0,105
18 41	-0,033	-0,111
18 42	-0,150	-0,073
18 43	-0,103	-0,030
18 44	0,091	-0,042
19 20	0,043	-0,048
19 21	0,138	-0,050

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
19 22	0,139	-0,010
19 23	0,115	-0,098
19 25	0,066	-0,083
19 26	0,047	-0,057
19 28	0,020	-0,060
19 29	0,039	-0,119
19 30	0,068	-0,102
19 31	0,072	0,064
19 33	0,134	-0,030
19 36	0,159	-0,189
19 38	-0,024	-0,093
19 39	0,007	-0,148
19 41	0,015	-0,154
19 42	-0,102	-0,116
19 43	-0,055	-0,073
19 44	0,139	-0,085
20 21	0,095	-0,002
20 22	0,096	0,038
20 23	0,072	-0,050
20 25	0,023	-0,035
20 26	0,004	-0,009
20 28	-0,023	-0,012
20 29	-0,004	-0,071
20 30	0,025	-0,054
20 31	0,029	0,112
20 33	0,091	0,018
20 36	0,116	-0,141
20 38	-0,067	-0,045
20 39	-0,036	-0,100
20 41	-0,028	-0,106
20 42	-0,145	-0,068
20 43	-0,098	-0,025
20 44	0,096	-0,037
21 22	0,001	0,040
21 23	-0,023	-0,048
21 25	-0,072	-0,033
21 26	-0,091	-0,007
21 28	-0,118	-0,010
21 29	-0,099	-0,069
21 30	-0,070	-0,052
21 31	-0,066	0,114
21 33	-0,004	0,020

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
21 36	0,021	-0,139
21 38	-0,162	-0,043
21 39	-0,131	-0,098
21 41	-0,123	-0,104
21 42	-0,240	-0,066
21 43	-0,193	-0,023
21 44	0,001	-0,035
22 23	-0,024	-0,088
22 25	-0,073	-0,073
22 26	-0,092	-0,047
22 28	-0,119	-0,050
22 29	-0,100	-0,109
22 30	-0,071	-0,092
22 31	-0,067	0,074
22 33	-0,005	-0,020
22 36	0,020	-0,179
22 38	-0,163	-0,083
22 39	-0,132	-0,138
22 41	-0,124	-0,144
22 42	-0,241	-0,106
22 43	-0,194	-0,063
22 44	0,000	-0,075
23 25	-0,049	0,015
23 26	-0,068	0,041
23 28	-0,095	0,038
23 29	-0,076	-0,021
23 30	-0,047	-0,004
23 31	-0,043	0,162
23 33	0,019	0,068
23 36	0,044	-0,091
23 38	-0,139	0,005
23 39	-0,108	-0,050
23 41	-0,100	-0,056
23 42	-0,217	-0,018
23 43	-0,170	0,025
23 44	0,024	0,013
25 26	-0,019	0,026
25 28	-0,046	0,023
25 29	-0,027	-0,036
25 30	0,002	-0,019
25 31	0,006	0,147
25 33	0,068	0,053

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
25 36	0,093	-0,106
25 38	-0,090	-0,010
25 39	-0,059	-0,065
25 41	-0,051	-0,071
25 42	-0,168	-0,033
25 43	-0,121	0,010
25 44	0,073	-0,002
26 28	-0,027	-0,003
26 29	-0,008	-0,062
26 30	0,021	-0,045
26 31	0,025	0,121
26 33	0,087	0,027
26 36	0,112	-0,132
26 38	-0,071	-0,036
26 39	-0,040	-0,091
26 41	-0,032	-0,097
26 42	-0,149	-0,059
26 43	-0,102	-0,016
26 44	0,092	-0,028
28 29	0,019	-0,059
28 30	0,048	-0,042
28 31	0,052	0,124
28 33	0,114	0,030
28 36	0,139	-0,129
28 38	-0,044	-0,033
28 39	-0,013	-0,088
28 41	-0,005	-0,094
28 42	-0,122	-0,056
28 43	-0,075	-0,013
28 44	0,119	-0,025
29 30	0,029	0,017
29 31	0,033	0,183
29 33	0,095	0,089
29 36	0,120	-0,070
29 38	-0,063	0,026
29 39	-0,032	-0,029
29 41	-0,024	-0,035
29 42	-0,141	0,003
29 43	-0,094	0,046
29 44	0,100	0,034
30 31	0,004	0,166
30 33	0,066	0,072

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
30 36	0,091	-0,087
30 38	-0,092	0,009
30 39	-0,061	-0,046
30 41	-0,053	-0,052
30 42	-0,170	-0,014
30 43	-0,123	0,029
30 44	0,071	0,017
31 33	0,062	-0,094
31 36	0,087	-0,253
31 38	-0,096	-0,157
31 39	-0,065	-0,212
31 41	-0,057	-0,218
31 42	-0,174	-0,180
31 43	-0,127	-0,137
31 44	0,067	-0,149

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
33 36	0,025	-0,159
33 38	-0,158	-0,063
33 39	-0,127	-0,118
33 41	-0,119	-0,124
33 42	-0,236	-0,086
33 43	-0,189	-0,043
33 44	0,005	-0,055
36 38	-0,183	0,096
36 39	-0,152	0,041
36 41	-0,144	0,035
36 42	-0,261	0,073
36 43	-0,214	0,116
36 44	-0,020	0,104
38 39	0,031	-0,055
38 41	0,039	-0,061

Puntos	$\Delta X_{rel\ kj}$	$\Delta Y_{rel\ kj}$
38 42	-0,078	-0,023
38 43	-0,031	0,020
38 44	0,163	0,008
39 41	0,008	-0,006
39 42	-0,109	0,032
39 43	-0,062	0,075
39 44	0,132	0,063
41 42	-0,117	0,038
41 43	-0,070	0,081
41 44	0,124	0,069
42 43	0,047	0,043
42 44	0,241	0,031
43 44	0,194	-0,012

Tabla 82: Residuales
planimétricos relativos.-

Parámetros intermedios:

$$\sigma_{X_{rel}} = 13\text{ cm}$$

$$\sigma_{Y_{rel}} = 10\text{ cm}$$

$$\sigma_{plani_inicial} = 12\text{ cm}$$

Resultado definitivo para un 90 % de certeza en planimetría:

$$\sigma_{plani} = 25\text{ cm}$$

16.13.3 Altimetría

Número de combinaciones de puntos:

$$n = 28 \rightarrow m = 378$$

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
3 5	-0,33
3 7	0,17
3 9	0,64
3 10	0,09
3 12	0,14
3 13	-0,15
3 14	0,50
3 16	0,35
3 18	0,16
3 19	0,24
3 20	-0,10
3 21	0,55
3 22	1,29
3 23	0,18
3 25	-0,29
3 26	-0,39
3 28	-0,50
3 29	-0,44
3 30	-0,21
3 31	0,94
3 33	0,39
3 36	0,75
3 38	-0,58
3 39	-0,65
3 41	-0,80
3 42	-1,45
3 44	-0,17
5 7	0,50
5 9	0,97
5 10	0,41
5 12	0,47
5 13	0,18
5 14	0,83
5 16	0,67
5 18	0,49

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
5 19	0,57
5 20	0,23
5 21	0,88
5 22	1,61
5 23	0,51
5 25	0,04
5 26	-0,06
5 28	-0,17
5 29	-0,11
5 30	0,12
5 31	1,26
5 33	0,72
5 36	1,08
5 38	-0,25
5 39	-0,32
5 41	-0,47
5 42	-1,12
5 44	0,15
7 9	0,47
7 10	-0,09
7 12	-0,03
7 13	-0,33
7 14	0,33
7 16	0,17
7 18	-0,01
7 19	0,07
7 20	-0,27
7 21	0,38
7 22	1,11
7 23	0,01
7 25	-0,46
7 26	-0,56
7 28	-0,67
7 29	-0,61
7 30	-0,38

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
7 31	0,76
7 33	0,22
7 36	0,57
7 38	-0,75
7 39	-0,82
7 41	-0,97
7 42	-1,62
7 44	-0,35
9 10	-0,55
9 12	-0,50
9 13	-0,79
9 14	-0,14
9 16	-0,29
9 18	-0,48
9 19	-0,40
9 20	-0,74
9 21	-0,09
9 22	0,65
9 23	-0,46
9 25	-0,93
9 26	-1,03
9 28	-1,14
9 29	-1,08
9 30	-0,85
9 31	0,30
9 33	-0,25
9 36	0,11
9 38	-1,22
9 39	-1,29
9 41	-1,44
9 42	-2,09
9 44	-0,81
10 12	0,06
10 13	-0,24
10 14	0,41

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
10 16	0,26
10 18	0,07
10 19	0,16
10 20	-0,18
10 21	0,47
10 22	1,20
10 23	0,10
10 25	-0,38
10 26	-0,47
10 28	-0,59
10 29	-0,52
10 30	-0,29
10 31	0,85
10 33	0,31
10 36	0,66
10 38	-0,66
10 39	-0,73
10 41	-0,89
10 42	-1,53
10 44	-0,26
12 13	-0,29
12 14	0,36
12 16	0,21
12 18	0,02
12 19	0,10
12 20	-0,24
12 21	0,41
12 22	1,14
12 23	0,04
12 25	-0,43
12 26	-0,53
12 28	-0,64
12 29	-0,58
12 30	-0,35
12 31	0,79
12 33	0,25
12 36	0,61
12 38	-0,72
12 39	-0,79
12 41	-0,94
12 42	-1,59
12 44	-0,32

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
13 14	0,65
13 16	0,50
13 18	0,31
13 19	0,40
13 20	0,05
13 21	0,70
13 22	1,44
13 23	0,34
13 25	-0,14
13 26	-0,23
13 28	-0,35
13 29	-0,29
13 30	-0,06
13 31	1,09
13 33	0,55
13 36	0,90
13 38	-0,43
13 39	-0,49
13 41	-0,65
13 42	-1,29
13 44	-0,02
14 16	-0,15
14 18	-0,34
14 19	-0,26
14 20	-0,60
14 21	0,05
14 22	0,79
14 23	-0,32
14 25	-0,79
14 26	-0,89
14 28	-1,00
14 29	-0,94
14 30	-0,71
14 31	0,44
14 33	-0,11
14 36	0,25
14 38	-1,08
14 39	-1,15
14 41	-1,30
14 42	-1,95
14 44	-0,67
16 18	-0,19

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
16 19	-0,10
16 20	-0,45
16 21	0,21
16 22	0,94
16 23	-0,16
16 25	-0,64
16 26	-0,73
16 28	-0,85
16 29	-0,79
16 30	-0,56
16 31	0,59
16 33	0,05
16 36	0,40
16 38	-0,92
16 39	-0,99
16 41	-1,15
16 42	-1,79
16 44	-0,52
18 19	0,08
18 20	-0,26
18 21	0,39
18 22	1,12
18 23	0,02
18 25	-0,45
18 26	-0,55
18 28	-0,66
18 29	-0,60
18 30	-0,37
18 31	0,78
18 33	0,23
18 36	0,59
18 38	-0,74
18 39	-0,81
18 41	-0,96
18 42	-1,61
18 44	-0,33
19 20	-0,34
19 21	0,31
19 22	1,04
19 23	-0,06
19 25	-0,53
19 26	-0,63

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
19 28	-0,74
19 29	-0,68
19 30	-0,45
19 31	0,69
19 33	0,15
19 36	0,50
19 38	-0,82
19 39	-0,89
19 41	-1,04
19 42	-1,69
19 44	-0,42
20 21	0,65
20 22	1,38
20 23	0,28
20 25	-0,19
20 26	-0,29
20 28	-0,40
20 29	-0,34
20 30	-0,11
20 31	1,03
20 33	0,49
20 36	0,85
20 38	-0,48
20 39	-0,55
20 41	-0,70
20 42	-1,35
20 44	-0,07
21 22	0,73
21 23	-0,37
21 25	-0,84
21 26	-0,94
21 28	-1,05
21 29	-0,99
21 30	-0,76
21 31	0,38
21 33	-0,16
21 36	0,20
21 38	-1,13
21 39	-1,20
21 41	-1,35
21 42	-2,00
21 44	-0,73

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
22 23	-1,10
22 25	-1,58
22 26	-1,67
22 28	-1,79
22 29	-1,72
22 30	-1,49
22 31	-0,35
22 33	-0,89
22 36	-0,54
22 38	-1,86
22 39	-1,93
22 41	-2,09
22 42	-2,73
22 44	-1,46
23 25	-0,47
23 26	-0,57
23 28	-0,68
23 29	-0,62
23 30	-0,39
23 31	0,75
23 33	0,21
23 36	0,56
23 38	-0,76
23 39	-0,83
23 41	-0,98
23 42	-1,63
23 44	-0,36
25 26	-0,10
25 28	-0,21
25 29	-0,15
25 30	0,08
25 31	1,23
25 33	0,68
25 36	1,04
25 38	-0,29
25 39	-0,36
25 41	-0,51
25 42	-1,16
25 44	0,12
26 28	-0,11
26 29	-0,05
26 30	0,18

Puntos	$\Delta Z_{rel\ kj}$
26 31	1,32
26 33	0,78
26 36	1,13
26 38	-0,19
26 39	-0,26
26 41	-0,41
26 42	-1,06
26 44	0,21
28 29	0,06
28 30	0,29
28 31	1,44
28 33	0,89
28 36	1,25
28 38	-0,08
28 39	-0,15
28 41	-0,30
28 42	-0,95
28 44	0,33
29 30	0,23
29 31	1,37
29 33	0,83
29 36	1,19
29 38	-0,14
29 39	-0,21
29 41	-0,36
29 42	-1,01
29 44	0,27
30 31	1,14
30 33	0,60
30 36	0,96
30 38	-0,37
30 39	-0,44
30 41	-0,59
30 42	-1,24
30 44	0,04
31 33	-0,54
31 36	-0,19
31 38	-1,51
31 39	-1,58
31 41	-1,74
31 42	-2,38
31 44	-1,11

Puntos		$\Delta Z_{rel\ kj}$
33	36	0,35
33	38	-0,97
33	39	-1,04
33	41	-1,19
33	42	-1,84
33	44	-0,57
36	38	-1,33
36	39	-1,39
Puntos		$\Delta Z_{rel\ kj}$
36	41	-1,55
36	42	-2,19
36	44	-0,92
38	39	-0,07
38	41	-0,22
38	42	-0,87
38	44	0,40
39	41	-0,15
Puntos		$\Delta Z_{rel\ kj}$
39	42	-0,80
39	44	0,47
41	42	-0,65
41	44	0,63
42	44	1,27

Tabla 83: Residuales
altimétricos relativos.-

Parámetro intermedio:

$$\sigma_{z_{rel}} = 81 \text{ cm}$$

Resultado definitivo para un 90 % de certeza en altimetría:

$$\sigma_{alti} = 1.33 \text{ m}$$

16.14 ANEXO: CÁLCULOS ASOCIADOS AL ANÁLISIS DE LA DIRECCIÓN DE LOS RESIDUALES

Punto	dX (m)	dY (m)	α (°)
3	0,093	-0,016	100
5	0,104	-0,074	125
7	0,033	0,029	49
9	-0,318	-0,149	245
10	-0,054	-0,017	253
12	0,017	-0,009	118
13	0,002	-0,042	177
14	-0,113	-0,054	244
16	0,037	0,057	33
18	-0,084	0,079	313
19	-0,132	0,122	313
20	-0,089	0,074	310
21	0,006	0,072	5
22	0,007	0,112	4
23	-0,017	0,024	325
25	-0,066	0,039	301
26	-0,085	0,065	307
28	-0,112	0,062	299
29	-0,093	0,003	272
30	-0,064	0,02	287
31	-0,06	0,186	342
33	0,002	0,092	1
36	0,027	-0,067	158
38	-0,156	0,029	281
39	-0,125	-0,026	258
41	-0,117	-0,032	255
42	-0,234	0,006	271
43	-0,187	0,049	285
44	0,007	0,037	11

Tabla 84: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano XY.-

Punto	dX (m)	dZ (m)	β (°)
3	0.093	-0.011	97
5	0.104	-0.338	163
7	0.033	0.164	11
9	-0.318	0.629	333
10	-0.054	0.076	325
12	0.017	0.132	7
13	0.002	-0.162	179
14	-0.113	0.489	347
16	0.037	0.337	6
18	-0.084	0.151	331
19	-0.132	0.233	330
20	-0.089	-0.108	219
21	0.006	0.542	1
22	0.007	1.275	0
23	-0.017	0.173	354
25	-0.066	-0.3	192
26	-0.085	-0.397	192

Punto	dX (m)	dZ (m)	$\beta(^{\circ})$
28	-0.112	-0.51	192
29	-0.093	-0.448	192
30	-0.064	-0.218	196
31	-0.06	0.926	356
33	0.002	0.383	0
36	0.027	0.737	2
38	-0.156	-0.588	195
39	-0.125	-0.657	191
41	-0.117	-0.81	188
42	-0.234	-1.456	189
44	0.007	-0.183	178

Tabla 85: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano XZ.-

Punto	dY (m)	dZ (m)	$\gamma(^{\circ})$
3	-0.016	-0.011	235
5	-0.074	-0.338	192
7	0.029	0.164	10
9	-0.149	0.629	347
10	-0.017	0.076	347
12	-0.009	0.132	356
13	-0.042	-0.162	195
14	-0.054	0.489	354
16	0.057	0.337	10
18	0.079	0.151	28
19	0.122	0.233	28
20	0.074	-0.108	146
21	0.072	0.542	8
22	0.112	1.275	5
23	0.024	0.173	8
25	0.039	-0.3	173
26	0.065	-0.397	171
28	0.062	-0.51	173
29	0.003	-0.448	180
30	0.02	-0.218	175
31	0.186	0.926	11
33	0.092	0.383	14
36	-0.067	0.737	355
38	0.029	-0.588	-3
39	-0.026	-0.657	182
41	-0.032	-0.81	182
42	0.006	-1.456	180
44	0.037	-0.183	169

Tabla 86: Cálculo del ángulo de proyección de los residuales en el plano YZ.-