

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**“EVALUACIÓN DE LA PRECISIÓN PLANIMÉTRICA Y
ALTIMÉTRICA EN UN LEVANTAMIENTO FOTOGRAFICO
REALIZADO POR UNA AERONAVE PILOTEADA
REMOTAMENTE”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

Elaborado por:

DAVID ERICK MENDOZA ROMERO

Asesor:

Msc. JULIO HERNAN CRUZADO QUIROZ

Lima-Perú

2019

© 2019, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

**“El autor autoriza a la UNI a reproducir la Tesis en su totalidad o en parte,
con fines estrictamente académicos.”**

Mendoza Romero, David Erick

dmendozar@uni.pe

983672255 – 4581003

AGRADECIMIENTOS

A los que desinteresadamente colaboraron en el desarrollo de esta tesis

ÍNDICE

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| PRÓLOGO | 7 |
| LISTA DE CUADROS | 8 |
| LISTA DE FIGURAS | 10 |
| LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS | 13 |
| CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN | 14 |
| 1.1 ANTECEDENTES | 14 |
| 1.2 PROBLEMÁTICA | 14 |
| 1.3 OBJETIVOS | 15 |
| 1.3.1 Objetivo general | 15 |
| 1.3.2 Objetivos específicos | 15 |
| 1.4 HIPÓTESIS | 15 |
| CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO | 16 |
| 2.1 ASPECTOS GENERALES DE FOTOGRAMETRÍA | 16 |
| 2.1.1 Definiciones | 16 |
| 2.1.1.1 Fotogrametría | 16 |
| 2.1.1.2 Fotointerpretación | 17 |
| 2.1.1.3 Levantamiento Fotogramétrico | 17 |
| 2.1.1.4 Plan de vuelo | 17 |
| 2.1.1.5 Restitución fotogramétrica | 18 |
| 2.1.1.6 Traslape | 19 |
| 2.1.2 Evolución histórica | 19 |
| 2.1.3 Productos fotogramétricos | 23 |
| 2.1.3.1 Modelo Digital de Terreno (MDT) | 23 |
| 2.1.3.2 Curvas de Nivel | 24 |
| 2.1.3.3 Ortofoto | 25 |

| | | |
|---------|--|-----------|
| 2.2 | AERONAVES CONTROLADAS DE FORMA REMOTA (RPA) | 26 |
| 2.2.1 | Terminología | 26 |
| 2.2.1.1 | RPA y RPAS | 26 |
| 2.2.1.2 | Pixel | 26 |
| 2.2.1.3 | GSD | 27 |
| 2.2.2 | Historia | 27 |
| 2.2.3 | Clasificación | 30 |
| 2.2.3.1 | Clasificación por tipo | 31 |
| 2.2.3.2 | Clasificación por peso | 34 |
| 2.2.4 | Usos y aplicaciones | 34 |
| 2.2.4.1 | Uso en la Topografía | 35 |
| 2.2.4.2 | Uso en la Gestión de Recursos Naturales | 36 |
| 2.2.4.3 | Uso en la Agricultura | 36 |
| | CAPÍTULO III: ESTRUCTURA Y PROCEDIMIENTOS | 37 |
| 3.1 | RPA PARA FOTOGRAMETRÍA | 37 |
| 3.1.1 | Phantom 4 Pro | 37 |
| 3.1.1.1 | Aeronave | 37 |
| 3.1.1.2 | Control remoto | 39 |
| 3.1.1.3 | Cámara y Estabilizador | 40 |
| 3.1.2 | Manipulación | 41 |
| 3.2 | PUNTOS DE CONTROL | 42 |
| 3.3 | SOFTWARE PARA EL PLAN DE VUELO | 43 |
| 3.4 | SOFTWARE PARA ADMINISTRACIÓN DE IMÁGENES | 44 |
| 3.5 | SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES | 45 |
| 3.6 | PROCEDIMIENTO DE TOMA DE INFORMACIÓN EN CAMPO | 46 |
| 3.7 | PROCEDIMIENTO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES | 47 |
| 3.7.1 | Añadir Fotos | 47 |
| 3.7.2 | Reproyección de Coordenadas | 48 |

| | | |
|--|---|-----------|
| 3.7.3 | Orientar Fotos | 49 |
| 3.7.4 | Colocación de los puntos de control | 50 |
| 3.7.5 | Creación de nube de puntos densa | 53 |
| 3.7.6 | Edición de superficie | 54 |
| 3.7.7 | Creación de malla | 55 |
| 3.7.8 | Creación de Modelo de elevación digital (DEM) | 55 |
| 3.7.9 | Crear Curvas de nivel | 56 |
| 3.7.10 | Crear Ortomosaico | 57 |
| 3.8 | APLICACIÓN EN QUEBRADA QUE CRUZA UN EJE VIAL | 58 |
| 3.8.1 | Precisiones en Planimetría y Altimetría | 60 |
| 3.8.1.1 | En Planimetría | 60 |
| 3.8.1.2 | En Altimetría | 60 |
| CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LA RPA APLICADO A UN TRAMO DE CARRETERA | | 61 |
| 4.1 | CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO | 61 |
| 4.2 | PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACION | 64 |
| 4.2.1 | Verificación tipo RPA – RPA | 64 |
| 4.2.2 | Verificación tipo RPA – Plano Topográfico (PT) | 65 |
| 4.2.3 | Muestra y Resultados | 67 |
| 4.2.3.1 | Muestra y Resultados para la verificación tipo RPA-RPA | 67 |
| 4.2.3.2 | Muestra y Resultados para la verificación tipo RPA – PT | 73 |
| CONCLUSIONES | | 80 |
| RECOMENDACIONES | | 81 |
| BIBLIOGRAFÍA | | 82 |
| ANEXOS | | 85 |
| A.1 | ESPECIFICACIONES DEL PHANTOM 4 PRO | 85 |
| A.2 | PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE | 91 |

| | |
|--|----|
| A.3 REQUERIMIENTOS DE UNA COMPUTADORA PARA EL USO DEL SOFTWARE AGISOFT | 95 |
| A.4 TdR DEL PROYECTO | 97 |

RESUMEN

El uso de vehículos aéreos piloteados remotamente con fines topográficos va en crecimiento en el país, tal es así que cada año salen al mercado aeronaves más avanzadas dirigidas directamente al rubro de la topografía, lo cual hace prever el avance que tendrán a futuro, con aeronaves más versátiles, de mayor autonomía, estabilidad y por ende de mayor precisión fotogramétrica. Justamente esta precisión milimétrica tan anhelada es el punto débil de este procedimiento y la razón de que los procedimientos topográficos tradicionales se usen hasta la actualidad.

Este trabajo se centra en evaluar la precisión de un levantamiento fotogramétrico realizado por una aeronave Phantom 4 Pro, el cual sobrevoló 5 quebradas que cruzan un eje vial, a más de 3500 m.s.n.m. Estas quebradas cuentan con 41 puntos de comparación en total. También sobre el mismo eje vial se ubicaron 51 puntos de referencia que también fueron sobrevoladas y a los cuales se les realiza un análisis comparativo con respecto a un plano topográfico que muestra también estos 51 puntos.

Esta diferencia de valores es tratada y agrupada por la Raíz del Error Medio Cuadrático. Para la evaluación de la precisión en zonas de grandes cambios de elevación, como son las quebradas, se obtuvo errores menores a los 12 cm en el plano y menores a 45 cm en altitud. Para el otro caso, puntos referenciales cerca al eje y un terreno sin grandes cambios de elevación, se obtuvo errores menores a 14 cm en el plano y 21 cm en altitud.

Debido a que la escala los planos que se requieren de estas zonas varían entre los 1:500 (zonas urbanas) y 1:2000 (zonas rurales), la información obtenida por procedimientos fotogramétricos resulta válida y aplicable a proyectos del tipo rural y requeriría de procedimientos fotogramétricos más estrictos para poder trabajar en zonas urbanas.

ABSTRACT

The use of remotely piloted aerial vehicles with topographic purposes is growing in the country, so that each year more advanced aircraft are sent to the market directly addressed to the field of topography, which makes foresee the advance they will have in the future, with aircraft more versatile, with greater autonomy, stability and, therefore, greater photogrammetric precision. It is precisely this much sought-after millimeter precision that is the weak point of this procedure and the reason that traditional topographic procedures are used to this day.

This work focuses on evaluating the accuracy of a photogrammetric survey carried out by a Phantom 4 Pro aircraft, which flew over 5 streams that cross a road axis, at more than 3500 mamsl. These streams have 41 points of comparison in total. Also on the same road axis were located 51 reference points that were also overflowed and to which a comparative analysis is made with respect to a topographic map that also shows these 51 points.

This difference of values is treated and grouped by the Root-Mean-Square Error. For the evaluation of the accuracy in areas of large changes in elevation, such as streams, errors were obtained less than 12 cm in the plane and less than 45 cm in altitude. For the other case, reference points near the axis and a terrain without major changes in elevation, errors less than 14 cm in the plane and 21 cm in altitude were obtained.

Because the scale required for these areas varies between 1: 500 (urban areas) and 1: 2000 (rural areas), the information obtained by photogrammetric procedures is valid and applicable to projects of the rural type and would require stricter photogrammetric procedures to be able to work in urban areas.

PRÓLOGO

Los proyectos de ingeniería de la actualidad usan con mayor recurrencia productos fotogramétricos tales como Ortofotos y Modelos digitales de Elevación para la ejecución de sus proyectos. Esto es posible gracias al gran avance tecnológico que han alcanzado los vehículos aéreos no tripulados, tanto en sus componentes físicos como en el acelerado avance de la fotogrametría digital ayudado de los algoritmos avanzados como el Structure from motion.

Debido a esta gran demanda generada por la necesidad de información de la superficie terrestre de este país, la fotogrametría con aeronaves controladas remotamente se presenta como una solución de bajo costo y de gran calidad en imágenes ortorectificadas. Sin embargo, la precisión de estos productos fotogramétricos viene siendo motivo de cuestionamientos y dudas por la poca información de libre distribución existente de resultados obtenidos en proyectos reales.

Este trabajo trata de aportar con un granito de arena al desarrollo de la ingeniería del país mostrando específicamente los errores planimétricos y altimétricos obtenidos en un levantamiento fotogramétrico realizado a 5 tramos de carretera sobrevolados con un *dron* muy usado en el medio y analizara si estos errores son tolerables según los términos de referencia de un proyecto típico de carreteras.

Ing. Julio Cruzado Quiroz

Asesor

LISTA DE CUADROS

| | | |
|--------------|---|----|
| Cuadro N° 1 | Tabla que muestra los tipos de RPAS por su peso y uso en el Reino Unido..... | 35 |
| Cuadro N° 2 | Parámetros de vuelo considerados en las quebradas de esta tesis. | 44 |
| Cuadro N° 3 | Cuadro que muestra las coordenadas tomadas con RTK. | 67 |
| Cuadro N° 4 | Cuadro que muestra las coordenadas de los puntos de comparación. | 68 |
| Cuadro N° 5 | Cuadro resumen de la variación de coordenadas tomadas con RTK y con procedimientos fotogramétricos junto a la Raíz del Error Medio Cuadrático. | 70 |
| Cuadro N° 6 | Grafico que muestra un resumen de la precisión planimétrica de la primera muestra que corresponde a la verificación tipo RPA- RPA. | 72 |
| Cuadro N° 7 | Grafico que muestra un resumen de la precisión altimétrica de la primera muestra que corresponde a la verificación tipo RPA- Plano RPA..... | 72 |
| Cuadro N° 8 | Coordenadas de puntos según ubicación de progresiva de alcantarillas de un tramo del proyecto, obtenidos por procedimientos fotogramétricos. | 73 |
| Cuadro N° 9 | Cuadro que muestra las coordenadas de las alcantarillas obtenidas a través de un levantamiento topográfico. | 75 |
| Cuadro N° 10 | Cuadro de variación de coordenadas tomadas con procedimientos fotogramétricos y con un levantamiento topográfico junto a la Raíz del Error Medio Cuadrático. | 76 |
| Cuadro N° 11 | Grafico que muestra un resumen de la precisión planimétrica de la segunda muestra que corresponde a la verificación tipo RPA- Plano Topográfico. | 79 |
| Cuadro N° 12 | Grafico que muestra un resumen de la precisión altimétrica de la segunda muestra que corresponde a la verificación tipo RPA- Plano Topográfico. | 79 |
| Cuadro N° 13 | Tabla que muestra los 41 puntos de control terrestre o fotocontroles usados en la sección 4.2.1..... | 91 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Cuadro N° 14 | Requerimientos básicos de una computadora para su uso en fotogrametría con RPA..... | 95 |
| Cuadro N° 15 | Tabla que muestra el consumo de memoria RAM por el número de fotos a orientar..... | 96 |
| Cuadro N° 16 | Cuadro que muestra el consumo de memoria RAM de acuerdo al número de fotos y calidad en la que se procesara..... | 96 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura N° 1 | En la figura se muestra 3 diferentes maneras de obtener imágenes cuando existe variación en el relieve. (a) Plan de vuelo a altitud constante, (b) Plan de vuelo a distintas alturas constantes, (c) Plan de vuelo siguiendo la variación en la elevación del terreno. | 18 |
| Figura N° 2 | Traslape frontal (o longitudinal) y lateral pertenecientes a un Plan de Vuelo..... | 19 |
| Figura N° 3 | Grabado que representa un estereoscopio de Sir Charles Wheatstone (1802-1875) un científico inglés e inventor de la época victoriana. Fechado en el siglo XIX..... | 20 |
| Figura N° 4 | Plano del levantamiento de la Villa de Buc, Versalles, Francia, 1861..... | 20 |
| Figura N° 5 | Estereocomparador de Pulfrich..... | 21 |
| Figura N° 6 | Stand de la Compañía Kern & Co (en la actualidad Leica) en el Congreso de la ISPRS en Kyoto, 1988..... | 23 |
| Figura N° 7 | Ejemplo de un Modelo Digital de Terreno (en versión 3D) donde la variación de color representa la variación de altitud. | 24 |
| Figura N° 8 | Representación de las Curvas de nivel. | 25 |
| Figura N° 9 | Ortofoto obtenida del Km 44+200 del eje del proyecto, creada a partir de fotografías capturadas por una aeronave Phantom 4 Pro. | 25 |
| Figura N° 10 | En la figura central se observa la representación digital en pixeles de una Imagen análoga y en el lado derecho se tiene la codificación de la misma imagen análoga. | 26 |
| Figura N° 11 | Grafico que muestra la relación entre un pixel y el valor del GSD. | 27 |
| Figura N° 12 | Ejército austriaco en un intento de ataque con globos aerostáticos no tripulados, cargando bombas para lanzarlas a la ciudad italiana de Venecia..... | 28 |
| Figura N° 13 | RPAS Havilland Queen Bee K4227, Reino Unido, 1935. | 28 |
| Figura N° 14 | RPAS AAI RQ-2 Pioneer, 1980, de fabricación israelí. | 29 |
| Figura N° 15 | UAV MQ-1 Predator de General Atomics, USA, 1995. | 29 |
| Figura N° 16 | Prototipo del primer modelo del Yamaha R-50 de uso agrícola. | 30 |

| | | |
|--------------|--|----|
| Figura N° 17 | RPA de tipo ala fija Modelo eBee de SenseFly..... | 31 |
| Figura N° 18 | RPAS Vapor 55, de fabricación Norteamericana. | 32 |
| Figura N° 19 | RPAS Inspire 2 del fabricante DJI..... | 32 |
| Figura N° 20 | Diagrama de tipo de estructuras en motores de multicópteros... 33 | |
| Figura N° 21 | Presentación de nuevos modelos híbridos de RPA en ferias tecnológicas. En la imagen la aeronave híbrida Muninn VX1 de la Compañía Sky-Watch..... | 34 |
| Figura N° 22 | Ejemplo de Controlador de vuelo marca Goolsky. | 38 |
| Figura N° 23 | Diagrama de las partes de la aeronave Phantom 4 Pro en una vista lateral. | 38 |
| Figura N° 24 | Diagrama de las partes de la aeronave Phantom 4 Pro vista de atrás. | 39 |
| Figura N° 25 | Diagrama de la partes del Control Remoto (RC), vista frontal. ... | 39 |
| Figura N° 26 | Diagrama de la partes del Control Remoto (RC), vista lateral derecha..... | 40 |
| Figura N° 27 | Diagrama de la partes del Control Remoto (RC), vista lateral izquierda. | 40 |
| Figura N° 28 | Cámara y estabilizador del Phantom 4 Pro. | 41 |
| Figura N° 29 | Ejemplos de dianas de puntos de control (GCP)..... | 43 |
| Figura N° 30 | Captura de pantalla mostrándose un plan de vuelo en el software Map Pilot, donde se está programando al RPA para volar a una altura constante de 164m sobre el terreno. | 43 |
| Figura N° 31 | Uso del software Geosetter para ubicar la posición de imágenes captadas por la aeronave Phantom 4 pro..... | 45 |
| Figura N° 32 | Pestaña Flujo de trabajo y Añadir fotos. | 47 |
| Figura N° 33 | Botón Abrir para insertar las fotografías. | 48 |
| Figura N° 34 | Imágenes cargadas en el software. | 48 |
| Figura N° 35 | Paso para la reproyección de coordenadas. | 49 |
| Figura N° 36 | Coordenada re proyectadas..... | 49 |
| Figura N° 37 | Paso para la orientación de fotografías. | 50 |
| Figura N° 38 | Ingreso manual de puntos de control o marcadores. | 51 |
| Figura N° 39 | Importar puntos de control o marcadores desde un archivo con formato de texto..... | 51 |
| Figura N° 40 | Colocación de marcadores en las fotografías cargadas. | 52 |
| Figura N° 41 | Optimización de las orientaciones de las cámaras. | 53 |

| | | |
|--------------|---|----|
| Figura N° 42 | Ventana de procesamiento para crear la nube de puntos densa. | 53 |
| Figura N° 43 | Menú de edición de Point Cloud y de Malla. | 54 |
| Figura N° 44 | Nube de puntos editada. | 54 |
| Figura N° 45 | Malla generada a partir de la nube de puntos densa. | 55 |
| Figura N° 46 | Pestaña de flujo de trabajo desplegada..... | 56 |
| Figura N° 47 | Ventana crear modelo de elevación digital. | 56 |
| Figura N° 48 | Curvas de nivel sobre el modelo digital de elevación..... | 57 |
| Figura N° 49 | Ventana crear Ortomosaico. | 57 |
| Figura N° 50 | Nube de puntos generada con Fotogrametría de una RPA unida a puntos generados por topografía tradicional en la Quebrada ubicada en el Km 44+200 que a la vez cruza el eje proyectado. | 58 |
| Figura N° 51 | Grafico que muestra un plano topográfico con sus respectivos detalles planimétricos y curvas de nivel..... | 59 |
| Figura N° 52 | Monumentación de puntos de control tras una granizada leve (4742 m.s.n.m.)..... | 61 |
| Figura N° 53 | Eje del proyecto cerca de la localidad de Huari (3778 m.s.n.m.). | 62 |
| Figura N° 54 | Eje del proyecto a un lado de la vía y de la localidad de Huayhuay (4010 m.s.n.m.)..... | 62 |
| Figura N° 55 | Mapa de ubicación del proyecto. | 63 |
| Figura N° 56 | Ejemplo de zona sobrevolada, con todos sus puntos de control. En el proceso de restitución se usaran solo los puntos de color azul. | 64 |
| Figura N° 57 | Ejemplo de traslape de zona levantada con topografía tradicional (Plano topográfico) y otra levantada con una RPA (Ortofoto)..... | 66 |

LISTA DE SÍMBOLOS Y DE SIGLAS

| | |
|---------|---|
| DEM: | Digital Elevation Model |
| DTM: | Digital Terrain Model |
| GCP: | Ground Control Point |
| GNSS: | Global Navigation Satellite System |
| GSD: | Ground Sampling Distance |
| IGN: | Instituto Geográfico Nacional |
| ISPRS: | International Society for Photogrammetry and Remote Sensing |
| PCT: | Punto de Control Terrestre. |
| REMC: | Raíz del Error Medio Cuadrático. |
| RPA: | Remotely Piloted Aircraft |
| RPAS: | Remotely Piloted Aircraft System |
| RTK: | Real Time Kinematic |
| SIG: | Sistema de Información Geográfico |
| TIFF: | Tagged Image File Format |
| TIN: | Triangulated Irregular Network |
| UAV: | Unmanned Aerial Vehicle |
| UTM: | Universal Transverse Mercator |
| WGS 84: | World Geodetic System 1984 |
| VANT: | Vehículo Aéreo No Tripulado |

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

La representación de la superficie terrestre en planos a escala para la elaboración y ejecución de proyectos viales, urbanísticos, mineros entre otros, siempre han sido una necesidad para el desarrollo del país y para realizar esta representación del terreno se han utilizado diferentes procedimientos a través del tiempo así como diferentes herramientas y equipamientos que han ido evolucionando y mejorando en su precisión. Una de estas herramientas que se usa para obtener superficies topográficas y que se ha usado durante mucho tiempo ha sido la fotografía aérea y la fotogrametría, pero por el elevado costo de los vuelos solo se utilizaban para proyectos de gran envergadura o en situaciones muy específicas.

En los últimos años se ha visto un gran auge de las llamados Aeronaves Piloteadas Remotamente (RPA), los cuales se han vuelto mucho más estables en el aire, tienen mayor autonomía de vuelo, capacidad de llevar cámaras y sobretodo se ha reducido el costo de estos. A esto se suma el mejoramiento y automatización de los programas de cómputo de restitución fotogramétrica lo que ha permitido que estos análisis puedan ser realizados hasta por un no experto en el tema, por lo que se ha vuelto mucho más accesible y atractivo el uso de esta tecnología para la supervisión de obras, rutinas arqueológicas, agricultura, levantamiento de información de superficies, entre otros.

Si bien estos RPA tienen sus limitaciones, apuntan, a ser, con un desarrollo más avanzado, uno de los métodos más usado en la ingeniería del reconocimiento del terreno.

1.2 PROBLEMÁTICA

La topografía tradicional ha tenido avances significativos en la actualidad, pues los instrumentos de medición tales como estaciones totales, escáneres robóticos, entre otros, realizan en la actualidad mediciones más rápidas y con resultados más precisos y confiables para su uso en la planificación de obras civiles. Sin embargo, la necesidad de obtener esta información en el menor tiempo posible y con un alto grado de confiabilidad de los mismos es una problemática constante

tanto de los que demandan el trabajo como de los que lo realizan, pues la constante ejecución de proyectos del país así lo requiere.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general

- Evaluar el desempeño de una aeronave pilotada de forma remota (RPA) Phantom 4 Pro en un levantamiento fotogramétrico para la obtención de nube de puntos y ortoimágenes usados en el diseño de carreteras.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir el procedimiento de toma de información con el RPA en campo.
- Describir el procedimiento para la generación de nube de puntos y ortoimágenes con el software a partir de información fotográfica.
- Determinar la precisión de la metodología propuesta con un análisis comparativo.

1.4 HIPÓTESIS

El uso de una aeronave pilotada de forma remota para trabajos de generación de nube de puntos y ortoimágenes, usados en topografía, presentan resultados aceptables de acuerdo a la normativa estándar del país.

CAPÍTULO II: FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1 ASPECTOS GENERALES DE FOTOGRAMETRÍA

2.1.1 Definiciones

Existen diferentes términos y vocablos propios de esta rama de la ingeniería y de los cuales en esta tesis se mencionan en sus diferentes capítulos, gran parte de estas se definen a continuación:

2.1.1.1 *Fotogrametría*

Etimológicamente hablando, este vocablo proviene de la palabra griega *photos* que significa “luz”, *gramma* que significa “lo que está dibujado o escrito” y de la palabra *metrón* que significa “medir”.

Macedo (2009) define a la fotogrametría como una ciencia que resulta de la convergencia de diferentes disciplinas como lo es la óptica, la fotografía, las matemáticas (especialmente la geometría proyectiva), para realizar levantamientos de carácter cartográfico principalmente.

Neira (2005) define a la Fotogrametría como el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales se obtiene la forma y dimensiones de un objeto, deduciéndola a partir de una fotografía o varias del objeto.

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Sensores Remotos (ASPRS), tiene la siguiente definición: “Fotogrametría es el arte, la ciencia y la tecnología de obtener información confiable de objetos físicos y su entorno, mediante el proceso de exponer, medir e interpretar tanto imágenes fotográficas como otras, obtenidas de diversos patrones de energía electromagnética y otros fenómenos”.

De todas estas definiciones notamos que la fotogrametría necesita el apoyo de otras ciencias, conocimientos y procedimientos, para poder obtener la representación de objetos, superficies o formas en tres dimensiones a partir de imágenes de solo dos dimensiones. Esta tesis mostrará esa transición, desde imágenes de dos dimensiones, que serán las fotografías georeferenciadas y el resultado o producto tras un tratamiento fotogramétrico de restitución será la nube

de puntos que representa a la superficie del terreno en tres dimensiones o ejes coordenados.

2.1.1.2 Fotointerpretación

La Fotointerpretación consiste en la identificación y reconocimiento en la toma fotográfica de ciertas formas y elementos dentro de la fotografía usando criterios tales como: la forma del objeto, la textura, el color, el contraste o el relieve. Así al trazar las curvas de nivel, para el caso de una aplicación topográfica, sobre un terreno fotografiado se puede obtener información de la litología, uso del suelo, redes de drenaje, área poblacional, presas, entre otros, del sector fotografiado (Neira, 2005).

2.1.1.3 Levantamiento Fotogramétrico

El levantamiento fotogramétrico consiste en la captura de imágenes desde determinada altura, con una cámara de alta precisión (tiempo de exposición muy corto y obturadores de gran eficiencia), para posteriormente procesarla con un software de restitución fotogramétrica (analógica, analítica o digital). Durante este proceso se genera una representación del relieve en 3D, orientándola y escalándola para ubicarla en el espacio en su posición y tamaño real (Macedo, 2009).

2.1.1.4 Plan de vuelo

La base de un proyecto fotogramétrico o de fotointerpretación se da inicio con un buen plan de toma de fotografías aéreas, pues este tendrá repercusión en la precisión del producto final.

Neira (2005) enumera varios requerimientos (para el caso de la fotogrametría tradicional), entre ellos están:

- Abarcamiento total de cada foto en el terreno
- Distancia entre líneas de vuelo
- Avance entre foto y foto
- Cantidad de líneas de vuelo
- Cantidad de kilómetros lineales
- Cantidad de fotos
- Cantidad de metros de película

- Calculo del tiempo de vuelo
- Calculo de la altura de vuelo
- Hora fotogramétrica

Para el caso de la fotogrametría con RPA, se mantienen la mayoría de estos parámetros, sin embargo hay que tener en cuenta las diferencias que tienen con el tiempo de vuelo (es menor), la distancia recorrida (es menor) y la altura de vuelo (puede ser variable, ver Figura N°1).

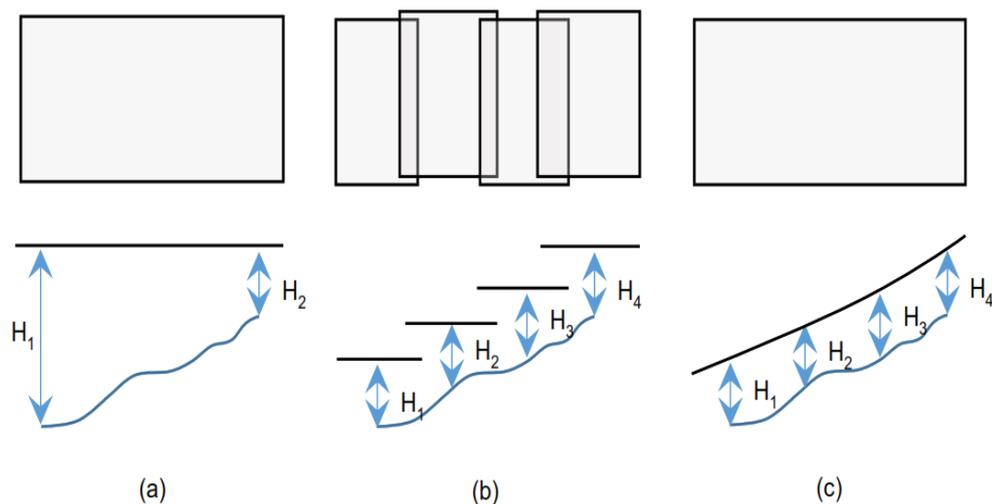


Figura N° 1 En la figura se muestra 3 diferentes maneras de obtener imágenes cuando existe variación en el relieve. (a) Plan de vuelo a altitud constante, (b) Plan de vuelo a distintas alturas constantes, (c) Plan de vuelo siguiendo la variación en la elevación del terreno.

Fuente: Ref. Bibliográfica [4] .

2.1.1.5 Restitución fotogramétrica

La Restitución Fotogramétrica es el procedimiento empleado para extraer detalles cartográficos, de fotografías aéreas, imágenes satelitales y de otras fuentes de información para la preparación de un mapa nuevo o actualizado. La restitución consiste en la conformación precisa de los pares estereoscópicos en un proceso que se denomina orientación de imágenes y en la extracción posterior de los elementos contenidos en ellas mediante unos aparatos llamados estéreo restituidores. La tecnología de restitución ha evolucionado de los primeros restituidores analógicos a los analíticos, luego a los actuales y de última generación que son los restituidores digitales, que en realidad ya no son más que un ordenador con el software adecuado (Jarandilla, 2014).

2.1.1.6 Traslape

Se denomina traslape a superposición parcial de fotografías tomadas desde el vehículo aéreo, este debe ser tanto lateral como frontal (longitudinal). La razón de este traslape es importante pues con este procedimiento se busca conseguir la visión estereoscópica en el caso de la aerofotogrametría tradicional y la reconstrucción de la zona tomada en base a las imágenes para la aerofotogrametría moderna (ver Figura N°2).

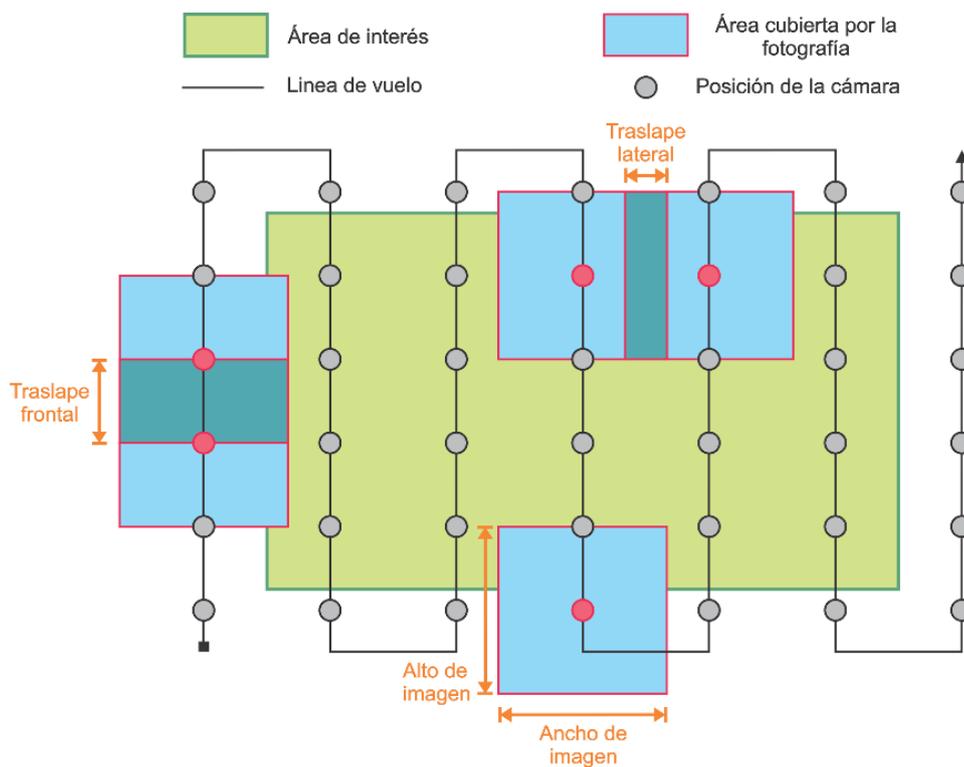


Figura N° 2 Traslape frontal (o longitudinal) y lateral pertenecientes a un Plan de Vuelo.

Fuente: Elaboración propia

2.1.2 Evolución histórica

A continuación se hace una cronología de los sucesos más relevantes de la historia de la fotogrametría, extraídos de la Referencia Bibliográfica [19].

(1838) Charles Wheatstone, físico escocés que describió el fenómeno de la visión tridimensional, construyó un aparato llamado Estereoscopio con el que se podían apreciar dibujos geométricos en relieve. A través de este aparato se introdujo el concepto de la doble imagen (ver Figura N°3).

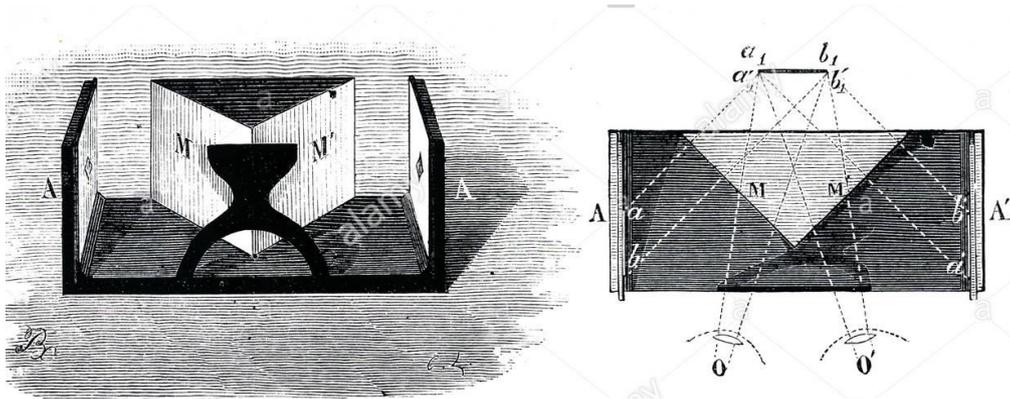


Figura N° 3 Grabado que representa un estereoscopio de Sir Charles Wheatstone (1802-1875) un científico inglés e inventor de la época victoriana. Fechado en el siglo XIX.

Fuente: www.alamy.com

(1851) Aimé Laussedat, inicia las investigaciones para probar la utilidad de la fotografía con fines topográficos. Es considerado el padre de la fotogrametría, la cual definió como “Metrofotografía”. Crea el primer aparato apropiado para ejecutar levantamientos fotogramétricos y el primer método de restitución por intersección.

(1858) Gaspar Félix Tournachon, obtiene la primera foto controlada desde un globo cautivo (globo sostenido por cables del suelo) de una parte de la ciudad de Paris entre el Arco de la Estrella y el Palacio de las Tullerías a 80 metros de altura.

(1861) La Academia de Ciencias de Madrid, convoca al concurso “Aplicaciones de la fotografía al levantamiento de planos”, el cual es ganado por Aimé Laussedat, quien presento el levantamiento de la Villa de Buc (ver Figura N°4).

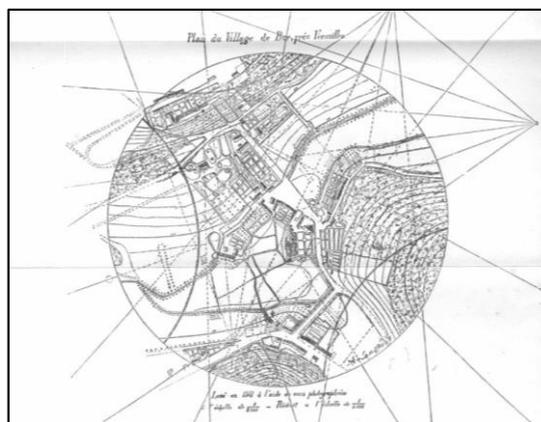


Figura N° 4 Plano del levantamiento de la Villa de Buc, Versalles, Francia, 1861.

Fuente: Ref. Bibliográfica [10]

(1867) Aimé Laussedat, presenta el primer fototeodolito (combinación de teodolito y cámara fotográfica) y enseña el primer plano de Paris levantado por medio de fotografías terrestres.

(1892) Federico Stolze, formula el principio de “la marca o índice flotante” (utilizado para calcular coordenadas en el terreno a partir de puntos homólogos en un par de fotogramas).

(1893) Albrecht Meydenbauer, introduce la utilización de la palabra “fotogrametría” en vez de fotometría, cuando era encargado de la documentación métrica de edificios y patrimonios culturales importantes de Alemania.

(1898) Teodoro Scheimpflug, realiza la invención del doble proyector, obtiene fotomapas eliminando la distorsión por perspectiva de las fotografías aéreas y establece la teoría de la transformación y de la triangulación radial.

(1901) Carlos Pulfrich, inicia la estereoscopía métrica o estereofotogrametría analítica construyendo el estereocomparador, el cual es un método práctico para la medición estereoscópica con marca flotante (ver Figura N°5)

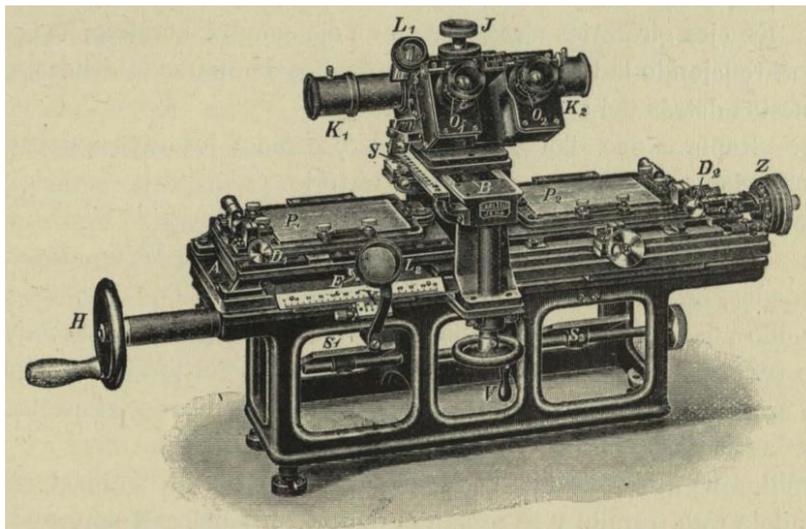


Figura N° 5 Estereocomparador de Pulfrich.

Fuente: www.publicacions.iec.cat

(1909) Von Orel, inventa el “estereoautógrafo”, este agregó al estereocomparador de Pulfrich unas reglas metálicas complementarias, lo que permitió una solución altamente creativa, para trazar automáticamente las curvas de nivel, mientras se

hacia el recorrido visual. Este prototipo da inicio a una serie de instrumentos que permitieron la mecanización en la cartografía a partir de fotografías.

(1940) El gran desarrollo de la fotogrametría se da en su utilización con fines bélicos durante la segunda guerra mundial. Como ejemplo tenemos la ofensiva alemana sobre territorio francés, esta fue ejecutada luego de intensos trabajos de reconocimiento aéreo de todas las instalaciones militares, principales edificios gubernamentales, aeropuertos, infraestructura básica y redes de transporte terrestre.

(1950) Russel Bean, perfecciono y desarrollo nuevos ortoproyectores (para producir ortofotos) analógicos para el Servicio Geológico en Estados Unidos.

(1958) Vhilo Helava, propone la construcción de restituidores analíticos, reemplazando los componentes óptico-mecánicos por servomecanismos.

(1978) D.J. Panton, describió un algoritmo para la comparación de imágenes de densidades de imágenes estéreo digitales. El algoritmo incluye un procedimiento de coincidencia de imágenes en el que los componentes de paralaje se determinan mediante la correlación automática de las imágenes correspondientes.

(1981) T. Sarjakoski, describe el primer restituidor completamente digital. Su idea era usar un estereoploteador en el que las fotografías analógicas sean reemplazadas por memorias de imágenes digitales.

(1982) J. B. Case, muestra el diseño de un prototipo de un Sistema Fotogramétrico Digital (Digital Stereo Comparator / Compiler) "DSCC".

(1988) En el Congreso de ISPRS en Kyoto, se muestra la primera estación de trabajo estereofotogramétrica digital comercial, la Kern DSP1, cuyo sistema de mapeo completamente digital utiliza imágenes estéreo digitales como entrada y un sistema de medición completamente digital para permitir la extracción de información de coordenadas 3D (ver Figura N°6).

(2000) Se presentaron las primeras cámaras digitales fotogramétricas comerciales, 12 años después de la presentación del primer sistema fotogramétrico digital.



Figura N° 6 Stand de la Compañía Kern & Co (en la actualidad Leica) en el Congreso de la ISPRS en Kyoto, 1988.

Fuente: www.isprs.org

(2000 - Actualidad) Los vuelos fotogramétricos poco a poco fueron desplazados por imágenes de satélite con GSD de hasta 25 cm. Los sensores *Lidar*, que es un sistema de captura masiva de nube de puntos 3D, también han ganado terreno desde inicios de siglo. Las plataformas aerotransportadas no tripuladas (UAV) son ahora también uno de los campos de mayor interés en área de la teledetección actual.

2.1.3 Productos fotogramétricos

2.1.3.1 Modelo Digital de Terreno (MDT)

Hay diversas formas de representar gráficamente la topografía y el relieve de una porción de la superficie terrestre, una de ellas es a través de un modelo digital de terreno (ver Figura N°7).

Felicísimo (1994) define al modelo digital de terreno como una estructura o conjunto de datos numéricos (generalmente capas raster) que describe la distribución espacial de una característica del territorio. Un raster es una matriz de celdas, también denominadas píxeles, organizadas en filas y columnas. Cada celda de una matriz representa una unidad de área cuadrada y contiene un valor numérico que es una medida o una estimación correspondiente a esa ubicación.

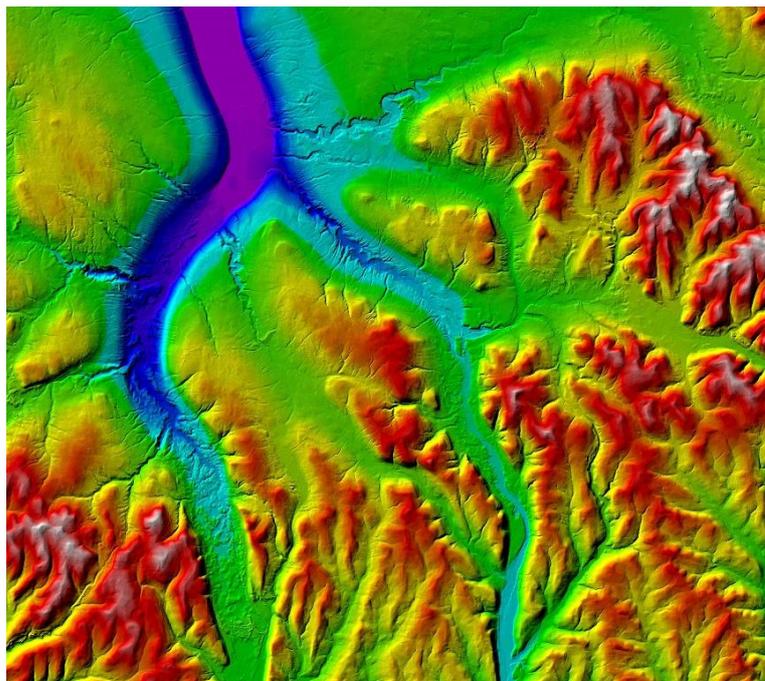


Figura N° 7 Ejemplo de un Modelo Digital de Terreno (en versión 3D) donde la variación de color representa la variación de altitud.

Fuente: www.alpinequest.net

Estos MDT tienen diferentes aplicaciones, entre ellos tenemos:

- Creación de mapas en relieve
- Cartografía base
- Agricultura de precisión
- Extracción de parámetros de terreno

2.1.3.2 Curvas de Nivel

Otra forma de representar porciones de territorio en planos de dos dimensiones es a través de las curvas de nivel.

Mendoza (2008) define a la curva de nivel como una línea imaginaria que une los puntos que tienen igual cota respecto a un plano de referencia (generalmente el nivel medio del mar).

Es decir que sobre la superficie de un plano del tipo topográfico se podrá representar el espacio geográfico de manera tridimensional sin necesidad de crear modelos sólidos, como por ejemplo maquetas (ver Figura N°8).

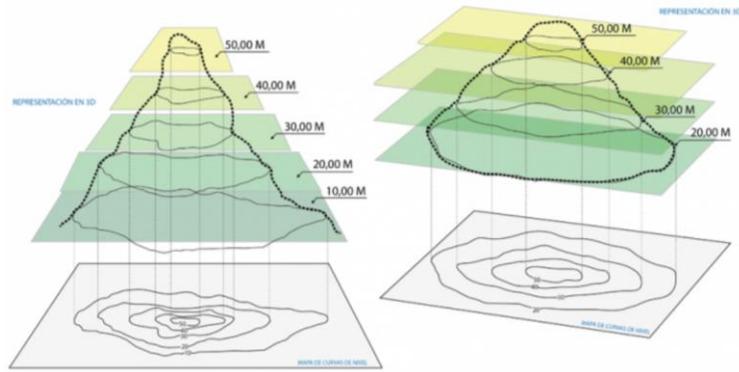


Figura N° 8 Representación de las Curvas de nivel.

Fuente: www.infoacueductos.producr.ac.cr

2.1.3.3 Ortofoto

Una ortofoto es la presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, donde cada elemento presenta la misma escala, sin deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico (ver Figura N°9).

Una ortofoto u ortofotografía se obtiene a través de un proceso de unión de imágenes (tomadas desde un avión, un satélite o un RPA), que han sido corregidas u ortorectificadas para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva y en la que es posible realizar mediciones exactas, a diferencia de una fotografía aérea simple, que siempre presentará deformaciones causadas por la perspectiva de la cámara, la altura o la velocidad a la que se mueve la cámara.

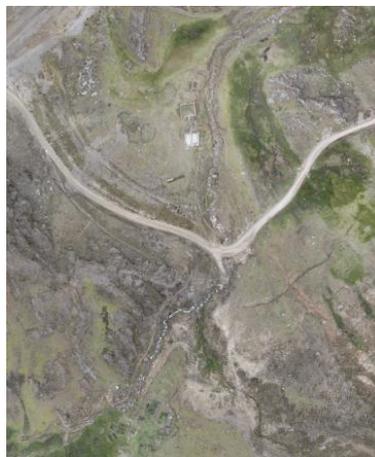


Figura N° 9 Ortofoto obtenida del Km 44+200 del eje del proyecto, creada a partir de fotografías capturadas por una aeronave Phantom 4 Pro.

Fuente: Elaboración propia

2.2 AERONAVES CONTROLADAS DE FORMA REMOTA (RPA)

En la actualidad la tecnología de vehículos aéreos no tripulados (VANT o UAV), comúnmente llamados drones, está desarrollando y reemplazando procedimientos que tenían como base la fotografía aérea contemporánea, en este caso, estas aeronaves de alta tecnología se muestran como una alternativa mucho más económica en tiempo y costo para obtener información topográfica, mediante la aplicación de técnicas fotogramétricas.

2.2.1 Terminología

2.2.1.1 RPA y RPAS

Las siglas RPA vienen del inglés *Remotely Piloted Aircraft*, que traducido al español significa aeronave piloteada remotamente. Estos están necesariamente controlados por alguien de manera remota a través de sistemas de vuelo asistido o pilotos automáticos, pero siempre con la supervisión de una persona capaz de controlar esta aeronave en cualquier momento del vuelo (Ref. Bibliográfica [8]).

Cuando hablamos de un RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) nos referimos a un sistema más completo necesario para la correcta operación de la aeronave y están compuestos de: la aeronave, la estación de mando o control y los equipos de comunicación necesarios (Ref. Bibliográfica [7]).

2.2.1.2 Pixel

Esta palabra proviene del acrónimo en inglés *picture element*, o en español elemento de imagen y se define como la menor unidad homogénea o unidad básica de color o gris que forma parte de una imagen digitalizada (ver Figura N°10).

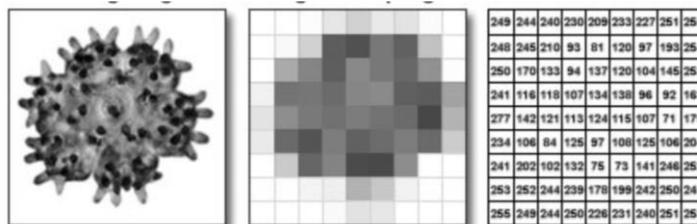


Figura N° 10 En la figura central se observa la representación digital en pixeles de una Imagen análoga y en el lado derecho se tiene la codificación de la misma imagen análoga.

Fuente: hamamatsu.magnet.fsu.edu

2.2.1.3 GSD

La sigla GSD proviene del inglés *Ground Sample Distance*, traducida al español hace referencia a la distancia de muestreo desde el suelo, es decir el GSD define cuanta distancia en el terreno cubre un pixel de la ortofoto, cuanta más distancia se cubra, es decir, a mayor GSD (esto ocurre cuando la altura de vuelo es mayor o cuando la cámara es de menor resolución), la calidad del terreno cubierto disminuirá (ver Figura N°11).

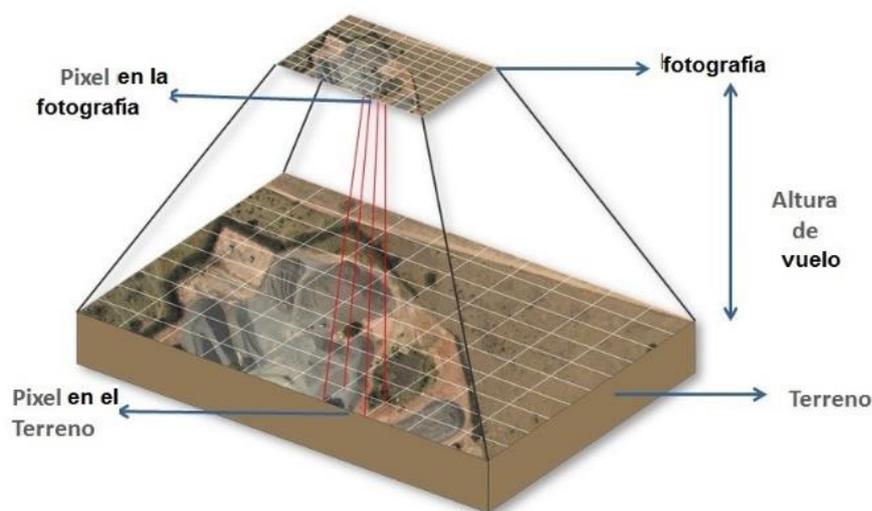


Figura N° 11 Grafico que muestra la relación entre un pixel y el valor del GSD.

Fuente: www.icgeo.org

2.2.2 Historia

Los vehículos aéreos no tripulados son tan antiguos como los sistemas aéreos si tripulados, se puede decir que cada vez que ha habido una innovación en el mundo de la aviación, en muy poco tiempo se ha trasladado este avance a los RPAS. Los orígenes reconocidos del uso de estos RPAS se datan del año 1849, año en el que los austriacos intentaron atacar Venecia usando globos aerostáticos no tripulados, no teniendo éxito (ver Figura N°12). Desde entonces el desarrollo de estos sistemas ha venido casi a la par.

Tradicionalmente los RPAS han estado especialmente dirigidos al mundo militar. Por los años 1930 los británicos desarrollaron algunos avances tecnológicos que son una consecuencia de que se les conozca popularmente ahora como drones, pues la armada británica desarrolló un sistema que se denominó *Queen Bee*

(abeja reina en español) (ver Figura N°13) y al mudarse esta tecnología a los EE.UU se denominó *drone* (que en español se refiere al *zángano*, o el macho de la abeja), manteniendo este nombre hasta la actualidad.

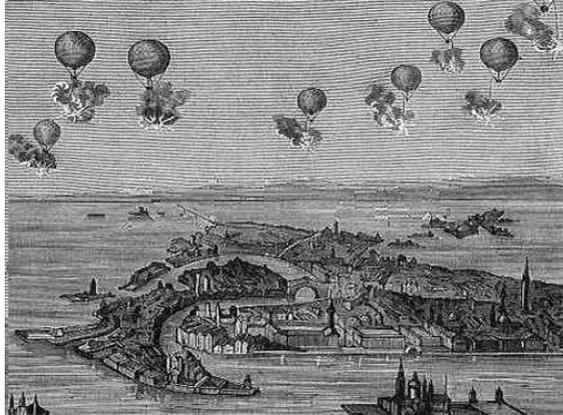


Figura N° 12 Ejército austriaco en un intento de ataque con globos aerostáticos no tripulados, cargando bombas para lanzarlas a la ciudad italiana de Venecia.

Fuente: www.eldrone.es

En el mundo militar los RPAS se consideran especialmente indicados para misiones del tipo DDD (Dangerous, Dirty, Dull; o en español: peligrosas, sucias, aburridas), pues en este tipo de misiones el hecho de que el piloto no se encuentra a bordo es una gran ventaja (Ref. Bibliográfica [13]).



Figura N° 13 RPAS Havilland Queen Bee K4227, Reino Unido, 1935.

Fuente: <http://www.vintagewings.ca>

Después de estos primeros comienzos, el desarrollo real de los RPAS en el mundo militar se produjo especialmente a partir de los años 70 del siglo pasado, coincidiendo con la revolución de la microelectrónica. En aquel momento el país más desarrollado en cuanto a RPAS fue Israel (luego de las lecciones aprendidas

en la Guerra de *Yom Kipur* en 1973) y utilizó esta tecnología en el conflicto llamado Primera Guerra del Líbano en 1982 donde fue decisiva la intervención de estos vehículos teledirigidos (ver Figura N°14). Pero realmente es partir de la pasada década y durante la guerra de Afganistán (en esta guerra los UAV *Predator*, ver Figura N°15, daban información visual en tiempo real de objetivos en tierra a los aviones de combate americanos para iniciar un ataque desde el aire) donde los RPAS han adquirido el auge que tienen en la actualidad (Ref. Bibliográfica [3]).



Figura N° 14 RPAS AAI RQ-2 Pioneer, 1980, de fabricación israelí.

Fuente: www.eldrone.es

En el mundo civil, los RPAS se han utilizado, desde hace mucho tiempo, como artículos de recreo de aeromodelistas. Estos llevan muchas décadas utilizando aeronaves a control remoto y son evidentemente los precursores de los RPAS en el mundo civil, siendo la principal diferencia entre un aeromodelo y un RPAS la función que cumple, porque tanto uno como el otro pueden ser muy sofisticados (Ref. Bibliográfica [13]).



Figura N° 15 UAV MQ-1 Predator de General Atomics, USA, 1995.

Fuente: www.militaryfactory.com

Uno de los primeros países que desarrollo de manera seria una aplicación civil para los RPAS fue Japón. Por los años 1980 la empresa Yamaha recibió el encargo del Ministerio de Agricultura japonés para que desarrollara un sistema que permitiera la fertilización de los cultivos (ver Figura N°16). Hasta hace unos años Japón era el país más desarrollado en este rubro, pues contaba con más de 7000 pilotos habilitados para operar 2500 RPAS producidos por la empresa Yamaha especialmente para fumigación de cultivos (Ref. Bibliográfica [3]).



Figura N° 16 Prototipo del primer modelo del Yamaha R-50 de uso agrícola.

Fuente: global.yamaha-motor.com

Después de Japón, la siguiente región en tener un desarrollo en las aplicaciones civiles fue y es en la actualidad Europa. Por el año 2009 el Reino Unido publico la primera regulación de uso de RPAS para uso civil en el mundo y desde ahí fue un auténtico boom el desarrollo comercial de los RPAS, pues para fines del 2015 ya había más 5000 empresas operadoras que pueden prestar servicios legales en toda Europa. En Europa la principal aplicación en este momento es la audiovisual, pues los RPAS se usan fundamentalmente para realizar reportajes televisivos, noticias, documentales, anuncios, cinematografía, cartografía entre otros. Este último ha tenido un enorme desarrollo en los últimos años. En estos momentos casi todos los trabajos de cartografía en Europa se realizan con RPAS.

2.2.3 Clasificación

En el mundo de las RPA existe una amplia gama de estos y varían de acuerdo a diseño, características de vuelo, peso y tamaño, por lo que es necesario elaborar una clasificación que recoja, si es posible, a todos las RPA y los agrupe entre ellos

en función de sus particularidades más comunes. En esta tesis se han establecido dos clasificaciones independientes: por tipo y por peso.

2.2.3.1 Clasificación por tipo

Tipo Avión

Este tipo de aeronave basa su sustentación en el principio de ala fija. Puede tener o no algún sistema de propulsión tales como hélices o turbinas (ver Figura N°17).

Tiene como ventaja una mayor autonomía y la posibilidad de una mayor velocidad de desplazamiento comparada con los otros tipos, si su diseño así lo pretende (hay aviones construidos para mantenerse en el aire volando a bajas velocidades mientras que otros diseños buscan ser eficaces volando más rápido, esto ira en función de la tarea para la que se vaya a emplear).

Como desventaja, cabe mencionar su incapacidad de vuelo estacionario, Es decir no posee la capacidad de mantenerse detenido en el aire, teniendo limitado su desplazamiento en un solo sentido (hacia adelante) (Ref. Bibliográfica [7]).



Figura N° 17 RPA de tipo ala fija Modelo eBee de SenseFly.

Fuente: tecnitop.com

Tipo Helicóptero

Este tipo de aeronave basa su sustentación en las alas giratorias. Consta de uno o dos rotores sustentadores, que pueden variar el ángulo de sus hélices para hacer maniobras (ver **Figura N°18**).

Las ventajas de este tipo de aeronave es 1) La capacidad para mantenerse en vuelo estacionario y 2) Poder deslizarse a lo largo de los tres ejes coordenados, teniendo así total libertad de movimiento.

La desventaja de esta aeronave es que ofrece menor autonomía que el tipo avión y una mayor complejidad mecánica (lo cual hace del mantenimiento algo más costoso y complicado) (Ref. Bibliográfica [7]).



Figura N° 18 RPAS Vapor 55, de fabricación Norteamericana.

Fuente: www.pulseaero.com

Tipo Multirotor

Este tipo de aeronave basa su sustentación en el principio de las alas giratorias al igual que el tipo helicóptero. La diferencia se encuentra en la cantidad de rotores, pues este tipo de aeronave viene con más de dos, necesarios para generar la sustentación necesaria para volar. Las hélices son de paso fijo. Para maniobrar varía la velocidad de giro de los rotores (ver Figura N°19).

La ventaja de este tipo de aeronave es que le da una mayor estabilidad al vuelo y sus elementos mecánicos son más sencillos que los de tipo helicóptero (traduciéndose a un menor mantenimiento y con inferiores posibilidades de avería). Su desventaja, menor autonomía que la del tipo avión, como ocurre con el tipo helicóptero (Ref. Bibliográfica [7]).



Figura N° 19 RPAS Inspire 2 del fabricante DJI.

Fuente: www.dji.com

Las estructuras más usuales en el mercado tienen una gama de modelos así como distribución de rotores (Estrella de tres puntas, en forma de “X”, rueda en 6 y en 8). En la Figura N°20 la estructura típica de diferentes multicópteros en el mercado actual.

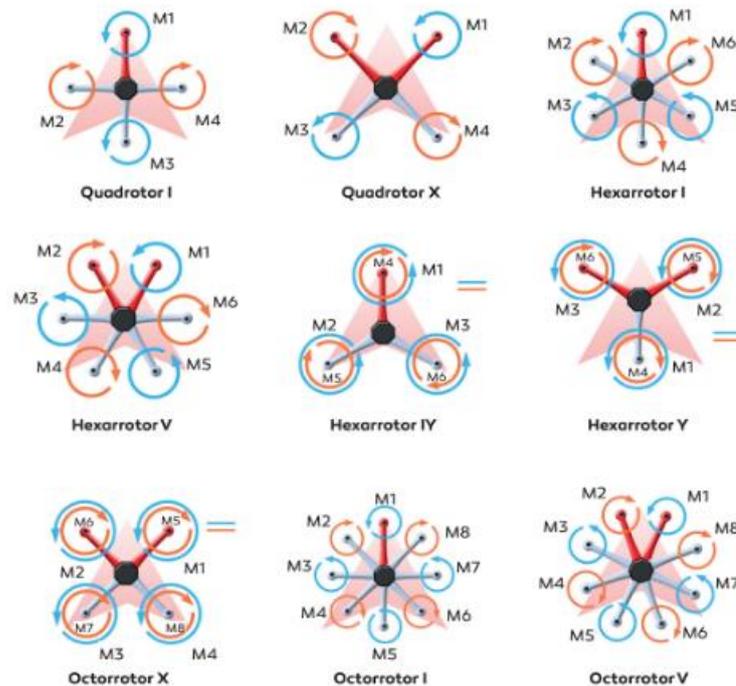


Figura N° 20 Diagrama de tipo de estructuras en motores de multicópteros.

Fuente: Ref. Bibliográfica [8] .

Tipo Híbrido

Los modelos de RPA híbridos son drones de última generación y de la más avanzada tecnología, así como también de las menos difundidas en el mercado actual de las aeronaves no tripuladas. La mayoría de los diseños de este tipo de aeronaves están aún en fase de experimentación y desarrollo, siendo los más avanzados los utilizados en el sector militar. Actualmente se emplean en cometidos tácticos dentro de misiones militares o de investigación.

En este tipo de aeronaves, se mezclan los distintos tipos de fuerza de sustentación, característicos de diferentes tipos de RPA, tanto de ala fija como el de multirrotores. La combinación de estos sistemas controlados electrónicamente, aporta nuevas capacidades al RPA resultante, mejorando su control de posición, capacidad de sustentación y su maniobrabilidad (ver Figura N°21).

Como ventaja tendría la reducción al mínimo la limitante del sistema despegue / aterrizaje y así operar desde cualquier superficie.



Figura N° 21 Presentación de nuevos modelos híbridos de RPA en ferias tecnológicas. En la imagen la aeronave híbrida Muninn VX1 de la Compañía Sky-Watch.

Fuente: www.dtu.dk

2.2.3.2 Clasificación por peso

Este tipo de clasificación es la más común. La normativa de los diferentes países clasifica a los sistemas aéreos controlados de forma remota (RPAS) de manera diversa pues el uso que se les da y la cantidad de estos varía de país en país. Debido a esto es imposible categorizarlos de manera definitiva pues continuamente se vienen desarrollando nuevos modelos todo el tiempo.

Una de estas clasificaciones se muestra en el Cuadro N°1, en ella se tipifica a estas aeronaves por su peso, tamaño y precio aproximado en el Reino Unido (Ref. Bibliográfica [5]).

2.2.4 Usos y aplicaciones

Las aeronaves pilotadas de forma remota tienen un gran potencial de uso en diferentes áreas, pues tienen la capacidad de desplazarse por zonas inaccesibles incluso evitando obstáculos para darnos una vista en tiempo real del lugar por donde sobrevuelan, haciendo uso de los diferentes sensores y equipamiento con el que cuenta.

Cuadro N° 1 Tabla que muestra los tipos de RPAS por su peso y uso en el Reino Unido.

| CATEGORÍA (Peso Aproximado) | APLICACIONES ACTUALES Y POTENCIALES | PRECIO Y CANTIDAD |
|---|--|--|
| Micro / Nano / Miniatura / RPAS de juguete (unos cientos de gramos) | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de ocio • Uso comercial (Vigilancia e inspección de zonas de difícil acceso) • Capacidad de vuelo limitada debido a la mala duración de la batería | <ul style="list-style-type: none"> • Disponible para comprar en la calle y en línea • Aprox £100 para uso de ocio • Aprox. £10,000 para uso especializado • Se estima que son decenas de miles de juguetes como RPAS en el Reino Unido |
| RPAS Pequeño (< 2Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Uso de ocio • Uso comercial (Fotografía) | <ul style="list-style-type: none"> • £100 - £900 • Se estima que son miles en el Reino Unido. |
| RPAS Pequeño (2-7 Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Principalmente de uso comercial (Fotografía, inspección y topografía aérea) • Grandes modelos recreacionales también disponibles | <ul style="list-style-type: none"> • £500 - £4,000 • Aproximadamente 360 unidades utilizadas comercialmente |
| RPAS Pequeño (7-20 Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Principalmente de uso comercial (Fotografía, inspección y topografía aérea) • Algunos modelos recreativos especializados producidos | <ul style="list-style-type: none"> • £4,000 - £20,000 • Aproximadamente 150 unidades utilizadas comercialmente |
| RPAS Ligero (20-50 Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Potencial para inspeccionar tuberías y cables de alimentación, rociadores de cultivos, búsqueda y rescate | <ul style="list-style-type: none"> • £40,000 - £100,000 dependiendo de la resistencia y la tecnología • 2 unidades utilizadas comercialmente |
| RPAS Ligero (50-150 Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Posibilidad de vigilancia de fronteras, monitoreo de incendios forestales. | <ul style="list-style-type: none"> • Pocos para uso comercial • Menor a £300,000 dependencia o requisitos de certificación de aeronavegabilidad |
| RPAS Grande (>150 Kg) | <ul style="list-style-type: none"> • Potencial para el transporte de carga • Posibilidad de permanecer en el aire durante días y viajar miles de millas | <ul style="list-style-type: none"> • Precio mayor a las £500,000 • Ninguno utilizado comercialmente en la actualidad. |

Fuente: Adaptado de <http://www.parliament.uk/civil-rpas>

Veamos algunos de los campos de la ingeniería en los que desempeñan los RPAS:

2.2.4.1 Uso en la Topografía

La topografía aérea realizada con estas aeronaves es una alternativa eficaz cuando se trata de obtener topografía de grandes extensiones de terreno o de

zonas accidentadas y de difícil acceso, pues ahorra significativamente los recursos y el tiempo del personal en campo (Ref. Bibliográfica [17]).

En el desarrollo de esta tesis se detallara los procedimientos que se siguen para realizar este tipo de levantamientos.

2.2.4.2 Uso en la Gestión de Recursos Naturales

En esta área estas aeronaves son usadas principalmente en el monitoreo de áreas protegidas detectando amenazas de caza furtiva y deforestación. En la parte hidrológica permite identificar la salud ecológica de las masas de agua, mapeo de tierras de regadío y planificación de cuencas hidrográficas (Ref. Bibliográfica [17]).

2.2.4.3 Uso en la Agricultura

En esta área estas aeronaves, a través de imágenes ortorectificadas, realizan el conteo de plantas y especies, tipo de suelo, humedad de suelo, altura de plantaciones, deficiencia de nutrientes entre otros. Con todas estas variables podemos conocer el índice NDVI, este permite estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación (Ref. Bibliográfica [17]).

CAPÍTULO III: ESTRUCTURA Y PROCEDIMIENTOS

En este capítulo se desglosa los diferentes componentes de un proyecto fotogramétrico y como este se va desarrollando para obtener un producto final de calidad fiable.

3.1 RPA PARA FOTOGRAMETRÍA

En levantamientos fotogramétricos realizados con aeronaves pilotadas remotamente es muy común usar los tipos: cuadricóptero (el más usado es del fabricante DJI modelo Phantom) y los ala fija (el más usado es del fabricante Sensefly modelo eBee). Estos son reconocidos por desempeñarse de manera satisfactoria en casi todo los territorios del país.

Para el desarrollo de esta tesis se ha usado el cuadricóptero Phantom 4 Pro y que líneas abajo se da más detalle de su estructura y funcionamiento.

3.1.1 Phantom 4 Pro

Es una aeronave tipo Multirotor, del fabricante chino DJI, fue lanzado al mercado mundial en noviembre del 2016. Tanto este modelo como sus antecesoras (Phantom 2 y 3) han sido usados para realizar trabajos de topografía y cartografía con resultados alentadores. Y es que estos RPA no se limitan a este uso sino que son también utilizados en el sector audiovisual, deportivo, entre otros ya que fueron creados para tener despegues y aterrizajes de alta seguridad. Las especificaciones completas están detalladas en el Anexo A.1.

3.1.1.1 Aeronave

Al interior de la aeronave se encuentran diferentes componentes determinantes para su funcionamiento tales como:

- Controlador de Vuelo
- Baterías
- Hélices
- Luces indicadoras
- Sistema de visión y detección por infrarrojos

Las Figuras N°23 y N°24 muestran los componentes visibles de la aeronave Phantom 4.

De los componentes antes mencionados, el controlador de vuelo (ver Figura N°22) es el más importante pues es el cerebro de la aeronave encontrándose dentro de este el giroscopio (mide la velocidad angular de los cambios de posición del RPA), el acelerómetro (medir la inercia de los movimientos), el barómetro (para conocer la altura de vuelo), el magnetómetro (funciona como una brújula para conocer la dirección a la que apunta el RPA) y el GPS (nos da el posicionamiento real del RPA).

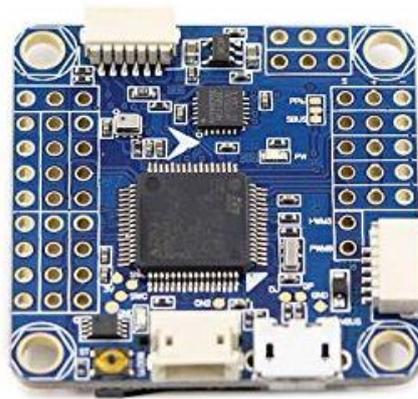


Figura N° 22 Ejemplo de Controlador de vuelo marca Goolsky.

Fuente: www.amazon.es



Figura N° 23 Diagrama de las partes de la aeronave Phantom 4 Pro en una vista lateral.

Fuente: Elaboración propia



Figura N° 24 Diagrama de las partes de la aeronave Phantom 4 Pro vista de atrás.
Fuente: Elaboración propia

3.1.1.2 Control remoto

El control remoto (RC) del Phantom 4 Pro es un dispositivo de comunicación inalámbrica multifunción que integra los sistemas de doble frecuencia de transmisión de video y de control remoto de la aeronave. También cuenta con varias funciones de control de la cámara, como la captura de fotografías y control del estabilizador (gimbal).

El dispositivo (celular o tablet) se comunica con el control remoto a través de un cable USB tipo A por un lado y tipo USB Micro A por el otro (ver Figura N°25, N°26 y N°27).



Figura N° 25 Diagrama de las partes del Control Remoto (RC), vista frontal.
Fuente: Elaboración propia



Figura N° 26 Diagrama de la partes del Control Remoto (RC), vista lateral derecha.
Fuente Elaboración propia.

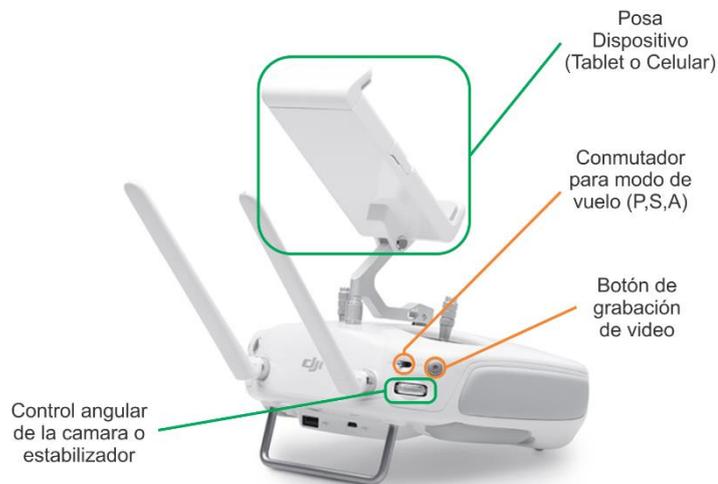


Figura N° 27 Diagrama de la partes del Control Remoto (RC), vista lateral izquierda.
Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.3 Cámara y Estabilizador

La cámara del Phantom 4 Pro utiliza un sensor CMOS de 1 pulgada para capturar imágenes de 20 megapíxeles y video. Tiene una gran variedad de modos de disparo al momento de tomar fotografías. El obturador mecánico con una velocidad máxima de 1/2000 segundos elimina la distorsión del obturador al capturar imágenes de objetos que se mueven rápidamente. Para almacenar las fotografías capturadas, este RPA posee una ranura para tarjetas Micro SD de alta velocidad.

Esta admite tarjetas Micro SD desde los 16 GB hasta los 128 GB (ver *Ranuras para tarjetas* de la Figura N°23).

El estabilizador del Phantom 4 Pro posee 3 ejes que proporcionan una plataforma estable a la cámara acoplada lo que le permite capturar imágenes y videos nítidos y estabilizados. El estabilizador puede inclinar la cámara en un rango de 120° (ver *Control angular de la cámara* de la Figura N°28).



Figura N° 28 Cámara y estabilizador del Phantom 4 Pro.

Fuente: www.dji.com

3.1.2 Manipulación

Para iniciar el vuelo con el Phantom 4 Pro se sigue el siguiente procedimiento:

Colocar las hélices, quitar los 2 seguros de la cámara, colocar la batería de vuelo con carga suficiente, colocar la tarjeta Micro SD para el almacenamiento de las fotografías. Encender la aeronave pulsando el botón que se encuentra en la batería de vuelo. Para esto el Control Remoto debe estar conectado con el dispositivo de visión (celular o tableta) y en el dispositivo a la vez tiene que tener instalado el programa DJI GO 4 para hacer las respectivas calibraciones del equipo y actualizaciones de firmware. Una vez culminado estos, se puede iniciar el vuelo del equipo. Este vuelo inicial será catalogado como un pre-vuelo que evaluara si la aeronave está en estado óptimo para su uso o no. Luego de comprobar que la aeronave se encuentra operativa se procederá con los vuelos programados.

Para su uso en la Topografía es necesaria la ayuda de un programa que realice el plan de vuelo de manera casi automática (en la sección 3.3 se detallara este proceso). De acuerdo a la experiencia del piloto se puede hacer también un plan de vuelo manual con el software DJI GO si es que las condiciones son totalmente adversas (presencia de torres de alta tensión, cables eléctricos a diferentes altitudes, ausencia de internet, entre otros) para realizarlo con un software de plan de vuelo. Una vez agotada la batería (que dura aproximadamente 22 minutos), la aeronave retornara automáticamente al punto de inicio para que se le reemplace la batería y siga con la misión o para indicar que la misión ha concluido.

3.2 PUNTOS DE CONTROL

Para que los resultados obtenidos (nube de puntos y ortoimagenes) tengan una precisión aceptable y correspondan realmente a la superficie que se ha sobrevolado deben de existir en la zona en cuestión puntos de control terrestre (GCP), con su respectiva referencia visual (ver Figura N°29), debidamente georeferenciadas (en coordenadas geodésicas para luego proyectarlas a UTM) con cualquiera de los métodos existentes, de tal manera que pueda ser claramente identificable desde el aire.

Con respecto a la toma de coordenadas, el método más adecuado y práctico es el de navegación cinética satelital en tiempo real (RTK) con señal GPS. Es sabido que estos tienen una excelente precisión en los ejes "X" e "Y", más en el eje "Z" necesita la ayuda de una nivelación geométrica para una mayor precisión. El uso de esta nivelación tendrá mucho que ver con la magnitud del trabajo y del presupuesto, pues el uso de la aeronave aplicado a la topografía debe ser de tiempos menores a los de la topografía convencional.

De la bibliografía revisada, los autores recomiendan diferentes cantidades de GCP y diferentes formas de distribuirlos. Agüero-Vega (2016) recomienda entre 15 a 20 GCP por cada 0.1764 km² para un resultado óptimo, y 4 GCP como mínimo para una restitución fiable. En cuanto a la distribución de los GCP en el terreno, las diferentes referencias bibliográficas revisadas coinciden en una distribución que bordee la zona que se propone a levantar.

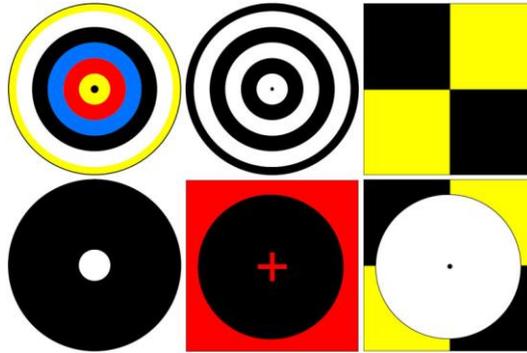


Figura N° 29 Ejemplos de dianas de puntos de control (GCP).

Fuente: www.gisandbeers.com.

3.3 SOFTWARE PARA EL PLAN DE VUELO

Existen diversos softwares que realizan planes de vuelo (los encontramos en las diferentes tiendas de aplicaciones, los hay de paga y gratuitos) y se pueden instalar y usar en Computadoras portátiles, tabletas o celulares. Los más usados y con más aceptación en el país son el *Drone Deploy* (para IOS y Android) y el *Map Pilot* (solo para IOS), ambos de paga.

La diferencia de usar uno u otro radica en la zona en la que se trabajara, para el caso de esta tesis, se trabajó en zonas de difícil acceso y de cambiante orografía, por lo que era necesario tener un software que pueda programarse para que vuele a diferentes alturas en un mismo plan de vuelo (ver Figura N°1). Para este caso es muy útil el software *Map Pilot* (ver Figura N°30).



Figura N° 30 Captura de pantalla mostrándose un plan de vuelo en el software Map Pilot, donde se está programando al RPA para volar a una altura constante de 164m sobre el terreno.

Fuente: www.mapsmadeeasy.com

En la página oficial de *Map Pilot* se muestran ejemplos y tutoriales de cómo realizar planes de vuelo con este software.

Un caso frecuente es el que en la zona de trabajo no haya una conexión continua entre el software de plan de vuelo, el control remoto y la aeronave, eso hará que la misión pueda cancelarse o la aeronave pueda extraviarse. En este caso se recomienda hacer un plan de vuelo manual solo con el control remoto o desplazarse a una zona donde se garantice la conexión continua entre la aeronave y el software.

Otro caso usual es el que no haya conexión a internet en la zona de trabajo. En este caso se precargara los planes de vuelo a realizar o, de acuerdo a la experiencia del piloto, se realizara un plan de vuelo manual para la toma de fotografías.

En el Cuadro N°2 se muestra los valores de los parámetros requeridos en los planes de vuelo y que se usaron en esta tesis.

Cuadro N° 2 Parámetros de vuelo considerados en las quebradas de esta tesis.

| | |
|------------------------------|---------------------------|
| Traslape Lateral | 30% |
| Traslape Longitudinal | 85% |
| Distancia Recorrida | ~400 m (100 m de ancho) |
| Altura de Vuelo | 90 m, 100 m, 120 m, 150 m |

Fuente: Elaboración propia.

3.4 SOFTWARE PARA ADMINISTRACIÓN DE IMÁGENES

Para la verificación y administración de la información fotográfica obtenida por la aeronave podemos usar diferentes softwares que muestren el recorrido alcanzado, la dirección del vuelo y el lugar donde fue tomada la fotografía. Este software optimizara el tiempo que necesitamos para tomar decisiones sobre el manejo de las fotografías tanto en campo como en gabinete. Entre los más usados están: *Geosetter*, *GeoTag*, *Pictomio*, *GeotagEd* (ver Figura N°31).

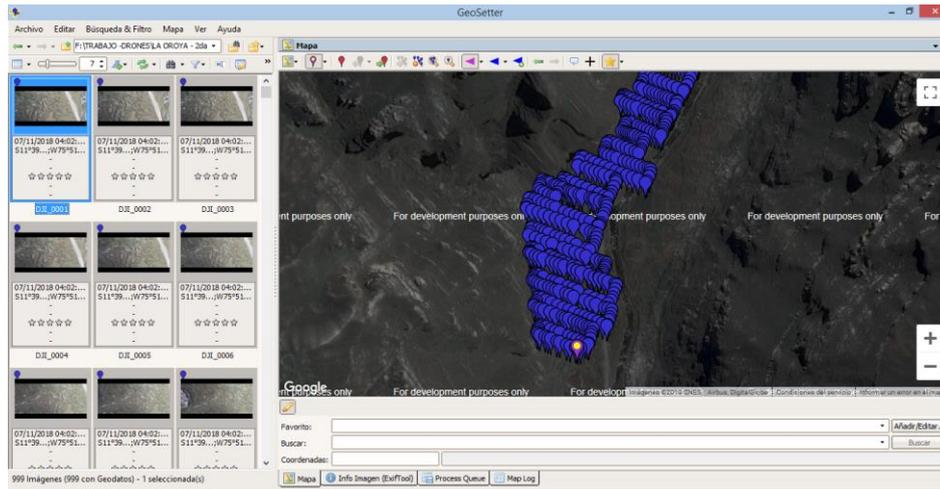


Figura N° 31 Uso del software Geosetter para ubicar la posición de imágenes captadas por la aeronave Phantom 4 Pro.

Fuente: Elaboración propia.

3.5 SOFTWARE PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Una vez obtenida las fotos georeferenciadas a través del plan de vuelo, estas necesitan ser procesadas por un software restituidor. Este generara millones de puntos y sus respectivas posiciones en el espacio buscando correspondencia entre las fotografías tomadas, luego determina cuales son las posiciones probables basándose en los diferentes puntos de vista de un mismo elemento para finalmente limitarla a una sola.

En el mercado actual existen diversos programas que transforman las imágenes en modelos espaciales digitales. Entre los más usados encontramos los siguientes:

- *Agisoft PhotoScan Professional Edition (Actualmente Agisoft Metashape)*
- *Pix4Dmapper*

Estos 2 tienen por característica principal su fácil uso y versatilidad. Los hay de código abierto gratuitos también, entre los más usados están los siguientes:

- *Opendronemap*
- *Visual SFM*

La instalación y uso de estos *Open Source* requiere regulares conocimientos de informática y su flujo de trabajo no es del todo automático, aun así presenta resultados satisfactorios.

En el presente trabajo se usó el software Agisoft PhotoScan Professional Edition en su versión 1.4.0.

3.6 PROCEDIMIENTO DE TOMA DE INFORMACIÓN EN CAMPO

Esta fase del proyecto es crucial, pues si no somos cuidadosos podríamos llegar a la fase de gabinete con fotografías que no puedan reconstruir nada de valor.

También hay que tener en cuenta que la planificación de vuelo va acorde al tipo de proyecto que se va a realizar (Reconstrucción de edificios, uso en la agricultura, carreteras, túneles, terrenos planos, bosques, entre otros). En el caso de esta tesis será un estudio de prefactibilidad para una carretera.

Para el inicio de la toma de información de campo hay que realizar una planificación previa donde se tomaran en cuenta los siguientes puntos:

- Búsqueda de algún trabajo topográfico anterior realizado en la zona y ubicar la red geodésica usada para proceder a actualizarla o dependiendo del proyecto, generar una nueva red.
- A través de las herramientas Google Earth, Street View o Imágenes satelitales planificar los tiempos, recorridos, área a cubrir y alturas de vuelo que cubrirá el RPA en campo.
- Una vez que se haya generado la red geodésica, se procede a señalar los puntos de control ya sea con yeso, dianas u otro material visible. Luego se procede a “tomar” la coordenada respectiva con el procedimiento RTK.
- Una vez señalizada el área que se sobrevolará, se inicia el plan de vuelo con el RPAS, teniendo en cuenta siempre las condiciones meteorológicas y de luminosidad sean las óptimas para el normal desempeño de las labores de campo.
- Se recomienda luego de algunos vuelos, respaldar la información tomada por el RPAS en una memoria externa u otro dispositivo de almacenamiento masivo. También sería prudente revisar si existen fotos desenfocadas, no verticales, que presenten distorsión o planes de vuelo con fotos

incompletas, esto para evitar regresar al campo por las fotos faltantes elevando los costos de trabajo en campo.

3.7 PROCEDIMIENTO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

En esta etapa se necesita tener la información ordenada y completa antes de procesarla. También para obtener un trabajo de buena calidad se requiere, de preferencia, una computadora del tipo WorkStation pues hay un alto consumo de recursos, tanto de la memoria RAM como del procesador del equipo (ver Anexo A.3).

3.7.1 Añadir Fotos

Con esta pestaña se agregan las fotos del plan de vuelo (o de los planes de vuelo). El software no almacenara las fotos, solo indica las fotos que estamos usando. Nos dirigimos a la pestaña *Flujo de trabajo*, desglosamos y buscamos la pestaña *Añadir fotos* (ver Figura N°32). Se selecciona la carpeta donde se encuentran las fotos tomadas por el RPA. Luego se presiona *Abrir* para que carguen las imágenes en el lado izquierdo de la pantalla (ver Figura N°33 y Figura N°34).

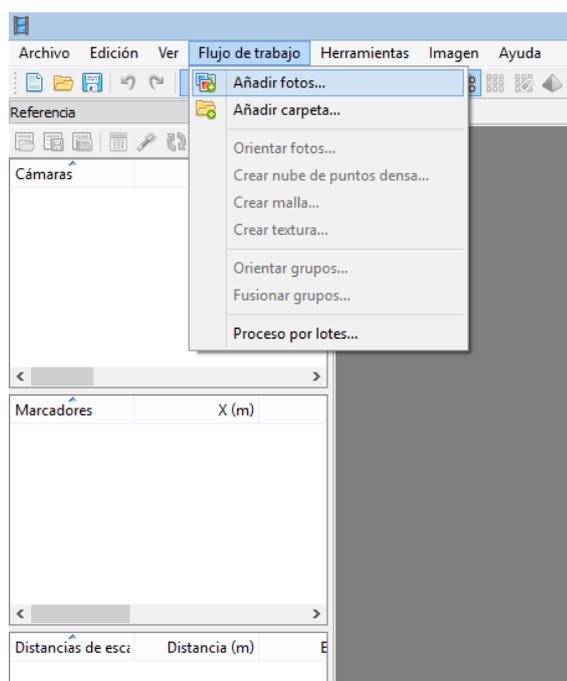


Figura N° 32 Pestaña Flujo de trabajo y Añadir fotos.

Fuente: Elaboración propia.

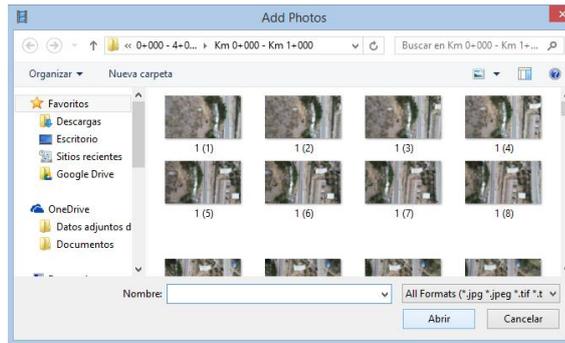


Figura N° 33 Botón Abrir para insertar las fotografías.

Fuente: Elaboración propia.

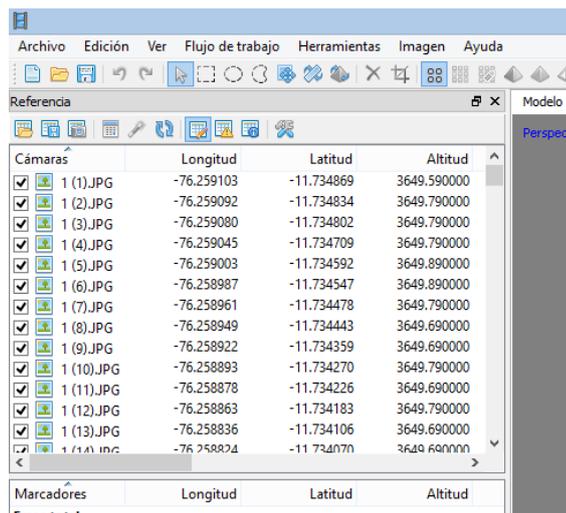


Figura N° 34 Imágenes cargadas en el software.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.2 Reproyección de Coordenadas

El RPA Phantom 4 Pro arroja por defecto las coordenadas de sus fotografías en coordenadas geográficas (sistema geodésico WGS84). Para poder trabajar esta información la transformamos a coordenadas cartesianas (WGS84 UTM) con el siguiente procedimiento:

Click en el icono *Convertir coordenadas* (su icono es una calculadora), que se encuentra bajo el recuadro *Referencia* (ver Figura N°35). Se abrirá la ventana *Seleccione proyección* para elegir al tipo de coordenada al que se desea transformar, tener en cuenta que el proyecto se encuentra en la Zona 18 Sur (WGS84 / UTM Zona 18S). Finalmente se da clic en *Aceptar* y las coordenadas se muestran re-proyectadas tal como se ve en la Figura N°36.

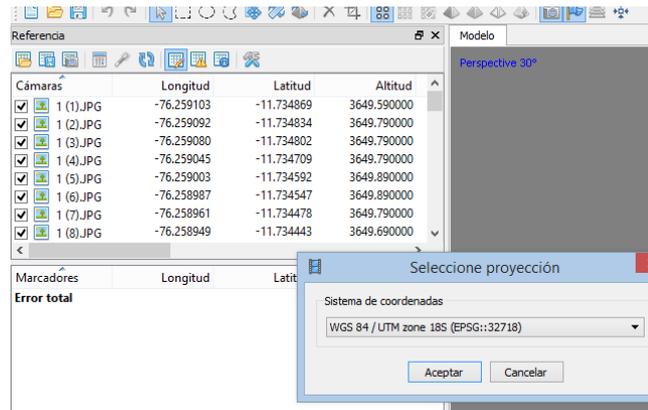


Figura N° 35 Paso para la reproyección de coordenadas.

Fuente: Elaboración propia.

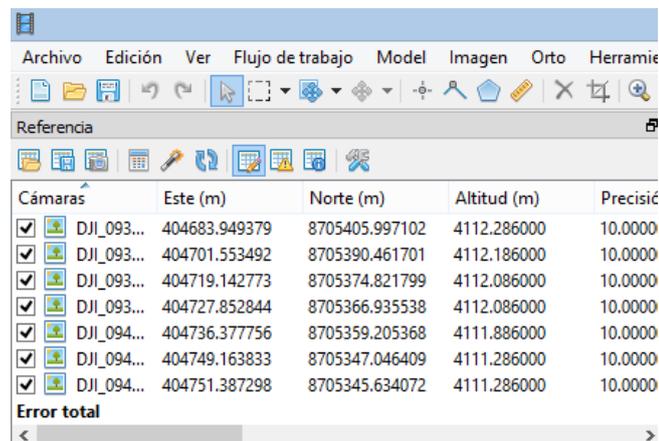


Figura N° 36 Coordenada reproyectadas.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.3 Orientar Fotos

En esta etapa, el software ubica la posición y la orientación de la cámara para cada fotografía y crea un modelo de nube de puntos dispersos.

Para alinear un conjunto de fotos:

Se selecciona el comando *Orientar fotos* de la pestaña *Flujo de trabajo*. Se selecciona el tipo de precisión que se quiere (de preferencia *medio* o *bajo*), luego *Aceptar* (ver Figura N°37). Aparecerá el cuadro de diálogo de progreso mostrando el estado del procesamiento en curso. Acabado el proceso se inspecciona los resultados y se puede eliminar las fotos colocadas incorrectamente, si las hay.

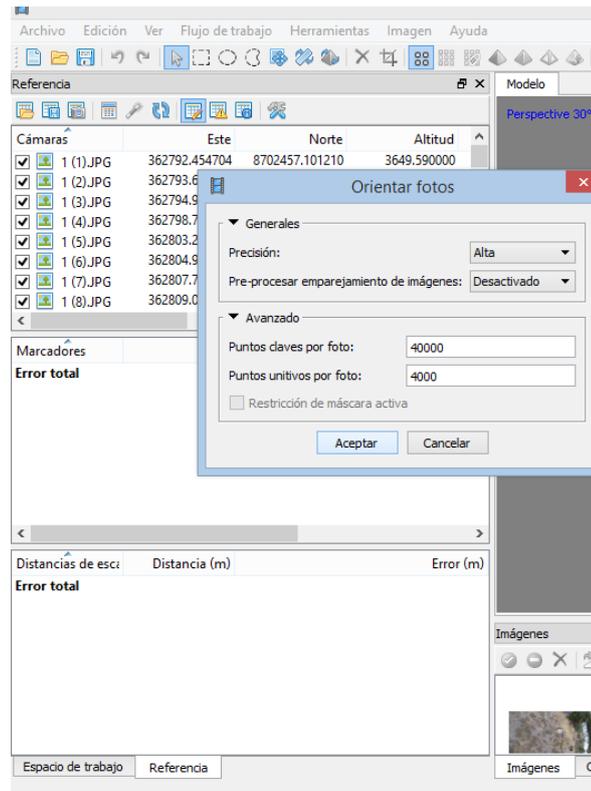


Figura N° 37 Paso para la orientación de fotografías.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.4 Colocación de los puntos de control

Con este paso le daremos más precisión a la nube de puntos dispersa, de manera que toda esta nube de puntos se acomode sobre los puntos de control.

Para ingresar los puntos existen dos formas: ingresarlas manualmente o importarlas desde un archivo externo de extensión tipo .csv (valores separados por coma), .txt (*archivo de texto*), entre otros.

Para ingresarlas manualmente, se busca la casilla de Marcadores y con el click derecho se añade un marcador (dándole un nombre), con doble click sobre *Este*, *Norte* y *Altitud* se les da valores numéricos (ver Figura N°38).

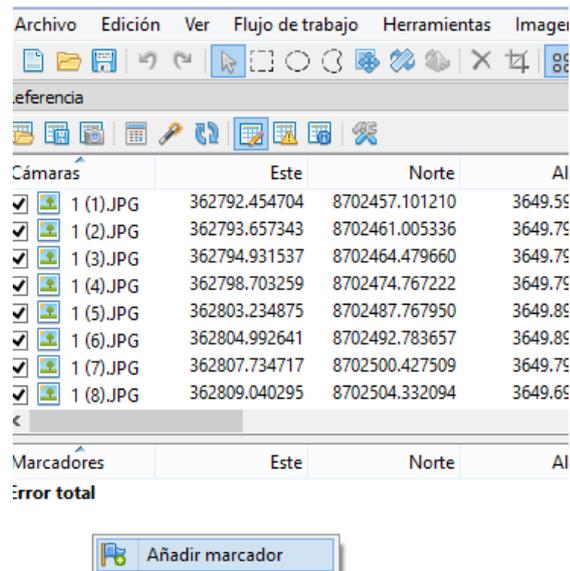


Figura N° 38 Ingreso manual de puntos de control o marcadores.

Fuente: Elaboración propia.

Para importar los marcadores desde una carpeta externa se hace click en la pestaña *Importar* bajo el recuadro *Referencia*. Se carga los puntos de formato *.csv* o *.txt* haciendo click en *Abrir*. En la pestaña *Columnas* ira el orden que seguirá el Norte, Este y Altitud. Luego se hará click en *Aceptar* el número de veces igual al número de puntos que se tomara como referencia (ver Figura N°39).

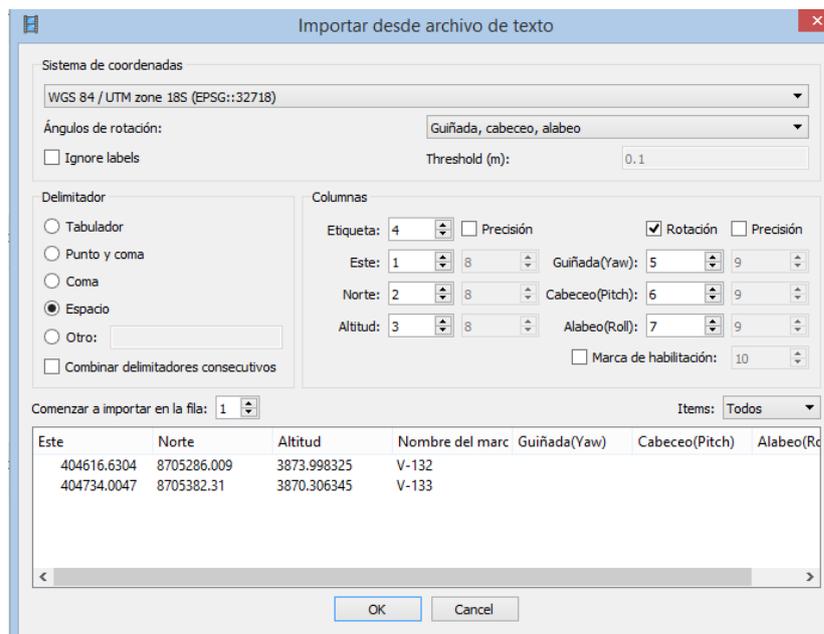


Figura N° 39 Importar puntos de control o marcadores desde un archivo con formato de texto.

Fuente: Elaboración propia.

Luego de ingresar las coordenadas de los marcadores se procede a la búsqueda de los fotocontroles en las fotografías. Las fotografías que tienen una banderilla en la parte superior derecha nos indica que tienen cerca un fotocontrol, una vez encontrada se coloca la banderilla del marcador en el fotocontrol visible de la fotografía (ver Figura N°40). Finalmente hacemos clic en el botón *Actualizar*, este se encuentra bajo la pestaña *Referencia*.

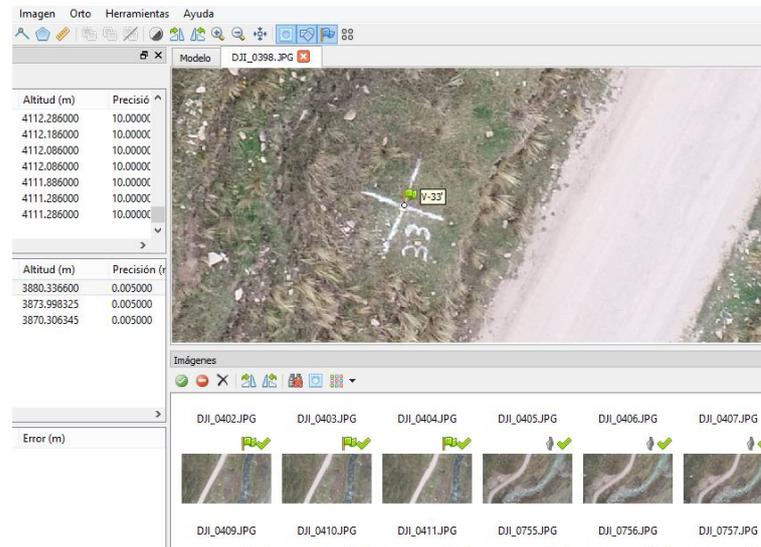


Figura N° 40 Colocación de marcadores en las fotografías cargadas.

Fuente: Elaboración propia.

Terminada la tarea de ubicar todos los marcadores de referencia se procederá a la optimización del cálculo de orientaciones. Este paso se seguirá solo si hay un error (este error está cuantificado y se ve en la casilla marcadores) significativo en la casilla de *Marcadores*; se desactivara el check de todas las fotografías de la casilla *cámaras* (lado izquierdo de la pantalla), luego se seleccionara todas las fotos y se clickeara en el botón *ajustar cámaras* para que inicie el proceso (ver Figura N°41). Con este procedimiento podremos conocer si nuestros puntos de control presentan errores o desfases y poder así compensarlos.

Si el error está por debajo del centímetro, dar clic en la pestaña *Actualizar* es suficiente para iniciar el proceso de generación de la nube de puntos densa.

| Referencia | | | | | |
|--------------------------------------|------------|---------------|----------------|-------------|-----------|
| E Optimizar cálculo de orientaciones | | | | | |
| Cámaras | | | | Altitud (m) | Precisión |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404598.726745 | 8705299.868762 | 4080.358000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404593.089589 | 8705302.837175 | 4080.558000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404589.601331 | 8705305.010484 | 4080.558000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404581.594217 | 8705309.768612 | 4080.758000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404576.705516 | 8705312.515095 | 4080.858000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404567.524476 | 8705318.019125 | 4080.758000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404563.769356 | 8705320.335983 | 4080.658000 | 10.00000 |
| <input type="checkbox"/> | DJI_038... | 404560.047871 | 8705322.545428 | 4080.558000 | 10.00000 |
| Error total | | | | | |

| Marcadores | Este (m) | Norte (m) | Altitud (m) | Precisión (r) | |
|-------------------------------------|----------|---------------|----------------|---------------|----------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | V-33' | 404598.524423 | 8705311.344121 | 3880.336600 | 0.005000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | V-132 | 404616.630400 | 8705286.009000 | 3873.998325 | 0.005000 |
| <input checked="" type="checkbox"/> | V-133 | 404734.004700 | 8705382.310000 | 3870.306345 | 0.005000 |

Figura N° 41 Optimización de las orientaciones de las cámaras.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.5 Creación de nube de puntos densa

Eta más importante del procesamiento, pues con este conjunto de puntos ya se pueden crear modelos de superficie, curvas de nivel, modelamientos en 3D, entre otros. En este trabajo convertiremos la nube de puntos en modelo digital de elevación y a partir de este se generara la ortoimagen.

Para generar la nube de puntos densa:

En la pestaña *Flujo de Trabajo* seleccionar *Crear Nube de Puntos Densa*. Para elegir la calidad de la nube hay que tener en cuenta el nivel de detalle que se desea. Por ejemplo para generar modelos 3D se procesa en calidad alta. Para topografía no se requiere tan elevada calidad, pues no necesitamos curvas detalladas de rocas, casas, automóviles, entre otros. Se recomienda elegir la calidad *media* o *baja* y un filtrado de profundidad *moderado* (ver Figura N°42).

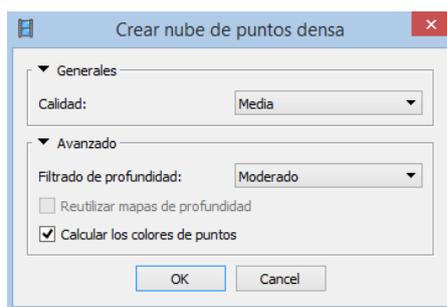


Figura N° 42 Ventana de procesamiento para crear la nube de puntos densa.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.6 Edición de superficie

Para generar las curvas de nivel también es necesario eliminar de la *Point Cloud* los puntos que corresponden a viviendas, vehículos, árboles, entre otros, y de esa manera tener el terreno desnudo y no se combinen curvas de nivel de la superficie con curvas de nivel de infraestructura y vegetación. Esta información (infraestructura, vegetación entre otros) se mantendrá en el Ortomosaico para su uso posterior.

Para editar la superficie (Nube de puntos densa):

Buscamos la pestaña de *Selección libre* (ver Figura N°43) y seleccionamos los puntos del panel del *Modelo* que deseamos quitar. Para eliminarlos se usa la tecla Suprimir (ver Figura N°44). Para poder cerrar estos agujeros se crea una malla con el software.

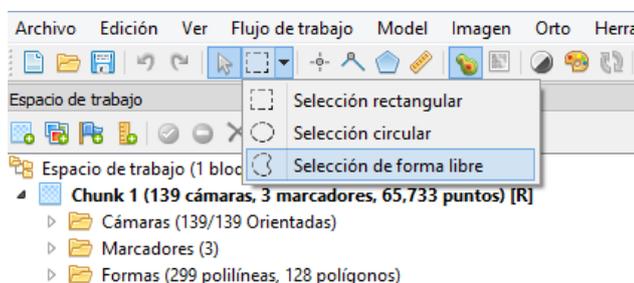


Figura N° 43 Menú de edición de Point Cloud y de Malla.

Fuente: Elaboración propia.

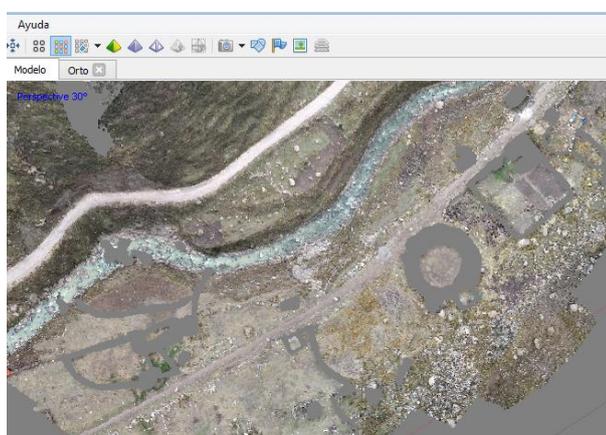


Figura N° 44 Nube de puntos editada.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.7 Creación de malla

La malla que se crea une los puntos de la nube densa a modo de triangulación, de esta manera ya se tiene una superficie de trabajo. Este paso es opcional pues existen otros softwares que también generan curvas de nivel a partir de una nube con agujeros.

Para crear una Malla

Buscamos la pestaña *Flujo de trabajo*, luego la opción *Crear malla*. Luego se selecciona el tipo de superficie: *Bajo relieve/terreno*; y como datos fuente: *Nube de puntos densa*; para el numero de caras podemos seleccionar entre *Media* o *Baja* y en la casilla interpolación: *Extrapolada*, para finalmente dar clic en *Aceptar* (ver Figura N°45).

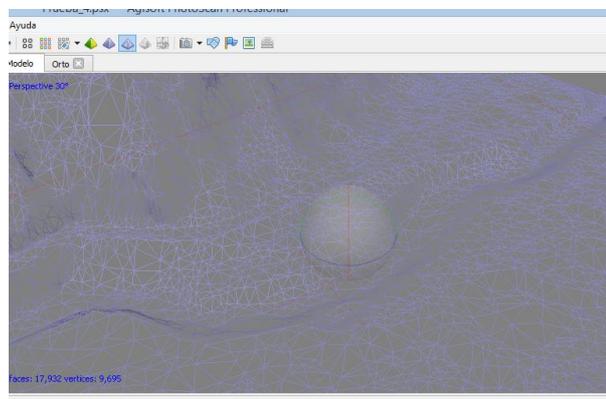


Figura N° 45 Malla generada a partir de la nube de puntos densa.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.8 Creación de Modelo de elevación digital (DEM)

Antes de crear las curvas de nivel se crea un modelo digital a partir de la malla generada, como paso intermedio a la creación de curvas de nivel.

Para generar el DEM:

Buscamos en la pestaña *Flujo de trabajo* la pestaña *Crear Modelo de elevación digital* (ver Figura N°46). Elegimos en el tipo de proyección: *Geográfica*, en el Sistema de Coordenadas: *WGS 84 / UTM 18 Sur*. Elegimos como datos fuente: *Malla* (la que creamos en el paso anterior), en la pestaña de interpolación: *Extrapolada*, finalmente le damos clic en *Aceptar* (ver Figura N°47).

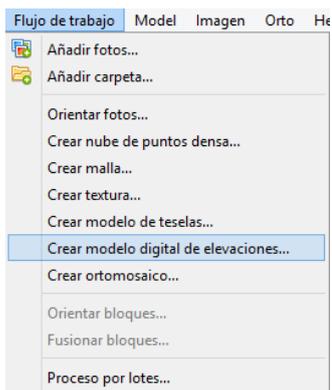


Figura N° 46 Pestaña de flujo de trabajo desplegada.

Fuente: Elaboración propia.

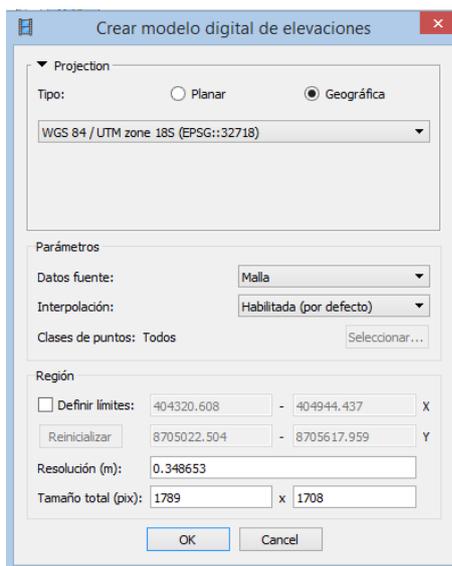


Figura N° 47 Ventana crear modelo de elevación digital.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.9 Crear Curvas de nivel

Esta versión del software Agisoft puede crear curvas de nivel a partir de un DEM.

Para crear curvas de nivel:

Nos dirigimos a la pestaña *Herramientas* en la barra del menú. Buscamos la opción *Generar curvas de nivel*. Luego buscamos la pestaña *Espacio de trabajo*. Aquí se observara las curvas generadas (ver Figura N°48).

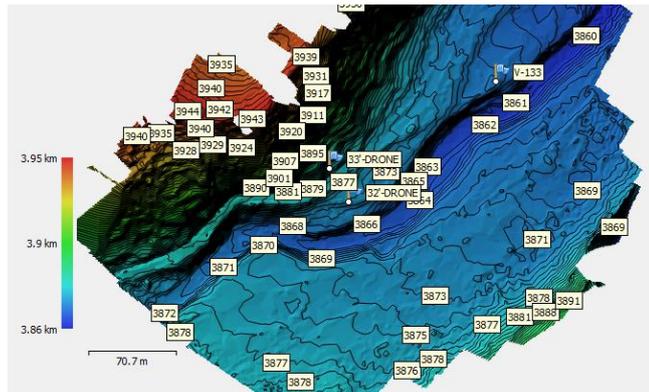


Figura N° 48 Curvas de nivel sobre el modelo digital de elevación.

Fuente: Elaboración propia.

3.7.10 Crear Ortomosaico

El Ortomosaico u Ortofoto es la fotografía rectificada que se obtiene al final de este procedimiento.

Para crear un Ortomosaico:

Nos dirigimos a la pestaña *Flujo de trabajo*, buscamos la opción desplegable *Crear Ortomosaico*, la proyección se muestra por defecto, la superficie que se tomara podrá ser del *DEM* o de la *Malla*, en *Modo de mezcla* lo dejamos por defecto en: *Mosaico*, para finalizar damos clic en *Aceptar* (ver Figura N°49).

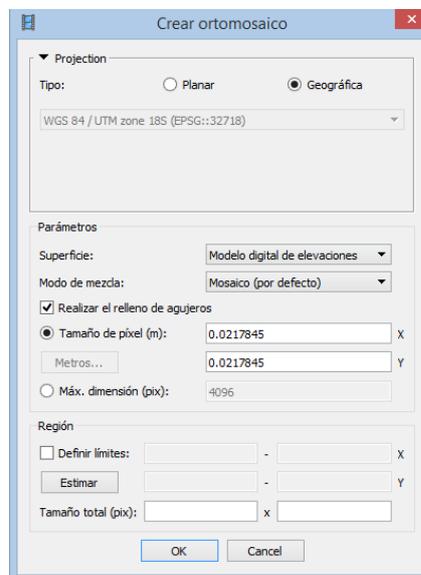


Figura N° 49 Ventana crear Ortomosaico.

Fuente: Elaboración propia.

3.8 APLICACIÓN EN QUEBRADA QUE CRUZA UN EJE VIAL

El levantamiento topográfico tradicional se vuelve complicado y riesgoso cuando hay que ejecutarlo, por ejemplo, en una quebrada pues está presente grandes desniveles, escarpadas laderas, cauce de ríos, entre otras dificultades. En el caso del proyecto en el que se basó esta tesis (descrito a más detalle en el ítem 4.1), se requiere la topografía de las quebradas que cruzan el eje del proyecto para la proyección y posterior diseño de puentes, alcantarillas y badenes.

Para esto se usara un vehículo aéreo piloteado remotamente, pues tiene la capacidad de realizar este tipo de trabajos de manera eficiente, sacrificando de manera relativa la precisión, pero optimizando el tiempo de trabajo en campo. Luego del proceso de orientación y restitución el software genera una nube de puntos el cual se complementa con la nube de puntos generada por la estación total y el RTK (ver Figura N°50), generando un modelo digital de terreno (MDT) o una superficie TIN (Red Irregular de Triángulos), que servirá para obtener las curvas de nivel.

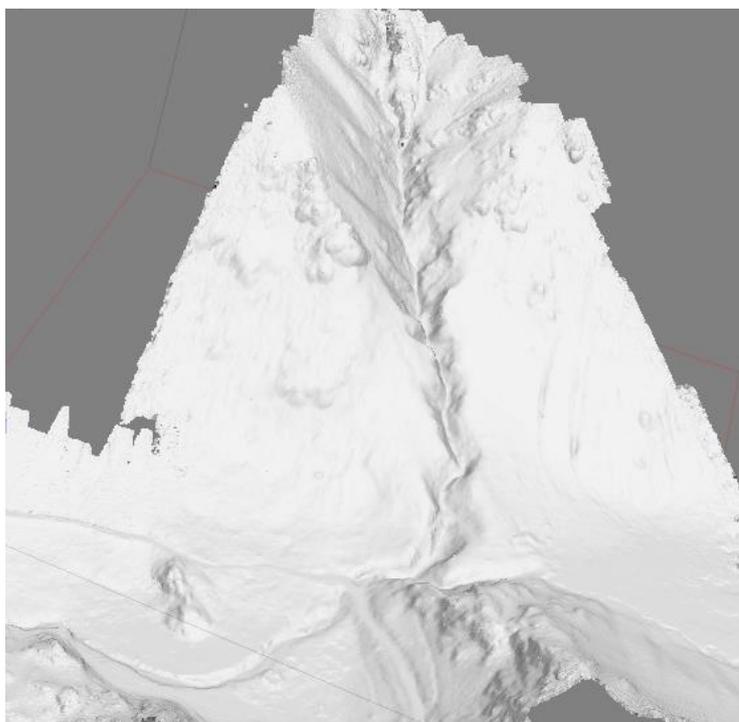


Figura N° 50 Nube de puntos generada con Fotogrametría de una RPA unida a puntos generados por topografía tradicional en la Quebrada ubicada en el Km 44+200 que a la vez cruza el eje proyectado.

Fuente: Elaboración propia.

Tras un proceso de recopilación de detalles planimétricos sobre las curvas de nivel, el Plano Topográfico quedaría como se observa en la Figura N°51.

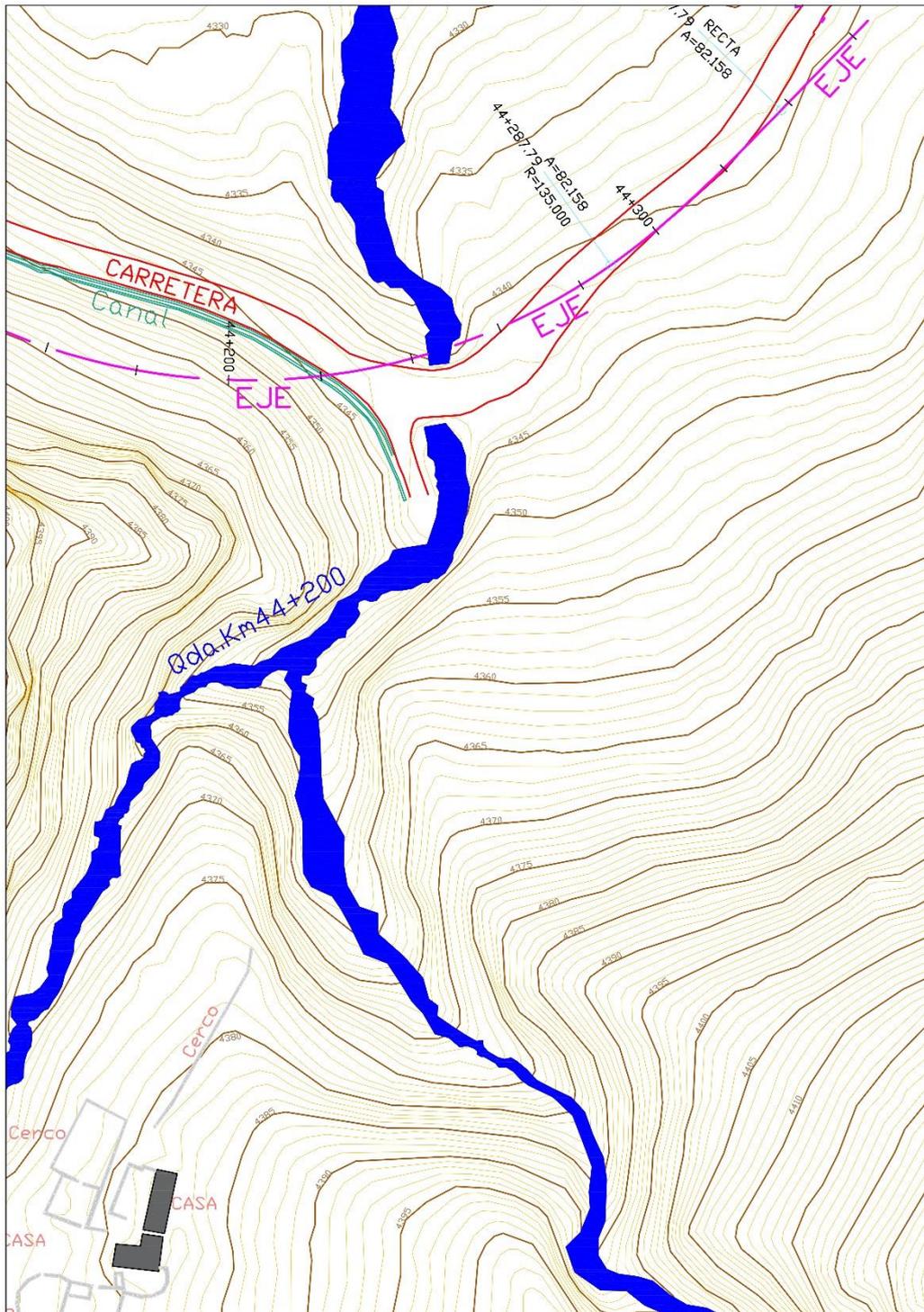


Figura N° 51 Grafico que muestra un plano topográfico con sus respectivos detalles planimétricos y curvas de nivel.

Fuente: Elaboración propia.

3.8.1 Precisiones en Planimetría y Altimetría

Según la norma técnica difundida por el IGN las especificaciones técnicas para detalles planimétricos provenientes de una restitución digital son las siguientes:

3.8.1.1 En Planimetría

En planimetría, la posición del 90% de los puntos bien definidos no diferirá de la verdadera en más de 0.20 mm, y el 10% restante no diferirá en más de 0.25 mm a la escala del plano impreso.

Cuadro N° 3 Error máximo en planimetría permitido según la escala del plano impreso.

| ESCALA | ERROR MAXIMO (a escala real) | |
|---------------------------|------------------------------|---------------------------|
| | Para el 90% de los puntos | Para el 10% de los puntos |
| 1:2000 (Zonas Rurales) | 40 cm | 50 cm |
| 1:1000 (Zonas Rurales) | 20 cm | 25 cm |
| 1:500 (Zonas Urbanas) | 10 cm | 12.5 cm |

Fuente: Instituto Geográfico Nacional

3.8.1.2 En Altimetría

Las elevaciones del 95% de los puntos acotados en el mapa digital, no diferirá de la verdadera en más de $\frac{1}{4}$ del valor del intervalo de curva de nivel, el 5% restante nunca excederá del valor del $\frac{1}{2}$ del intervalo de curva de nivel.

Cuadro N° 4 Error máximo en altimetría permitido según la escala del plano impreso.

| ESCALA | ERROR MAXIMO (a escala real) | |
|---------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| | Para el 95% de los puntos | Para el 5% de los puntos |
| 1:2000 (Zonas Rurales) | 50 cm (Curvas cada 2m) | 1 m (Curvas cada 2m) |
| 1:1000 (Zonas Rurales) | 25 cm (Curvas cada 1m) | 50 cm (Curvas cada 1m) |
| 1:500 (Zonas Urbanas) | 12.5 cm (Curvas cada 0.5 m) | 25 cm (Curvas cada 0.5 m) |

Fuente: Instituto Geográfico Nacional

CAPÍTULO IV: DETERMINACIÓN DE LA PRECISIÓN DE LA RPA APLICADO A UN TRAMO DE CARRETERA

4.1 CARACTERIZACIÓN DEL AREA DE TRABAJO

El presente trabajo se desarrolló en la frontera de los departamentos de Lima y Junín (provincia de Huarochirí, en el departamento de Lima y la provincia de Yauli en el departamento de Junín) como parte del proyecto MEJORAMIENTO DE LA CARRETERA PUENTE RICARDO PALMA - LA OROYA: VARIANTE EMP. PE-022 KM. 101+379 (RIO BLANCO) - EMP. RUTA PE-3S KM. 21+918 (HUARI) cuya longitud es de 86 Km (4.22 Km (desvíos) + 78 Km (Variante) + 3.5 Km (Túnel)), (ver Figura N°55).

Los tramos que se trabajaron en la presente tesis se encuentran a una altitud mínima de 3682 m.s.n.m. y una máxima de 4988 m.s.n.m.



Figura N° 52 Monumentación de puntos de control tras una granizada leve (4742 m.s.n.m.).

Fuente: Elaboración propia.

En estas altitudes, en la temporada de verano, es constante la presencia de lluvias con granizo, vientos de velocidad considerable, disminución de la presión atmosférica y temperaturas que varían de 0° a 12°, por lo que la aeronave tuvo que trabajar en horarios restringidos y a su máxima capacidad de acuerdo a los

rangos proporcionados en las especificaciones del fabricante de la aeronave (ver Figura N°52).

En las Figuras N°53 y N°54 se observa parte de la orografía en la que se encuentra el eje del proyecto antes mencionado el cual es paralelo a la antigua vía.



Figura N° 53 Eje del proyecto cerca de la localidad de Huari (3778 m.s.n.m.).
Fuente: Elaboración propia.



Figura N° 54 Eje del proyecto a un lado de la vía y de la localidad de Huayhuay (4010 m.s.n.m.)
Fuente: Elaboración propia.

La accesibilidad a la zona es restringida en ciertos horarios, pues parte del tramo se encuentra dentro de las instalaciones de la compañía VOLCAN. Otra parte del tramo solo es accesible a pie y el restante es de libre acceso.

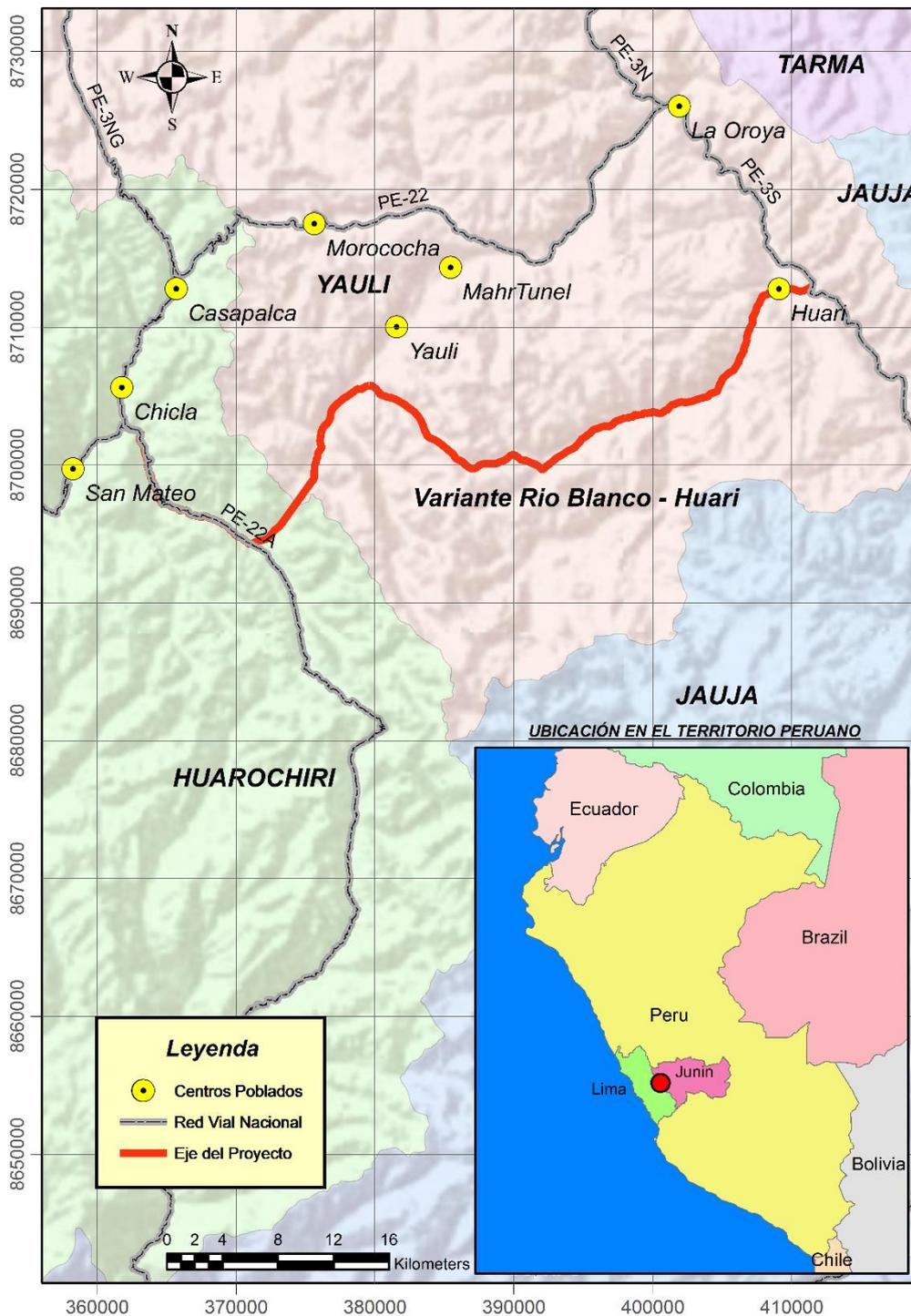


Figura N° 55 Mapa de ubicación del proyecto.

Fuente: Elaboración propia.

4.2 PROCEDIMIENTOS DE VERIFICACION

Para evaluar la precisión de vuelos fotogramétricos con una Aeronave Phantom 4 Pro se usaran algunos conceptos estadísticos usados para comparar dos valores numéricos de un mismo punto. Uno de ellos es la raíz del Error Medio Cuadrático.

4.2.1 Verificación tipo RPA – RPA

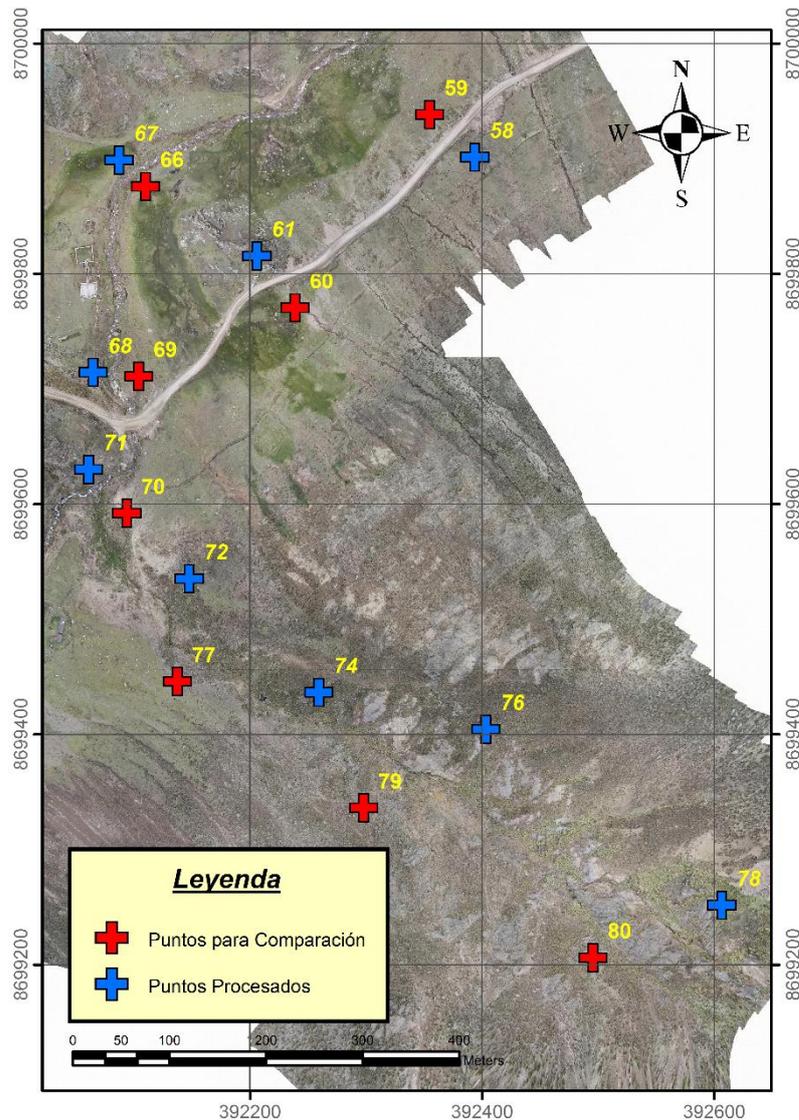


Figura N° 56 Ejemplo de zona sobrevolada, con todos sus puntos de control. En el proceso de restitución se usaran solo los puntos de color azul.

Fuente: Elaboración propia

Esta verificación se hará comparando coordenadas (X, Y, Z) obtenidas por procedimientos fotogramétricos, de distintos planes de vuelo, con puntos que

recibirán post proceso y otros que serán usados con fines de comparación (ver Figura N°56).

Las coordenadas de estos puntos adicionales no ingresaran en el post-proceso de las imágenes pues se usarán para comparar el valor real que tienen con el valor que arroja el post-proceso sin ellos.

Luego de conocer las coordenadas de estos puntos de comparación procederemos a ingresar los puntos tomados con RTK y los puntos tomados de las Ortofotos ya procesadas a las siguientes ecuaciones:

$$REMC_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{Oi} - X_{GPSi})^2]}{n}} \text{ (Ec. 1)}$$

$$REMC_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{Oi} - Y_{GPSi})^2]}{n}} \text{ (Ec. 2)}$$

$$REMC_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z_{Oi} - Z_{GPSi})^2]}{n}} \text{ (Ec. 3)}$$

Donde:

$REMC_i$: Raíz del Error medio cuadrático en los ejes "X, Y y Z".

X_{Oi}, Y_{Oi}, Z_{Oi} : Coordenadas "X, Y y Z" medidas en la Ortofoto para el i-ésimo punto de control.

$X_{GPSi}, Y_{GPSi}, Z_{GPSi}$: Coordenadas "X, Y y Z" medidas con el GPS para el i-ésimo punto de control.

4.2.2 Verificación tipo RPA – Plano Topográfico (PT)

Para esta verificación se usara la posición de las alcantarillas ubicadas a lo largo del trazo. La información de posición la obtendremos del levantamiento topográfico tradicional (Estación total y Red geodésica) y esta se comparara con la posición que tienen las alcantarillas en la Ortofoto, generada con procedimientos fotogramétricos. El desfase o variación obtenida será más confiable si usamos la Raíz del Error Medio Cuadrático (ver Figura N°57).



Figura N° 57 Ejemplo de traslape de zona levantada con topografía tradicional (Plano topográfico) y otra levantada con una RPA (Ortofoto).

Fuente: Elaboración propia.

Al igual que el tipo de verificación del punto 4.2.2 se calculara la raíz del error medio cuadrático de los puntos antes mencionados.

$$REMC_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(X_{Oi} - X_{CNI})^2]}{n}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$REMC_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Y_{Oi} - Y_{CNI})^2]}{n}} \quad (\text{Ec. 5})$$

$$REMC_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [(Z_{Oi} - Z_{CNI})^2]}{n}} \quad (\text{Ec. 6})$$

Donde:

$REMC_i$: Raíz del Error medio cuadrático en los ejes "X, Y y Z".

X_{Oi}, Y_{Oi}, Z_{Oi} : Coordenadas "X, Y y Z" medidas en la Ortofoto para el i-ésimo punto de referencia

$X_{CNI}, Y_{CNI}, Z_{CNI}$: Coordenadas "X, Y y Z" medidas en el plano topográfico (curvas de nivel) para el i-ésimo punto de referencia.

4.2.3 Muestra y Resultados

4.2.3.1 Muestra y Resultados para la verificación tipo RPA-RPA

Para esta verificación se analizarán 41 puntos de comparación (ver Figura N°56), tomados de 5 quebradas por las que atraviesa el eje del proyecto. En el Cuadro N°3 se muestra las coordenadas de estos puntos tomados en campo con RTK. En el Anexo 2 se muestran imágenes de la monumentación de estos 41 puntos.

Cuadro N° 5 Cuadro que muestra las coordenadas tomadas con RTK.

| PUNTO | COORDENADAS RTK (a) [metros] | | |
|-------|------------------------------|--------------|--------------|
| | Este (Xgps) | Norte (Ygps) | Elev. (Zgps) |
| 1 | 408387.295 | 8712529.410 | 3687.058 |
| 2 | 408551.772 | 8712616.485 | 3682.727 |
| 3 | 407919.052 | 8712165.694 | 3697.541 |
| 4 | 407756.683 | 8711943.584 | 3704.676 |
| 41 | 402434.880 | 8704531.518 | 3938.739 |
| 42 | 402180.329 | 8704548.944 | 3940.558 |
| 44 | 401566.133 | 8704386.722 | 3985.985 |
| 46 | 401307.013 | 8704232.376 | 3986.956 |
| 59 | 392354.538 | 8699938.393 | 4319.577 |
| 60 | 392238.630 | 8699770.643 | 4343.460 |
| 62 | 391964.599 | 8699737.451 | 4348.745 |
| 66 | 392109.781 | 8699875.992 | 4315.752 |
| 69 | 392103.941 | 8699711.141 | 4336.210 |
| 70 | 392093.621 | 8699592.283 | 4365.968 |
| 77 | 392137.202 | 8699446.022 | 4411.541 |
| 79 | 392297.680 | 8699336.209 | 4513.104 |
| 94 | 387253.315 | 8699803.464 | 4646.474 |
| 95 | 387132.999 | 8699804.147 | 4658.271 |
| 98 | 386935.361 | 8699760.225 | 4677.077 |
| 100 | 386789.317 | 8699706.661 | 4730.156 |
| 102 | 386706.182 | 8699699.994 | 4742.827 |
| 104 | 386484.682 | 8699586.505 | 4734.066 |
| 113 | 377290.316 | 8704303.982 | 4299.680 |

| | | | |
|-----|------------|-------------|----------|
| 115 | 377087.754 | 8704448.678 | 4348.374 |
| 117 | 376993.851 | 8704684.609 | 4415.844 |
| 119 | 376932.902 | 8705238.635 | 4559.656 |
| 121 | 393060.573 | 8700356.736 | 4309.203 |
| 122 | 393133.649 | 8700209.721 | 4365.090 |
| 124 | 393191.263 | 8700016.465 | 4465.187 |
| 126 | 393089.020 | 8699989.153 | 4476.805 |
| 127 | 393101.771 | 8700072.304 | 4430.707 |
| 129 | 393025.529 | 8700298.425 | 4315.628 |
| 130 | 392977.257 | 8700373.920 | 4294.397 |
| 131 | 393007.753 | 8700415.919 | 4289.143 |
| 133 | 392964.594 | 8700543.870 | 4231.860 |
| 134 | 397573.191 | 8703192.087 | 4144.681 |
| 135 | 397522.628 | 8703191.507 | 4140.080 |
| 137 | 397519.342 | 8702837.885 | 4204.142 |
| 139 | 397625.276 | 8702708.812 | 4223.376 |
| 141 | 397582.957 | 8703027.271 | 4170.910 |
| 142 | 397608.380 | 8703262.266 | 4132.670 |

Fuente: Elaboración Propia

Luego se realiza el proceso de restitución con la información fotográfica obtenida de todas las quebradas, usando los “puntos procesados” (ver referencia en la Figura N°56). Finalizado el proceso, en la Ortofoto resultante se ubicaran los “puntos de comparación” y se procederá a obtener las coordenadas de estos puntos, tal como aparece en el Cuadro N°4.

Cuadro N° 6 Cuadro que muestra las coordenadas de los puntos de comparación.

| PUNTO | COORDENADAS ORTOFOTO (b) [metros] | | |
|-------|-----------------------------------|-------------|------------|
| | Este (Xo) | Norte (Yo) | Elev. (Zo) |
| 1 | 408387.385 | 8712529.328 | 3687.655 |
| 2 | 408551.824 | 8712616.367 | 3683.417 |
| 3 | 407919.168 | 8712165.583 | 3698.404 |
| 4 | 407756.722 | 8711943.496 | 3705.584 |
| 41 | 402434.913 | 8704531.518 | 3940.045 |

| | | | |
|------------|------------|-------------|----------|
| 42 | 402180.304 | 8704548.916 | 3941.496 |
| 44 | 401566.297 | 8704386.599 | 3986.764 |
| 46 | 401307.198 | 8704232.168 | 3987.407 |
| 59 | 392354.552 | 8699938.313 | 4319.655 |
| 60 | 392238.582 | 8699770.782 | 4343.225 |
| 62 | 391964.547 | 8699737.498 | 4348.593 |
| 66 | 392109.783 | 8699876.024 | 4315.792 |
| 69 | 392103.833 | 8699711.141 | 4336.104 |
| 70 | 392093.577 | 8699592.289 | 4365.541 |
| 77 | 392137.210 | 8699446.038 | 4411.197 |
| 79 | 392297.658 | 8699336.222 | 4512.902 |
| 94 | 387253.346 | 8699803.445 | 4646.626 |
| 95 | 387133.014 | 8699804.205 | 4658.498 |
| 98 | 386935.397 | 8699760.215 | 4677.157 |
| 100 | 386789.327 | 8699706.706 | 4730.277 |
| 102 | 386706.180 | 8699699.971 | 4743.005 |
| 104 | 386484.750 | 8699585.949 | 4734.125 |
| 113 | 377290.374 | 8704303.975 | 4299.59 |
| 115 | 377087.796 | 8704448.733 | 4348.371 |
| 117 | 376993.843 | 8704684.623 | 4415.538 |
| 119 | 376933.065 | 8705238.697 | 4559.206 |
| 121 | 393060.551 | 8700356.663 | 4309.179 |
| 122 | 393133.622 | 8700209.637 | 4364.844 |
| 124 | 393191.279 | 8700016.533 | 4465.496 |
| 126 | 393088.996 | 8699989.309 | 4477.814 |
| 127 | 393101.761 | 8700072.366 | 4431.049 |
| 129 | 393025.493 | 8700298.432 | 4315.343 |
| 130 | 392977.231 | 8700373.915 | 4294.364 |
| 131 | 393007.763 | 8700415.960 | 4289.174 |
| 133 | 392964.560 | 8700543.869 | 4231.848 |
| 134 | 397573.233 | 8703192.133 | 4144.68 |
| 135 | 397522.679 | 8703191.540 | 4140.159 |

| | | | |
|------------|------------|-------------|----------|
| 137 | 397519.380 | 8702837.852 | 4204.102 |
| 139 | 397625.181 | 8702708.752 | 4223.4 |
| 141 | 397582.915 | 8703027.260 | 4170.93 |
| 142 | 397608.506 | 8703262.332 | 4132.473 |

Fuente: Elaboración Propia

El siguiente paso es hacer uso de las Ecuaciones (1), (2) y (3) para obtener la Raíz del error medio cuadrático de la muestra “b” y la muestra “a”. Este se aplicará para cada eje coordenado (Este, norte y Elevación), tal como lo muestra el Cuadro N°5

Cuadro N° 7 Cuadro resumen de la variación de coordenadas tomadas con RTK y con procedimientos fotogramétricos junto a la Raíz del Error Medio Cuadrático.

| PUNTO | Variación (b) - (a) [m] | | | Variación ² [m ²] | | |
|-----------|-------------------------|-----------|-----------|--|------------------------|------------------------|
| | (Xo-Ygps) | (Yo-Ygps) | (Zo-Zgps) | (Xo-Ygps) ² | (Yo-Ygps) ² | (Zo-Zgps) ² |
| 1 | 0.0897 | -0.0819 | 0.5974 | 0.0080 | 0.0067 | 0.3569 |
| 2 | 0.0517 | -0.1179 | 0.6896 | 0.0027 | 0.0139 | 0.4756 |
| 3 | 0.1165 | -0.1108 | 0.8634 | 0.0136 | 0.0123 | 0.7455 |
| 4 | 0.0390 | -0.0880 | 0.9081 | 0.0015 | 0.0077 | 0.8246 |
| 41 | 0.0327 | 0.0000 | 1.3063 | 0.0011 | 0.0000 | 1.7064 |
| 42 | -0.0248 | -0.0285 | 0.9378 | 0.0006 | 0.0008 | 0.8795 |
| 44 | 0.1639 | -0.1226 | 0.7788 | 0.0268 | 0.0150 | 0.6065 |
| 46 | 0.1847 | -0.2079 | 0.4511 | 0.0341 | 0.0432 | 0.2035 |
| 59 | 0.0136 | -0.0803 | 0.0781 | 0.0002 | 0.0064 | 0.0061 |
| 60 | -0.0479 | 0.1388 | -0.2353 | 0.0023 | 0.0193 | 0.0554 |
| 62 | -0.0523 | 0.0472 | -0.1520 | 0.0027 | 0.0022 | 0.0231 |
| 66 | 0.0015 | 0.0316 | 0.0399 | 0.0000 | 0.0010 | 0.0016 |
| 69 | -0.1078 | -0.0002 | -0.1059 | 0.0116 | 0.0000 | 0.0112 |
| 70 | -0.0438 | 0.0065 | -0.4269 | 0.0019 | 0.0000 | 0.1823 |
| 77 | 0.0078 | 0.0165 | -0.3444 | 0.0001 | 0.0003 | 0.1186 |
| 79 | -0.0219 | 0.0129 | -0.2018 | 0.0005 | 0.0002 | 0.0407 |
| 94 | 0.0308 | -0.0192 | 0.1520 | 0.0009 | 0.0004 | 0.0231 |
| 95 | 0.0151 | 0.0585 | 0.2268 | 0.0002 | 0.0034 | 0.0514 |
| 98 | 0.0359 | -0.0098 | 0.0801 | 0.0013 | 0.0001 | 0.0064 |

| | | | | | | |
|------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 100 | 0.0104 | 0.0454 | 0.1213 | 0.0001 | 0.0021 | 0.0147 |
| 102 | -0.0015 | -0.0234 | 0.1776 | 0.0000 | 0.0005 | 0.0315 |
| 104 | 0.0675 | -0.5563 | 0.0587 | 0.0046 | 0.3094 | 0.0034 |
| 113 | 0.0582 | -0.0068 | -0.0899 | 0.0034 | 0.0000 | 0.0081 |
| 115 | 0.0420 | 0.0551 | -0.0034 | 0.0018 | 0.0030 | 0.0000 |
| 117 | -0.0078 | 0.0141 | -0.3058 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0935 |
| 119 | 0.1635 | 0.0623 | -0.4505 | 0.0267 | 0.0039 | 0.2029 |
| 121 | -0.0224 | -0.0726 | -0.0239 | 0.0005 | 0.0053 | 0.0006 |
| 122 | -0.0267 | -0.0840 | -0.2461 | 0.0007 | 0.0071 | 0.0606 |
| 124 | 0.0160 | 0.0680 | 0.3092 | 0.0003 | 0.0046 | 0.0956 |
| 126 | -0.0236 | 0.1558 | 1.0095 | 0.0006 | 0.0243 | 1.0191 |
| 127 | -0.0098 | 0.0618 | 0.3423 | 0.0001 | 0.0038 | 0.1172 |
| 129 | -0.0357 | 0.0071 | -0.2846 | 0.0013 | 0.0001 | 0.0810 |
| 130 | -0.0264 | -0.0054 | -0.0331 | 0.0007 | 0.0000 | 0.0011 |
| 131 | 0.0101 | 0.0408 | 0.0308 | 0.0001 | 0.0017 | 0.0009 |
| 133 | -0.0343 | -0.0010 | -0.0120 | 0.0012 | 0.0000 | 0.0001 |
| 134 | 0.0419 | 0.0456 | -0.0008 | 0.0018 | 0.0021 | 0.0000 |
| 135 | 0.0511 | 0.0335 | 0.0792 | 0.0026 | 0.0011 | 0.0063 |
| 137 | 0.0375 | -0.0327 | -0.0395 | 0.0014 | 0.0011 | 0.0016 |
| 139 | -0.0950 | -0.0603 | 0.0244 | 0.0090 | 0.0036 | 0.0006 |
| 141 | -0.0424 | -0.0113 | 0.0204 | 0.0018 | 0.0001 | 0.0004 |
| 142 | 0.1261 | 0.0660 | -0.1974 | 0.0159 | 0.0044 | 0.0390 |

Fuente: Elaboración Propia.

Los Cuadros N°6 y N°7 nos muestran gráficamente la variación o desfase en las coordenadas a las que en el paso siguiente se le realizara la REMC.

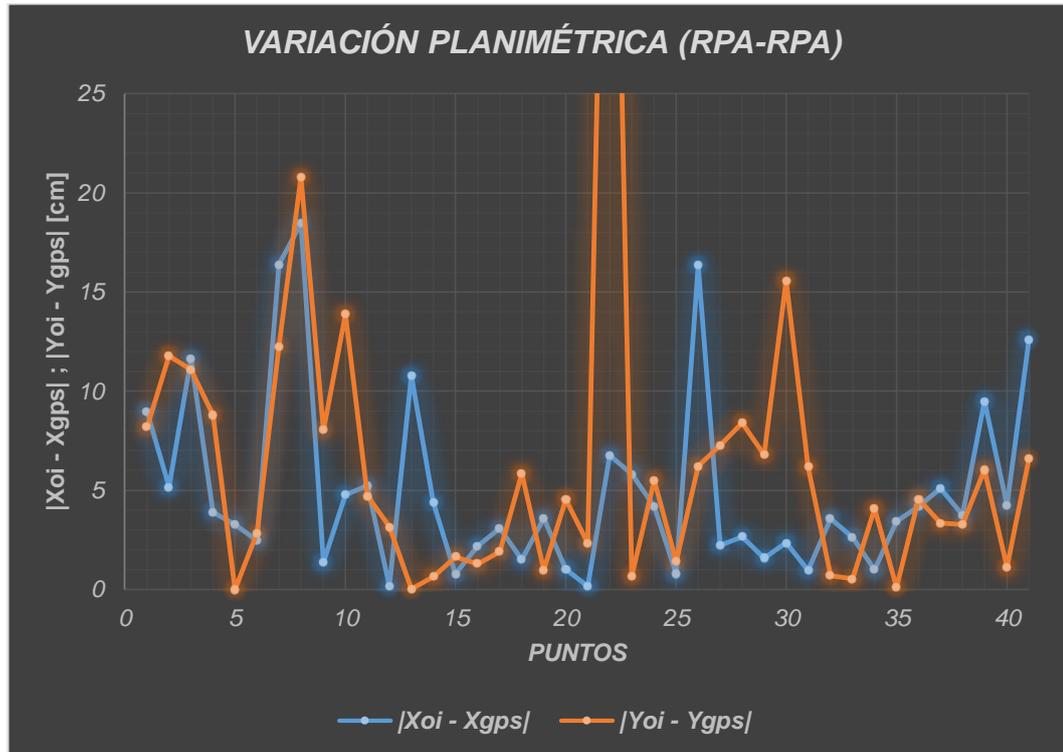
Finalmente de estos 41 puntos se obtiene la REMC para cada eje, dando como resultado los siguientes valores:

$$REMC_x(\text{Este}) = 0.0671 \text{ m } \dots\dots(7)$$

$$REMC_y(\text{Norte}) = 0.1117 \text{ m } \dots\dots(8)$$

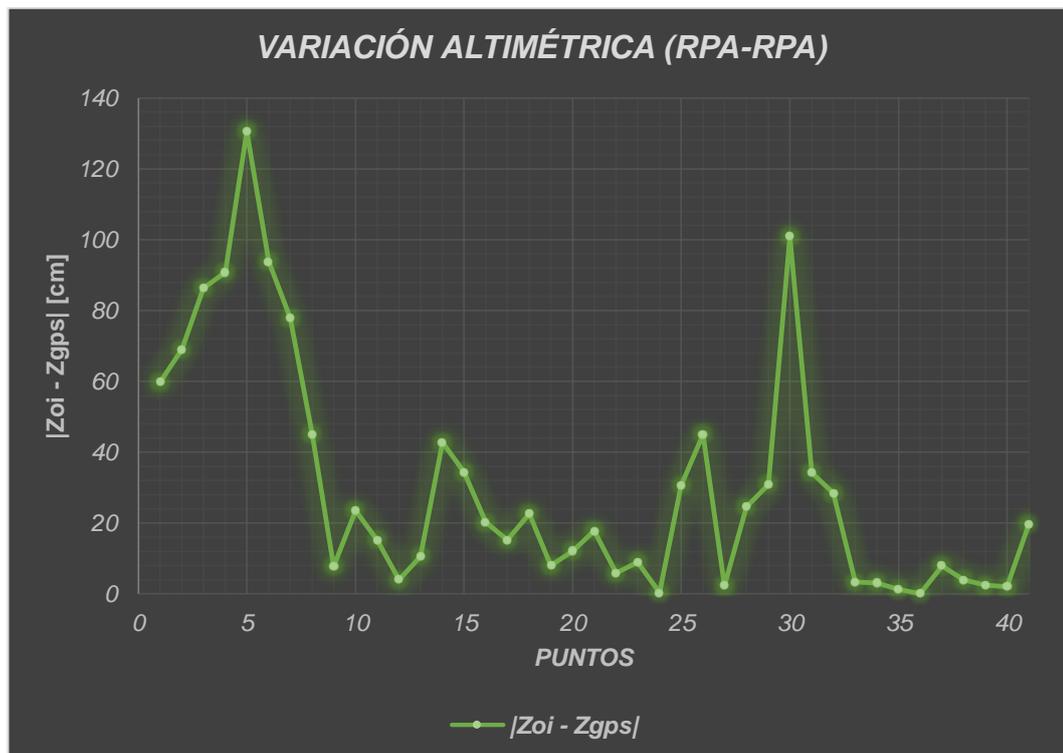
$$REMC_z(\text{Elevación}) = 0.4444 \text{ m } \dots\dots(9)$$

Cuadro N° 8 Grafico que muestra un resumen de la variación planimétrica correspondiente a la verificación tipo RPA- RPA.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 9 Grafico que muestra un resumen de la variación altimétrica correspondiente a la verificación tipo RPA - RPA.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2 Muestra y Resultados para la verificación tipo RPA – PT

Para esta verificación se analizarán 51 puntos pertenecientes a alcantarillas, pontones y escaleras, estas se encuentran cercanas y paralelas al eje del proyecto. El Cuadro N°8 muestra las coordenadas de estos puntos, a manera de “valor previsto”, pues estas coordenadas son obtenidas por métodos fotogramétricos computacionales de ortorectificación.

Cuadro N° 10 Coordenadas de puntos según ubicación de progresiva de alcantarillas de un tramo del proyecto, obtenidos por procedimientos fotogramétricos.

| UBICACIÓN | COORDEN. EN ORTOFOTO (c) [m] | | |
|-----------------|------------------------------|-------------|------------|
| | Este (Xo) | Norte (Yo) | Elev. (Zo) |
| 67+000 | 408375.564 | 8712445.854 | 3686.994 |
| 67+000 | 408376.685 | 8712446.515 | 3687.047 |
| 66+780 | 408196.283 | 8712297.560 | 3690.012 |
| 66+780 | 408199.332 | 8712293.687 | 3690.023 |
| 63+935 | 407004.809 | 8709889.332 | 3747.694 |
| 62+550 | 406634.647 | 8708571.318 | 3778.692 |
| 61+738 | 406325.603 | 8707829.580 | 3793.733 |
| 61+060 | 406067.699 | 8707216.205 | 3811.578 |
| 60+800 | 405930.217 | 8706999.301 | 3819.102 |
| 60+670 | 405856.322 | 8706887.149 | 3818.906 |
| 60+387 | 405613.777 | 8706711.762 | 3826.503 |
| 59+750 | 405141.922 | 8706329.066 | 3851.76 |
| 59+650 | 405068.052 | 8706243.882 | 3849.052 |
| 59+300 | 404925.813 | 8705956.165 | 3851.955 |
| 59+140 | 404839.583 | 8705802.550 | 3856.126 |
| Puente | 404863.250 | 8705727.694 | 3855.604 |
| Puente | 404873.294 | 8705728.553 | 3855.632 |
| Puente | 404863.508 | 8705724.546 | 3855.576 |
| Puente | 404873.602 | 8705725.467 | 3855.631 |
| 58+300 | 404336.665 | 8705202.087 | 3880.096 |
| Escalera | 403917.447 | 8704945.296 | 3906.505 |
| Escalera | 403922.427 | 8704947.227 | 3906.141 |
| Escalera | 403919.924 | 8704945.900 | 3906.105 |

| | | | |
|-----------------|------------|-------------|----------|
| Escalera | 403922.883 | 8704937.685 | 3906.857 |
| 57+500 | 403622.518 | 8704872.556 | 3903.215 |
| 57+220 | 403368.805 | 8704809.625 | 3910.498 |
| 56+200 | 402345.155 | 8704541.793 | 3942.754 |
| 53+800 | 400243.970 | 8703819.765 | 4008.788 |
| 53+500 | 399960.875 | 8703834.099 | 4015.263 |
| 53+350 | 399847.182 | 8703782.826 | 4018.463 |
| 52+600 | 399139.654 | 8703629.217 | 4050.375 |
| 52+420 | 398953.333 | 8703623.071 | 4057.166 |
| 51+900 | 398491.340 | 8703484.770 | 4083.357 |
| 51+570 | 398168.051 | 8703407.063 | 4107.939 |
| 51+150 | 397770.487 | 8703331.247 | 4127.276 |
| 50+700 | 397332.725 | 8703154.393 | 4140.461 |
| 50+560 | 397246.679 | 8703082.417 | 4142.256 |
| 49+250 | 396058.773 | 8702643.904 | 4188.124 |
| 49+000 | 395834.252 | 8702595.493 | 4187.904 |
| 48+500 | 395421.431 | 8702265.229 | 4192.15 |
| 48+100 | 395106.537 | 8702020.346 | 4186.982 |
| 47+460 | 394674.393 | 8701559.538 | 4201.447 |
| 45+000 | 392721.435 | 8700176.127 | 4312.18 |
| 44+700 | 392428.696 | 8699969.789 | 4326.412 |
| 43+600 | 391578.530 | 8700021.586 | 4369.942 |
| 43+600 | 391589.603 | 8700023.510 | 4369 |
| 42+680 | 390720.395 | 8700316.384 | 4413.782 |
| 42+400 | 390483.767 | 8700433.179 | 4415.887 |
| 42+400 | 390485.576 | 8700438.558 | 4414.454 |
| 35+160 | 384341.858 | 8701794.444 | 4702.2 |
| 35+160 | 384345.422 | 8701799.543 | 4701.57 |

Fuente: Elaboración propia.

Luego, a manera de “valor medido”, el Cuadro N° 9 muestra las coordenadas de dichas alcantarillas, pontones y escaleras del Cuadro N° 8 pero dichas coordenadas son obtenidas, esta vez, de un levantamiento topográfico tradicional con estación total.

Cuadro N° 11 Cuadro que muestra las coordenadas de las alcantarillas obtenidas a través de un levantamiento topográfico.

| UBICACIÓN | COORDEN. EN LEV. TOP. (d) [m] | | |
|-----------------|-------------------------------|-------------|-------------|
| | Este (Xcn) | Norte (Ycn) | Elev. (Zcn) |
| 67+000 | 408375.760 | 8712445.952 | 3687.162 |
| 67+000 | 408376.576 | 8712446.455 | 3687.164 |
| 66+780 | 408196.313 | 8712297.507 | 3690.085 |
| 66+780 | 408199.408 | 8712293.610 | 3690.105 |
| 63+935 | 407004.859 | 8709889.274 | 3747.303 |
| 62+550 | 406634.556 | 8708571.374 | 3779.129 |
| 61+738 | 406325.484 | 8707829.627 | 3793.767 |
| 61+060 | 406067.603 | 8707216.239 | 3811.791 |
| 60+800 | 405930.184 | 8706999.209 | 3819.072 |
| 60+670 | 405856.182 | 8706887.175 | 3818.503 |
| 60+387 | 405613.797 | 8706711.941 | 3826.877 |
| 59+750 | 405141.899 | 8706329.078 | 3852.069 |
| 59+650 | 405068.083 | 8706243.891 | 3848.652 |
| 59+300 | 404925.781 | 8705956.168 | 3851.957 |
| 59+140 | 404839.414 | 8705802.639 | 3856.11 |
| Puente | 404863.342 | 8705727.630 | 3855.737 |
| Puente | 404873.338 | 8705728.551 | 3855.764 |
| Puente | 404863.601 | 8705724.399 | 3855.736 |
| Puente | 404873.593 | 8705725.379 | 3855.523 |
| 58+300 | 404336.592 | 8705201.868 | 3879.974 |
| Escalera | 403917.174 | 8704945.387 | 3906.517 |
| Escalera | 403922.483 | 8704947.530 | 3906.208 |
| Escalera | 403920.044 | 8704945.758 | 3906.075 |
| Escalera | 403922.938 | 8704937.814 | 3906.648 |
| 57+500 | 403622.508 | 8704872.571 | 3902.925 |
| 57+220 | 403368.895 | 8704809.484 | 3910.362 |
| 56+200 | 402345.318 | 8704541.850 | 3942.578 |
| 53+800 | 400243.779 | 8703819.787 | 4008.634 |
| 53+500 | 399960.869 | 8703833.985 | 4015.42 |

| | | | |
|---------------|------------|-------------|----------|
| 53+350 | 399847.266 | 8703782.683 | 4018.564 |
| 52+600 | 399139.813 | 8703629.112 | 4050.521 |
| 52+420 | 398953.386 | 8703622.960 | 4057.148 |
| 51+900 | 398491.160 | 8703484.639 | 4083.254 |
| 51+570 | 398168.042 | 8703407.227 | 4107.865 |
| 51+150 | 397770.278 | 8703331.182 | 4126.936 |
| 50+700 | 397332.614 | 8703154.613 | 4140.155 |
| 50+560 | 397246.589 | 8703082.707 | 4141.978 |
| 49+250 | 396058.693 | 8702644.115 | 4188.012 |
| 49+000 | 395834.057 | 8702595.547 | 4187.564 |
| 48+500 | 395421.515 | 8702265.540 | 4191.952 |
| 48+100 | 395106.688 | 8702020.485 | 4186.542 |
| 47+460 | 394674.641 | 8701559.528 | 4201.396 |
| 45+000 | 392721.513 | 8700176.086 | 4312.026 |
| 44+700 | 392428.709 | 8699969.452 | 4326.374 |
| 43+600 | 391578.531 | 8700021.576 | 4369.913 |
| 43+600 | 391589.550 | 8700023.622 | 4369.075 |
| 42+680 | 390720.395 | 8700316.310 | 4413.817 |
| 42+400 | 390483.840 | 8700433.209 | 4415.917 |
| 42+400 | 390485.646 | 8700438.500 | 4414.382 |
| 35+160 | 384341.892 | 8701794.426 | 4702.117 |
| 35+160 | 384345.495 | 8701799.675 | 4701.659 |

Fuente: Elaboración propia.

El siguiente paso es hacer uso de las Ecuaciones (4), (5) y (5) para obtener la Raíz del error medio cuadrático de la muestra (Ver Cuadro N°10).

Cuadro N° 12 Cuadro de variación de coordenadas tomadas con procedimientos fotogramétricos y con un levantamiento topográfico junto a la Raíz del Error Medio Cuadrático.

| UBICACIÓN | Variación (d) - (c) [m] | | | Variación ² [m ²] | | |
|---------------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| | (X _{cn} -Y _o) | (Y _{cn} -Y _o) | (Z _{cn} -Z _o) | (X _{cn} -Y _o) ² | (Y _{cn} -Y _o) ² | (Z _{cn} -Z _o) ² |
| 67+000 | 0.1960 | 0.0980 | 0.1680 | 0.0384 | 0.0096 | 0.0282 |
| 67+000 | -0.1090 | -0.0600 | 0.1170 | 0.0119 | 0.0036 | 0.0137 |
| 66+780 | 0.0300 | -0.0530 | 0.0730 | 0.0009 | 0.0028 | 0.0053 |

| | | | | | | |
|-----------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 66+780 | 0.0760 | -0.0770 | 0.0820 | 0.0058 | 0.0059 | 0.0067 |
| 63+935 | 0.0500 | -0.0580 | -0.3910 | 0.0025 | 0.0034 | 0.1529 |
| 62+550 | -0.0910 | 0.0560 | 0.4370 | 0.0083 | 0.0031 | 0.1910 |
| 61+738 | -0.1190 | 0.0470 | 0.0340 | 0.0142 | 0.0022 | 0.0012 |
| 61+060 | -0.0960 | 0.0340 | 0.2130 | 0.0092 | 0.0012 | 0.0454 |
| 60+800 | -0.0330 | -0.0920 | -0.0300 | 0.0011 | 0.0085 | 0.0009 |
| 60+670 | -0.1400 | 0.0260 | -0.4030 | 0.0196 | 0.0007 | 0.1624 |
| 60+387 | 0.0200 | 0.1790 | 0.3740 | 0.0004 | 0.0320 | 0.1399 |
| 59+750 | -0.0230 | 0.0120 | 0.3090 | 0.0005 | 0.0001 | 0.0955 |
| 59+650 | 0.0310 | 0.0090 | -0.4000 | 0.0010 | 0.0001 | 0.1600 |
| 59+300 | -0.0320 | 0.0030 | 0.0020 | 0.0010 | 0.0000 | 0.0000 |
| 59+140 | -0.1690 | 0.0890 | -0.0160 | 0.0286 | 0.0079 | 0.0003 |
| Puente | 0.0920 | -0.0640 | 0.1330 | 0.0085 | 0.0041 | 0.0177 |
| Puente | 0.0440 | -0.0020 | 0.1320 | 0.0019 | 0.0000 | 0.0174 |
| Puente | 0.0930 | -0.1470 | 0.1600 | 0.0086 | 0.0216 | 0.0256 |
| Puente | -0.0090 | -0.0880 | -0.1080 | 0.0001 | 0.0077 | 0.0117 |
| 58+300 | -0.0730 | -0.2190 | -0.1220 | 0.0053 | 0.0480 | 0.0149 |
| Escalera | -0.2730 | 0.0910 | 0.0120 | 0.0745 | 0.0083 | 0.0001 |
| Escalera | 0.0560 | 0.3030 | 0.0670 | 0.0031 | 0.0918 | 0.0045 |
| Escalera | 0.1200 | -0.1420 | -0.0300 | 0.0144 | 0.0202 | 0.0009 |
| Escalera | 0.0550 | 0.1290 | -0.2090 | 0.0030 | 0.0166 | 0.0437 |
| 57+500 | -0.0100 | 0.0150 | -0.2900 | 0.0001 | 0.0002 | 0.0841 |
| 57+220 | 0.0900 | -0.1410 | -0.1360 | 0.0081 | 0.0199 | 0.0185 |
| 56+200 | 0.1630 | 0.0570 | -0.1760 | 0.0266 | 0.0032 | 0.0310 |
| 53+800 | -0.1910 | 0.0220 | -0.1540 | 0.0365 | 0.0005 | 0.0237 |
| 53+500 | -0.0060 | -0.1140 | 0.1570 | 0.0000 | 0.0130 | 0.0246 |
| 53+350 | 0.0840 | -0.1430 | 0.1010 | 0.0071 | 0.0204 | 0.0102 |
| 52+600 | 0.1590 | -0.1050 | 0.1460 | 0.0253 | 0.0110 | 0.0213 |
| 52+420 | 0.0530 | -0.1110 | -0.0180 | 0.0028 | 0.0123 | 0.0003 |
| 51+900 | -0.1800 | -0.1310 | -0.1030 | 0.0324 | 0.0172 | 0.0106 |
| 51+570 | -0.0090 | 0.1640 | -0.0740 | 0.0001 | 0.0269 | 0.0055 |
| 51+150 | -0.2090 | -0.0650 | -0.3400 | 0.0437 | 0.0042 | 0.1156 |

| | | | | | | |
|---------------|---------|---------|---------|--------|--------|--------|
| 50+700 | -0.1110 | 0.2200 | -0.3060 | 0.0123 | 0.0484 | 0.0936 |
| 50+560 | -0.0900 | 0.2900 | -0.2780 | 0.0081 | 0.0841 | 0.0773 |
| 49+250 | -0.0800 | 0.2110 | -0.1120 | 0.0064 | 0.0445 | 0.0125 |
| 49+000 | -0.1950 | 0.0540 | -0.3400 | 0.0380 | 0.0029 | 0.1156 |
| 48+500 | 0.0840 | 0.3110 | -0.1980 | 0.0071 | 0.0967 | 0.0392 |
| 48+100 | 0.1510 | 0.1390 | -0.4400 | 0.0228 | 0.0193 | 0.1936 |
| 47+460 | 0.2480 | -0.0100 | -0.0510 | 0.0615 | 0.0001 | 0.0026 |
| 45+000 | 0.0780 | -0.0410 | -0.1540 | 0.0061 | 0.0017 | 0.0237 |
| 44+700 | 0.0130 | -0.3370 | -0.0380 | 0.0002 | 0.1136 | 0.0014 |
| 43+600 | 0.0010 | -0.0100 | -0.0290 | 0.0000 | 0.0001 | 0.0008 |
| 43+600 | -0.0530 | 0.1120 | 0.0750 | 0.0028 | 0.0125 | 0.0056 |
| 42+680 | 0.0000 | -0.0740 | 0.0350 | 0.0000 | 0.0055 | 0.0012 |
| 42+400 | 0.0730 | 0.0300 | 0.0300 | 0.0053 | 0.0009 | 0.0009 |
| 42+400 | 0.0700 | -0.0580 | -0.0720 | 0.0049 | 0.0034 | 0.0052 |
| 35+160 | 0.0340 | -0.0180 | -0.0830 | 0.0012 | 0.0003 | 0.0069 |
| 35+160 | 0.0730 | 0.1320 | 0.0890 | 0.0053 | 0.0174 | 0.0079 |

Fuente: Elaboración propia.

Los Cuadros N°11 y N°12 nos muestran gráficamente la variación o desfase en las coordenadas a las que en el paso siguiente se le realizara la REMC.

Finalmente de estos 51 puntos se obtiene la REMC para cada eje, dando como resultado los siguientes valores:

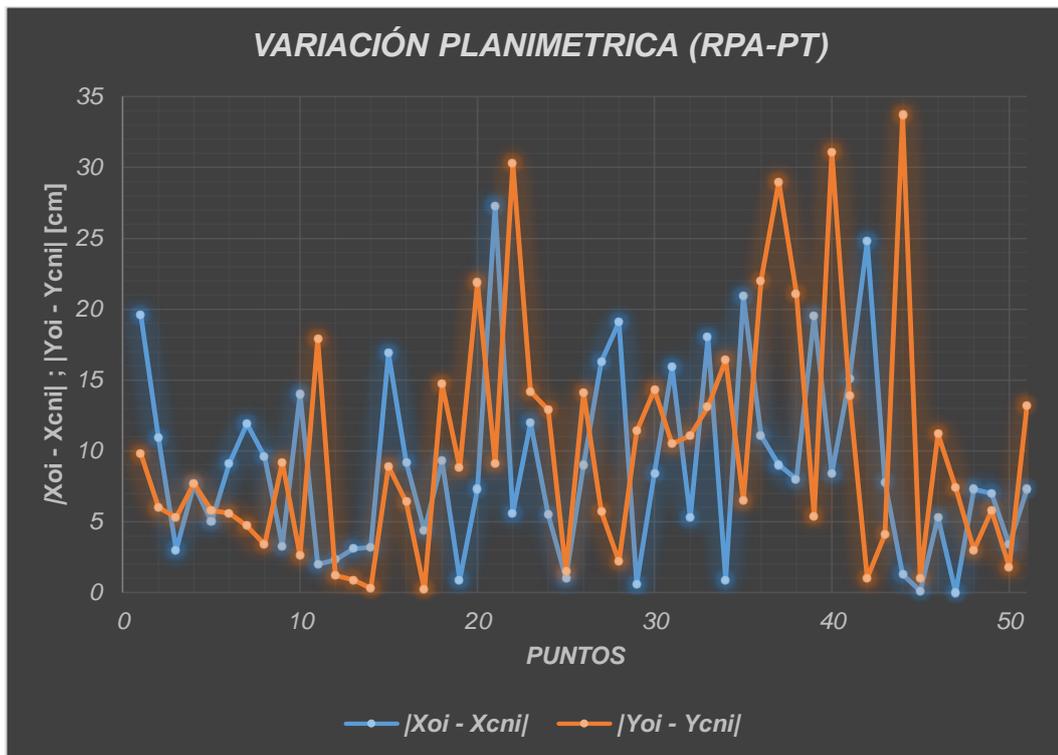
$$REMC_x(Este) = 0.1109 \text{ m} \dots\dots(10)$$

$$REMC_x(Norte) = 0.1313 \text{ m} \dots\dots(11)$$

$$REMC_x(Elevación) = 0.2016 \text{ m} \dots\dots(12)$$

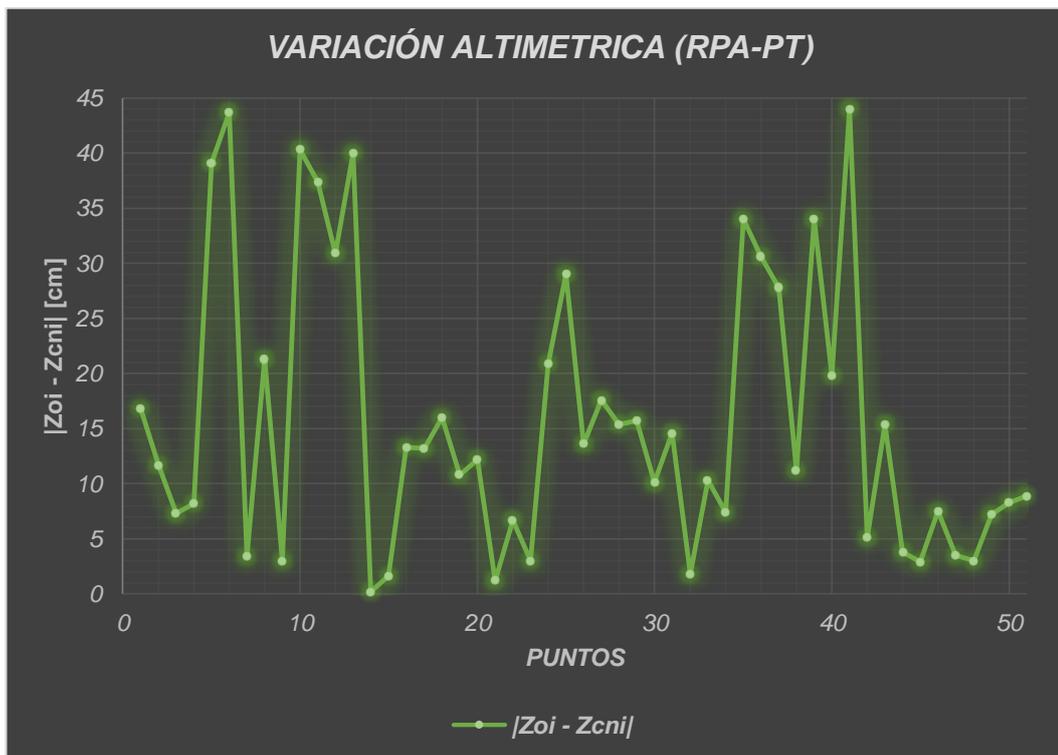
Hay que tener en cuenta en la comparación hecha no se tomó en cuenta el factor combinado al momento de realizar los cálculos propios del levantamiento topográfico por lo que la REMC de los resultados [(7) y (8)] tenga una pequeña variación en la planimetría con respecto a los de la REMC de los resultados [(10) y (11)], pues estos valores deberían ser más cercanos.

Cuadro N° 13 Grafico que muestra un resumen de la variación planimétrica correspondiente a la verificación tipo RPA- Plano Topográfico.



Fuente: Elaboración propia

Cuadro N° 14 Grafico que muestra un resumen de la variación altimétrica correspondiente a la verificación tipo RPA- Plano Topográfico.



Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

Con los resultados obtenidos en este trabajo se concluye que la fotogrametría realizada con una aeronave pilotada remotamente Phantom 4 Pro es una alternativa viable y complementaria al de un levantamiento topográfico tradicional pues reduce el tiempo de trabajo y evita el riesgo innecesario en zonas de trabajo peligrosos.

Para el caso de terrenos accidentados y de pendiente pronunciada, la precisión horizontal presenta valores de la REMC (Este) y REMC (Norte) de 6.71 cm y 11.17 cm respectivamente. En cuanto a la precisión vertical, la REMC (Elevación) fue de 44.44 cm.

Para el caso de terrenos con pocos cambios de pendiente, la precisión horizontal presenta valores de la REMC (Este) y REMC (Norte) de 11.09 cm y 13.13 cm respectivamente. En cuanto a la precisión vertical, la REMC (Elevación) fue de 20.16 cm.

De acuerdo a las especificaciones técnicas del IGN en lo que tiene que ver con la altimetría se observa que para la generación de planos a escalas mayores a 1:2000 es viable el uso de vehículos aéreos pilotados remotamente pues el error máximo permitido a esta escala de cada equidistante es de 50 cm.

De acuerdo a las especificaciones técnicas del IGN para la producción Cartografía y Ortofotos, se establece que para la precisión planimétrica la REMC límite aplicado a mapas a escala 1:500 (zonas urbanas) debe tener un valor 12.5 cm y para mapas a escala 1:1000 / 1:2000 (zonas rurales) una REMC de 25 y 50 cm respectivamente. Por lo que se concluye que para generar Ortofotos validas a escala 1:500 se requiere disminuir la altura de vuelo hasta los 60 o 50 m. Para la generación de Cartografía en zonas rurales la REMC calza en el rango permitido.

RECOMENDACIONES

Para mejorar y disminuir el error de un levantamiento fotogramétrico hay tener en cuenta la densidad y la distribución homogénea de los puntos de control terrestre y así para cumplir los estándares planimétricos y altimétricos requeridos por cualquier proyecto.

En zonas de alta y variable pendiente la densidad de puntos es un factor clave para obtener una precisión de la REMC menor a los 10 cm, sin embargo el cálculo de distancia y áreas en el producto final que son las Ortofotos deben evitarse porque la distorsión presente en los relieves no puede llevarse al plano de la Ortofoto.

Algunos detalles planimétricos como cursos de agua, canales, postes, cables, y tuberías deben tomarse adicionalmente con topografía tradicional pues aun con una buena resolución (GSD) de Ortofoto son difíciles de identificar y clasificar.

El levantamiento fotogramétrico con drones es recomendable en los campos líneas abajo mencionados, pues estos requieren escalas mayores a 1:2000.

- Actualización de cartografía temática
- Cuencas Hidrográficas
- Planeamiento Territorial
- Uso y cobertura vegetal
- Hidrología
- Estudios Forestales

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Aguera-Vega, Francisco et al.** *Assessment of photogrammetric mapping accuracy based on variation ground control points number using unmanned aerial vehicle*. Elsevier, Vol 98, Pag. 221-227, 2016.
- [2] **Aguera-Vega, Francisco et al.** *Accuracy of Digital Surface Models and Orthophotos Derived from Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry*. ASCE, Vol. 143, Tomo 2, 2017.
- [3] **Cárdenas Ruiz, Cesar.** *Performance study of the flight control and path planning for a UAV type Quadrotor*. Tesis de Maestría en Ingeniería Mecánica, Departamento de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica, Universidad Nacional de Colombia, 2017.
- [4] **Claros Zelaya, Rene et al.** *Aplicación de Fotogrametría Aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. Tesis de pregrado, Facultad Multidisciplinaria Oriental, Departamento de Ingeniería y Arquitectura, Universidad de El Salvador, 2016.
- [5] **European Union Committee.** *Civilian Use of Drones in the EU*. 7th Report of Session 2014-2015, House of Lords, United Kingdom, 2015.
- [6] **Felicísimo Pérez, Ángel.** *Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en ciencias ambientales*. Ediciones Pentalfa, 118 pp, Oviedo, España, 1994.
- [7] **García-Cabañas Bueno, José et al.** *Piloto de dron (RPAS)*. Ediciones Paraninfo, 319 pp, Madrid, España, 2016.
- [8] **García-Cabañas Bueno, José et al.** *Guía de mantenimiento y reparación de drones (RPAS)*. Ediciones Paraninfo, 164 pp, Madrid, España, 2018.
- [9] **Jarandilla Altuzarra, Vladimir.** *Restitución fotogramétrica digital para la generación de un mapa fisiográfico y uso actual de la tierra*. Tesis de grado,

- Facultad de Tecnología, Carrera de Topografía y Geodesia, Universidad Mayor de San Andrés, 2014.
- [10] **Laussedat, Aimé.** *La Metrophotographie.* Gauthier-Villars Imprimeur Libraire, Paris, 1899.
- [11] **Macedo Manriquez, Juan.** *Restituidores fotogramétricos en la Facultad de Ingeniería de la UNAM.* Tesis de grado. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, 2009.
- [12] **Martinez-Carricondo, Patricio et al.** *Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points.* Int J Appl Earth Obs Geoinformation, Vol. 72, Pag. 1-10, 2018.
- [13] **Melero Cazorla, David.** *Modelado dinámico y diseño de estrategia de control mediante estimadores para el vuelo autónomo de un quadrotor.* Proyecto de fin de carrera, Escuela Politecnica Superior y Facultad de Ciencias Experimentales, Universidad de Almeria, 2013.
- [14] **Mendoza Dueñas, Jorge.** *Topografía, Técnicas Modernas.* Editorial Sol de Oro, Lima, 2008.
- [15] **Neira Ricouz, Rodrigo.** *Fotografía Aérea.* Tesis de pregrado. Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Escuela de Construcción Civil, Universidad Austral de Chile, 2005.
- [16] **Quispe Enriquez, Omar.** *Propuesta metodológica para la generación de ortofotomapas desde imágenes aéreas obtenidas con microdron-multirotor, área de estudio: playas distrito de Barranco, Lima-Perú.* Tesis de grado. Facultad de Ingeniería Geológica Minera, Metalúrgica y Geográfica, E.A.P. de Ingeniería Geográfica, Universidad Nacional Mayor De San Marcos, 2016.
- [17] **Ruales Salazar, Diego.** *Pertinencia del uso de drones en la caracterización geoespacial del módulo dos junta de agua de riego de la comuna Morlán, Imbabura.* Tesis de Maestría en Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas, Instituto de Postgrado, Universidad Técnica del Norte, Colombia, 2018.

- [18] **Tacca Qquelca, Hilario.** *Comparación de resultados obtenidos de un levantamiento topográfico utilizando la fotogrametría con drones al método tradicional.* Tesis de pregrado, Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela Profesional de Ingeniería Topográfica y Agrimensura, Universidad Nacional del Altiplano, Puno, 2015.
- [19] **Zapata Ocampo, Oscar.** *Fundamentos de fotogrametría para imágenes de contacto y digitales.* Manual de Fotogrametría, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia, 2003.

ANEXOS

A.1 ESPECIFICACIONES DEL PHANTOM 4 PRO

| Aeronave | |
|--|---|
|  | |
| Peso (batería y hélices incluidas) | 1338 g |
| Tamaño diagonal (sin incluir hélices) | 350 mm |
| Velocidad de ascenso máx. | Modo Sport: 6 m/s (19,7 pies/s); Modo GPS: 5 m/s (16,4 pies/s) |
| Velocidad de descenso máx. | Modo Sport: 4 m/s (13,1 pies/s); Modo GPS: 3 m/s (9,8 pies/s) |
| Velocidad máxima | 72 km/h (45 mph) (modo S); 58 km/h (36 mph) (modo A); 50 km/h (31 mph) (modo P) |
| Ángulo de inclinación máximo | 42° (modo Sport); 35° (modo Attitude); 25° (modo GPS) |
| Velocidad angular máxima | 250°/s (modo Sport); 150°/s (modo Attitude) |
| Altitud de vuelo máx. por encima del nivel del mar | 6000 m (19 685 pies) |
| Resistencia máx. al viento | 10 m/s (32,8 pies/s) |
| Tiempo de vuelo máx. | 30 minutos aprox. |
| Intervalo de temperaturas de funcionamiento | de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F) |
| Sistemas de posicionamiento por satélite | GPS/GLONASS |

| | |
|---|---|
| Precisión de vuelo estacionario | Vertical: $\pm 0,1$ m (con Posicionamiento visual); $\pm 0,5$ m (con posicionamiento por GPS) Horizontal: $\pm 0,3$ m (con posicionamiento visual); $\pm 1,5$ m (con posicionamiento por GPS) |
| Estabilizador | |
|  | |
| Estabilización | 3 ejes (cabeceo, alabeo, guiñada) |
| Intervalo controlable | Inclinación: $- 90^\circ$ a $+ 30^\circ$ |
| Velocidad angular máxima controlable | Inclinación: $90^\circ/s$ |
| Precisión de control angular | $\pm 0,02^\circ$ |
| Sistema de visión | |
| Intervalo de velocidad | ≤ 50 km/h (31 mph) a 2 m (6,6 pies) sobre el suelo |
| Intervalo de altitud | de 0 a 10 m (de 0 a 33 pies) |
| Intervalo de funcionamiento | de 0 a 10 m (de 0 a 33 pies) |
| Rango de detección de obstáculos | de 0,7 a 30 m (de 2 a 98 pies) |
| Campo de visión (FOV) | Frontal/Trasero: 60° (horizontal), $\pm 27^\circ$ (vertical) Inferior: 70° (de frente y hacia atrás), 50° (a izquierda y derecha) |
| Frecuencia de medición | Frontal/Trasero: 10 Hz Inferior: 20 Hz |

| | |
|---|---|
| Entorno de funcionamiento | Superficie con patrón claro e iluminación adecuada (lux > 15) |
| Sistema de detección por infrarrojos | |
| Rango de detección de obstáculos | 0,2 - 7 m (0,6 - 23 pies) |
| Campo de visión (FOV) | 70°(horizontal), ±10°(vertical) |
| Frecuencia de medición | 10 Hz |
| Entorno de funcionamiento | Superficies con materiales de reflexión difusa y reflectividad > 8 % (como muros, árboles, personas, etc.) |
| Cámara | |
|  | |
| Sensor | CMOS de 1"; píxeles efectivos: 20 M |
| Objetivo | FOV (campo de visión) 84°, 8,8 mm (equivalente a formato de 35 mm: 24 mm), f/2.8 - f/11, enfoque automático a 1 m - ∞ |
| Intervalo de ISO | Vídeo: 100 - 3200 (Auto); 100 - 6400 (Manual) Foto: 100 - 3200 (Auto); 100 - 12800 (Manual) |
| Obturador mecánico | 8 - 1/2000 s |
| Obturador electrónico | 8 - 1/8000 s |
| Tamaño de imagen | Relación de aspecto 3:2: 5472x3648 Relación de aspecto 4:3: 4864x3648 Relación de aspecto 16:9: 5472x3078 |
| Tamaño de imagen PIV | 4096x2160 (4096x2160 24/25/30/48/50p) 3840x2160 (3840x2160 24/25/30/48/50/60p) 2720x1530 (2720x1530 24/25/30/48/50/60p) |

| | |
|-----------------------------|--|
| | <p>1920x1080 (1920x1080 24/25/30/48/50/60/120p) 1280x720 (1280x720 24/25/30/48/50/60/120p)</p> |
| Modos de fotografía | <p>Un disparo Disparo en ráfagas: 3/5/7/10/14 fotogramas Horquilla de exposición automática (AEB): 3/5 fotogramas en horquilla de exposición a 0.7EV Bias Intervalo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s</p> |
| Modos de grabación de vídeo | <p>H.265</p> <ul style="list-style-type: none"> • C4K: 4096x2160 24/25/30p a 100 Mbps • 4K: 3840x2160 24/25/30p a 100 Mbps • 2,7K: 2720x1530 24/25/30p a 65 Mbps 2720x1530 48/50/60p a 80 Mbps • FHD: 1920x1080 24/25/30p a 50 Mbps 1920x1080 48/50/60p a 65 Mbps 1920x1080 120p a 100 Mbps • HD: 1280x720 24/25/30p a 25 Mbps 1280x720 48/50/60p a 35 Mbps 1280x720 120p a 60 Mbps <p>H.264</p> <ul style="list-style-type: none"> • C4K: 4096x2160 24/25/30/48/50/60p a 100 Mbps • 4K: 3840x2160 24/25/30/48/50/60p a 100 Mbps • 2,7K: 2720x1530 24/25/30p a 80 Mbps 2720x1530 48/50/60p a 100 Mbps • FHD: 1920x1080 24/25/30p a 60 Mbps 1920x1080 48/50/60p a 80 Mbps 1920x1080 120p a 100 Mbps • HD: 1280x720 24/25/30p a 30 Mbps 1280x720 48/50/60p a 45 Mbps 1280x720 120p a 60 Mbps |

| | |
|--|---|
| Tasa de bits de vídeo máx. | 100 Mbps |
| Sistemas de archivo admitidos | FAT32 (≤ 32 GB); exFAT (> 32 GB) |
| Fotografía | JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG |
| Vídeo | MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265) |
| Tarjetas SD admitidas | MicroSD, Capacidad máxima: 128 GB. Velocidad de escritura ≥ 15 MB/s; se necesita clasificación clase 10 o UHS-1 |
| Intervalo de temperatura de funcionamiento | de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F) |
| Control remoto | |
|  | |
| Frecuencia de funcionamiento | 2,400 - 2,483 GHz y 5,725 - 5,825 GHz |
| Distancia de transmisión máxima | 2,400 - 2,483 GHz (sin obstáculos, libre de interferencias) FCC: 7 km (4,3 mi); CE: 3,5 km (2,2 mi); SRRC: 4 km (2,5 mi) 5,725 - 5,825 GHz (sin obstáculos, libre de interferencias) FCC: 7 km (4,3 mi); CE: 2 km (1,2 mi); SRRC: 5 km (3,1 mi) |
| Temperatura de funcionamiento | de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F) |
| Batería | 6000 mAh LiPo 2S |
| Potencia de transmisión (EIRP) | 2,400 - 2,483 GHz: FCC: 26 dBm; CE: 17 dBm; SRRC: 20 dBm |

| | |
|---|--|
| | 5,725 - 5,825 GHz: FCC: 28 dBm; CE: 14 dBm; SRRc: 20 dBm |
| Corriente de funcionamiento | 1,2 A a 7,4 V |
| Puerto de salida de vídeo | GL300E: HDMI GL300F: USB |
| Soporte para dispositivo móvil | GL300E: Dispositivo de visualización integrado (pantalla de 5,5 pulgadas, 1920x1080, 1000 cd/m2, sistema Android, 4G RAM+16G ROM) GL300F: Tabletas y teléfonos inteligentes |
| Cargador | |
|  | |
| Voltaje | 17,5 V |
| Potencia nominal | 100 W |
| Batería de Vuelo Inteligente | |
|  | |
| Capacidad | 5870 mAh |
| Voltaje | 15,2 V |
| Tipo de batería | LiPo 4S |
| Energía | 89,2 Wh |
| Peso neto | 468 g |
| Temperatura de carga | De 5 a 40 °C (de 41 a 104 °F) |
| Potencia de carga máx. | 100 W |

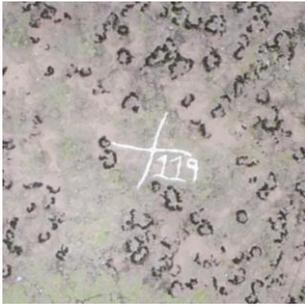
Fuente: Página Oficial DJI

A.2 PUNTOS DE CONTROL TERRESTRE

Cuadro N° 15 Tabla que muestra los 41 puntos de control terrestre o fotocontroles usados en la sección 4.2.1.

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| PCT#1: Km 67+000 | PCT#2: Km 67+200 | PCT#3: Km 66+400 |
|  |  |  |
| PCT#4: Km 66+120 | PCT#41: Km 56+210 | PCT#42: Km 55+960 |
|  |  |  |
| PCT#44: Km 55+300 | PCT#46: Km 54+960 | PCT#59: Km 44+540 |
|  |  |  |
| PCT#60: Km 44+350 | PCT#62: Km 44+030 | PCT#66: Km 44+200 |

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| PCT#69: Km 44+200 | PCT#70: Km 44+200 | PCT#77: Km 44+200 |
|  |  |  |
| PCT#79: Km 44+200 | PCT#94: Km 38+780 | PCT#95: Km 38+640 |
|  |  |  |
| PCT#98: Km 38+400 | PCT#100: Km 38+400 | PCT#102: Km 38+400 |
|  |  |  |
| PCT#104: Km 38+400 | PCT#113: Km 25+750 | PCT#115: Km 25+750 |

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| PCT#117: Km 25+750 | PCT#119: Km 25+750 | PCT#121: Km 45+300 |
|  |  |  |
| PCT#122: Km 45+300 | PCT#124: Km 45+300 | PCT#126: Km 45+300 |
|  |  |  |
| PCT#127: Km 45+300 | PCT#129: Km 45+300 | PCT#130: Km 45+300 |
|  |  |  |
| PCT#131: Km 45+300 | PCT#133: Km 45+300 | PCT#134: Km 50+800 |

| | | |
|---|---|---|
|  |  |  |
| <p>PCT#135: Km 50+800</p> | <p>PCT#137: Km 50+800</p> | <p>PCT#139: Km 50+800</p> |
|  |  | |
| <p>PCT#141: Km 50+800</p> | <p>PCT#142: Km 50+800</p> | |

Fuente: Elaboración propia.

A.3 REQUERIMIENTOS DE UNA COMPUTADORA PARA EL USO DEL SOFTWARE AGISOFT

La Laptop o Estación de Trabajo debe presentar como mínimo las especificaciones detalladas en el Cuadro N°9 para que el procesamiento pueda culminar correctamente.

Cuadro N° 16 Requerimientos básicos de una computadora para su uso en fotogrametría con RPA.

| CONFIGURACIÓN BÁSICA (hasta 32 GB de RAM) | |
|---|---|
| CPU | CPU Intel Core i7 de cuatro núcleos, Socket LGA 1150 o 1155 (Kaby Lake, Skylake, Broadwell, Haswell, Ivy Bridge o Sandy Bridge) |
| Placa Base | Cualquier modelo LGA 1150 o 1155 con 4 ranuras DDR3 y al menos 1 ranura PCI Express x16 |
| RAM | DDR3-1600, 4 x 4 GB (16 GB en total) o 4 x 8 GB (32 GB en total) |
| GPU | Nvidia GeForce GTX 980 o GeForce GTX 1080 (opcional) |

Fuente: www.agisoft.com

Requisitos específicos de Memoria RAM

Durante la construcción de la Nube densa y la generación de Malla generalmente tiene el mayor consumo de memoria, especialmente si el modelo está construido en calidad Media o Alta.

Para el procesamiento de fotografías aéreas, *PhotoScan* implementa un modo de procesamiento *Height-field Mode*, que está altamente optimizado para este tipo de datos. Permite procesar muchas más fotos (varios cientos o miles), de lo que es posible usando solo el Modo Arbitrario.

El consumo de memoria durante el proceso de Alineación de la foto suele ser menor, pero puede ser comparable o incluso superar la cantidad de memoria requerida para la construcción del modelo en el modo Point Cloud (Nube de Puntos).

Consumo de Memoria RAM para la orientación de Fotos

El consumo de memoria durante la alineación de fotos depende principalmente del número de fotos que se alinean, y prácticamente no depende de la resolución de las fotos individuales.

Cuadro N° 17 Tabla que muestra el consumo de memoria RAM por el número de fotos a orientar.

| Numero de Fotos | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 |
|--------------------|--------|------|--------|------|-------|-------|-------|
| Consumo de Memoria | 500 MB | 1 GB | 2.5 GB | 5 GB | 10 GB | 25 GB | 50 GB |

Fuente: www.agisoft.com

Consumo de memoria RAM para la construcción de un modelo

El consumo de memoria en el modo *Height-field* (para fotogrametría) depende del número de fotos, su resolución, la calidad seleccionada y superposición. La dependencia del número de fotos y su resolución es aproximadamente lineal. En la siguiente tabla se muestra el consumo aproximado de memoria para una resolución de foto de 12 MegaPíxeles.

Cuadro N° 18 Cuadro que muestra el consumo de memoria RAM de acuerdo al número de fotos y calidad en la que se procesara.

| Numero de Fotos | 100 | 200 | 500 | 1000 | 2000 | 5000 | 10000 |
|--------------------|--------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|
| Calidad más Baja | 25 MB | 50 MB | 125 MB | 250 MB | 500 MB | 1.25 GB | 2.5 GB |
| Calidad Baja | 100 MB | 200 MB | 500 MB | 1 GB | 2 GB | 5 GB | 10 GB |
| Calidad Media | 400 MB | 800 MB | 2 GB | 4 GB | 8 GB | 20 GB | 40 GB |
| Alta Calidad | 1.6 GB | 3.2 GB | 8 GB | 16 GB | 32 GB | 80 GB | 160 GB |
| Ultra alta Calidad | 6.4 GB | 12.8 GB | 32 GB | 64 GB | 128 GB | 320 GB | 640 GB |

Fuente: www.agisoft.com

A.4 TdR DEL PROYECTO

En los TdR (Términos de Referencia) de cualquier proyecto se encuentran plasmados los requerimientos técnicos para la correcta elaboración de dicho estudio. Se muestra a continuación en las imágenes lo referente a la especialidad de Topografía y al de Fotogrametría.



PERÚ
 Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Viceministerio de Transportes

Provias Nacional

46
904

- Con los errores de cierre tolerables se efectuará la compensación de ángulos y distancias y la determinación final de las coordenadas UTM de los vértices.
- Finalmente se realizará la respectiva conversión de coordenadas UTM del sistema WGS84 a coordenadas TOPOGRÁFICAS PLANAS, que serán verificadas en campo y con los cuales se efectuarán los levantamientos topográficos y replanteos requeridos.
- Deberá incluir la ficha informativa de los vértices de la poligonal de apoyo básica y de las auxiliares, en las que indique las coordenadas UTM y topográficas, y la información fotográfica de su ubicación.
- EL CONSULTOR deberá presentar un cuadro de resumen de coordenadas UTM y Topográficas del estacado del eje de la vía existente, cada 20.00m en tangente y cada 10.00m en curvas, ubicación de los puentes existentes, obras de arte existentes, BM's, Puntos GPS.

2. TOPOGRAFÍA

a. Nivelación

- Se buscará como mínimo un (01) Punto de Control Vertical o Bench Mark (BM), perteneciente a la Red de Nivelación Nacional del Instituto Nacional Geográfico (IGN), cercano a la zona del proyecto.
- Se establecerán BM's para el proyecto, los cuales deberán estar distribuidos a cada 500 m, en promedio, a lo largo del eje de la vía proyectada, desde el inicio (BM-0) hasta el final, inclusive. Éstos BM's deberán colocarse en lugares debidamente protegidos, fuera del alcance de los futuros trabajos en la zona del eje proyectado, y deberán referenciarse a dos puntos inamovibles.
- Los BM's se deben monumentar mediante hitos de concreto de 0.30x0.30x0.40 m., con fierro corrugado de media pulgada (Ø1/2"), consignándose sus respectivos puntos de referencia (R1, R2).
- La nivelación se realizará por el método de Nivelación Geométrica. El circuito de nivelación será de ida y vuelta (circuito cerrado) o de similares características; cuya longitud de ida (o vuelta) será de 500 m aproximadamente.
- Siguiendo el mismo método de nivelación geométrica, con la cota del BM del IGN se obtendrá la «Cota de Partida». Con la «Cota de Partida» se obtendrá la cota del BM-0. A partir de la cota del BM-0 se obtendrá la cota del BM más próximo.
- Para la obtención de las cotas de los demás BM's será siguiendo el mismo procedimiento; es decir, iniciando y terminando en dos (02) BM consecutivos.
- La tolerancia de cierre o Error de Cierre permitido (E_{cp}) deberá ser de acuerdo a la siguiente expresión expresada en metros: $0.012x\sqrt{k}$ (ó $0.012xk^{1/2}$), donde el valor de "k" es la distancia de desarrollo de la nivelación expresada en kilómetros.
- En caso no se encuentre un BM del IGN perteneciente a la Red de Nivelación Nacional cerca de la zona del proyecto, la cota del BM de inicio será obtenido por el **método de Georeferenciación** a partir de la cota de otro BM perteneciente a la Red de Nivelación Nacional del IGN y en el cual se procesará con el Modelo Geoidal EGM2008. Para la utilización de este método y las razones de su empleo, EL CONSULTOR deberá sustentarlo y exponer a la Unidad Gerencial de Estudios para su aprobación.
- Se deberá presentar lo siguiente:
 - Informe describiendo la metodología de trabajo, la cantidad de circuitos realizados. Así también el Error de cierre permitido (error teórico) y el Error cometido (error de campo). Así también se deberá indicar los equipos topográficos utilizados, recursos humanos empleados (brigadas), tiempo de duración.
 - Se deberá presentar los cuadros de cálculo de cada Circuito de Nivelación, sus cotas finales compensadas, juntamente con sus errores teóricos y errores de campo.
 - Se deberá presentar un cuadro de resumen de las cotas finales de los BM's, de los Puntos de Control (georeferenciados), de los vértices de las Poligonales de Apoyo, de los Puntos de Control para Levantamientos Complementarios y de algún otro punto de importancia en el proyecto.
 - Se deberá presentar los **Certificados de Calibración** de los Equipos Topográficos a utilizar, emitidas por reconocidas empresas y garantizar el buen estado de funcionamiento de dichos





TÉRMINOS DE REFERENCIA
 Estudio Definitivo del Proyecto: Mejoramiento de la Carretera Puente Ricardo Palma – La Oroya: Variante Emp. PE-022 Km. 101+379 (Río Blanco) – Emp. Ruta PE-3S Km. 21+918 (Huan)

Página 13



PERÚ Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Viceministerio de Transportes

Provias Nacional

equipos. Los certificados de calibración no podrán tener una antigüedad mayor a seis (06) meses durante la ejecución de los trabajos de campo.

b. Definición del Área del Levantamiento Topográfico

- Se definirá el área a levantar, sobre planos a escalas en zona rural de 1/2000 y en zona urbana a escala 1/500, teniendo en cuenta la longitud del proyecto, el ancho suficiente para poder efectuar variantes siendo el mínimo aceptable de 30 metros a cada lado del eje preliminar y en coordinación previa del requerimiento de las demás especialidades. En el caso de zonas urbanas, el área se deberá ampliar 30.00 m a cada lado de las calles que interceptan a la vía proyectada, a partir del límite lateral de cada lado de la carretera.

c. Red de Puntos

- Se deberá establecer una red de puntos ubicados a distancias no mayores a 10 metros, o menores en caso de existir variaciones en el relieve del terreno.
- Mediante un equipo de Estación Total de hasta 5" segundos de precisión, se medirán ángulos, distancias y cotas a los puntos de la red, para su representación en las tres coordenadas (N, E, h) y descripción de los mismos. En el caso de existir puntos inaccesibles, el levantamiento se ejecutará mediante el sistema láser, incorporado a la estación total.
- Se elaborará la red de puntos TIN (Triangulated Irregular Network), o DTM (Digital Terrain Modelling) los que se utilizarán para la generación de las curvas de nivel.
- La ubicación y densidad de los puntos puede ser verificada mediante el TIN o DTM, asimismo la unión de los mismos debe ser revisada y depurada por el especialista de EL CONSULTOR, responsable del levantamiento topográfico (No del Dibujante).
- EL CONSULTOR deberá presentar un **plano topográfico de densidad de puntos**, con la finalidad de verificar el orden, seccionamiento y procedimiento de trabajo en campo, anexando el eje proyectado y detalles existentes.

d. Levantamiento Topográfico

- Los levantamientos topográficos se efectuarán con estación total por radiación a partir de los vértices de las poligonales, cuyas coordenadas topográficas fueron obtenidos de los puntos de control de georeferenciación para el control planimétrico.
- Se colocarán BM's (Bench Mark) monumentados con hitos de concreto cada 500 m (cada BM deberá de llevar inscrito la cota nivelada), en lugares debidamente protegidos, fuera del alcance de los trabajos y referenciados a puntos inamovibles, tomando como referencia las cotas de los hitos de control vertical del IGN más cercanos que existan en la zona.
- Las cotas de los BM's y de las poligonales de apoyo, se nivelarán diferencialmente (geoméricamente) y se cerrarán cada 500 m. con nivelación de ida y vuelta. La tolerancia de cierre será de $0.012 \sqrt{k}$ metros (k: distancia nivelada en kilómetros).
- En caso de no encontrarse BM's de la Red de Nivelación Nacional del IGN relativamente cerca de la zona del proyecto, previa coordinación y conformidad del especialista de la Unidad Gerencial de Estudios, se podrá emplear la altura ortométrica resultante de un punto, procesado con el Modelo Geoidal EGM2008, medido a partir de un BM Oficial, mediante métodos geodésicos.

e. Elaboración del Trazo y Definición del Eje Proyectado - Método Directo

- EL CONSULTOR deberá elaborar el trazo de la vía proyectada mediante el método directo, el cual consiste en definir un eje aproximado en campo durante los trabajos del levantamiento topográfico, el cual será ajustado en gabinete, para su posterior replanteo, terminado el diseño geométrico en coordinación con las demás especialidades.

f. Representación Gráfica del Terreno

- **Detalles Planimétricos.**- Se representarán todos los detalles y particularidades de la superficie del terreno, tales como: vías existentes, centros poblados, ríos, cursos de agua, canales, muros, cercos,



TÉRMINOS DE REFERENCIA

Estudio Definitivo del Proyecto: Mejoramiento de la Carretera Puente Ricardo Palma – La Oroya: Variante Emp. PE-022 Km. 101+379 (Río Blanco) – Emp. Ruta PE 3S Km. 21+918 (Huari)

Página 14



PERÚ Ministerio de Transportes y Comunicaciones

Viceministerio de Transportes

Proviás Nacional

45

903

torres, postes, cables, edificaciones, viviendas, veredas, líneas de fachada, tapa de buzones, tuberías, gaseoductos, oleoductos etc. (debidamente representados mediante una simbología adecuada y con la respectiva toponimia).

- **Detalles Altimétricos.** - Se representará la altimetría del terreno generadas en el levantamiento, el que deberá mostrar todos los detalles altimétricos, mediante las curvas de nivel, diferenciando las curvas maestras de las intermedias por el color y grosor del trazo, debiendo estar las primeras debidamente acotadas. El intervalo entre las curvas de nivel debe ser de 2 metros. Se deberá indicar los puntos en las cumbres y en las depresiones mediante su cota respectiva.
- **Plano Topográfico.** - Se elaborará el plano topográfico a escala 1:2,000 con indicación de los ejes coordenados, señalando los valores Norte y Este de cada retícula del sistema de coordenadas, la distancia entre los ejes de coordenadas, debe ser de 200 metros como máximo. El dibujo de las curvas de nivel, deberá ser revisado por el ingeniero especialista, responsable del levantamiento topográfico, (no del dibujante).
- Consultor deberá obtener del levantamiento topográfico el gráfico de curvas horizontales del eje existente con su respectivo cuadro de elementos de curva. Asimismo, obtendrá el perfil longitudinal de la vía existente, con su respectivo cuadro de pendientes y las secciones típicas existentes. Con ello, el Consultor realizará el cálculo de la longitud de la vía actual en kilómetros total y por tramos, el ancho de calzada y berma en metros, subidas y bajadas (m/km), número de subidas y bajadas (N°/Km) y curvaturas (grados/km) por tramo de la vía existente, información requerida para la evaluación económica de la situación sin proyecto.

g. **Levantamientos Topográficos Complementarios**

Se incluyen los levantamientos topográficos requeridos para el diseño de puentes, intersecciones viales, muros, obras de arte, áreas afectadas, áreas de fuentes de agua, depósitos de material excedente y canteras, área destinada para el diseño del peaje, etc.

- En las zonas urbanas la topografía deberá incluir todos los detalles existentes, incluyendo cotas, veredas, líneas de fachada, tapas de buzones, postes, etc. debiendo coordinar con las entidades que administren los servicios de energía eléctrica, teléfono, redes de comunicación, agua y desagüe etc. Los planos en planta de los poblados atravesados por la vía se presentarán a escala 1:500, con curvas de nivel cada 0.50 metros, indicando el ancho de la vía, bermas, veredas, construcciones (línea de fachadas), intersecciones con calles o caminos, paraderos, postes, tapas de buzones, etc. EL CONSULTOR deberá considerar los planes de expansión urbana que pudieran existir en la zona para lo cual coordinará con las autoridades municipales y/o gobiernos locales.
- En los cauces de ríos, cursos de agua menores y huaycos, se efectuarán los levantamientos topográficos necesarios para diseñar las obras de drenaje y obras de arte complementarias, materializando poligonales auxiliares a lo largo del cauce. Las longitudes mínimas de levantamiento serán:

| Estructura Existente o Proyectada | Longitud de Levantamiento | | |
|-----------------------------------|---------------------------|-------------|-----------------------------|
| | Aguas Arriba | Aguas Abajo | A los extremos de la Ribera |
| Puentes | 500 m | 350 m. | 30 m. |
| Alcantarillas | 200 m | 100 m | 30 m. |
| Badenes | 200 m | 100 m | 30 m. |

- Se tomarán secciones, perfiles y niveles a detalle en los cruces con otras vías, intersección de calles, canales, acequias, alcantarillas, badenes y muros proyectados y otros que tengan incidencia en el trazo, para poder definir las soluciones más convenientes.
- En las zonas de erosión de riberas el límite del levantamiento topográfico deberá ser de 200 m. aguas arriba y de 100 metros aguas abajo, más la longitud del área afectada en un ancho de faja mínimo de 30 metros hacia los lados extremos de la ribera.



TERMINOS DE REFERENCIA

Estudio Definitivo del Proyecto: Mejoramiento de la Carretera Puente Ricardo Palma – La Oroya: Variante Emp. PE-022 Km. 101+379 (Río Blanco) – Emp. Ruta PE-3S Km. 21+918 (Huari)

Página 15



- Se efectuará un registro completo de la ocupación del derecho de vía, a fin de individualizar las edificaciones, cultivos, puntos de venta y otros. En caso de afectar edificaciones o terrenos de propiedad privada o ante la necesidad de ensanchamiento de la vía, corrección de trazado o variantes, se efectuarán levantamientos topográficos complementarios.
- La extensión de las áreas y perímetros del levantamiento topográfico, para canteras y depósitos de material excedente (DME's), deberán ser representadas en un plano topográfico para respectiva revisión y verificación por la Unidad Gerencial de Estudios.
- Se realizará un inventario de todas las obras de arte, alcantarillas, badenes, muros de contención, etc., indicando su ubicación, su diámetro o dimensiones, las cotas de fondo a la entrada y salida.
- EL CONSULTOR deberá demostrar con certificados de calibración emitidas por empresas reconocidas, el buen estado de los equipos topográficos a utilizar. Los certificados de calibración de los equipos no podrán tener una antigüedad mayor a seis (06) meses para su empleo en la ejecución de los trabajos de campo.
- Asimismo, EL CONSULTOR podrá proponer a la Unidad Gerencial de Estudios, el uso de otras metodologías, tal como la Fotogrametría, o el uso de la geodesia mediante el método de RTK (Tiempo Real), en cuyo caso, el costo será asumido por EL CONSULTOR, y consecuentemente no conllevará a ningún costo adicional a cargo de PROVIAS NACIONAL. Se deberá presentar un plano clave sectorizado de las áreas de levantamiento con los diferentes tipos de equipos y metodologías (Taqumetría, método RTK, escaneo laser, fotogrametría, etc.).

3. DISEÑO GEOMÉTRICO

a. Generalidades

Para la definición del eje proyectado, el Consultor deberá tomar en cuenta el diseño vial de 06 vías de evitamiento, ubicados en las localidades de Chococna (Km 04+820 aprox.), Pomacocha (Km 23+180 aprox.), San Cristóbal (34+810 aprox.), Andaychagua (41+560 aprox.), Huayhuay (54+320 aprox.) y Huari (67+150 aprox.) respectivamente.

b. Normatividad

Se utilizará la Normatividad Vigente a la fecha, durante la elaboración del Estudio, incluyendo sus modificatorias de ser el caso.

Para el diseño se utilizarán programas de cómputo (software) de diseño vial, que cuenten con aceptación internacional o nacional.

c. Características de Diseño

- EL CONSULTOR, estudiará y propondrá, para la revisión y conformidad del especialista de la Unidad Gerencial de Estudios, la velocidad directriz, distancias de visibilidad de parada y sobrepaso y las secciones típicas de diseño, en concordancia con la clasificación de la carretera, la demanda proyectada, el tipo de topografía, los suelos, el clima, etc.
- Utilizando los planos de topografía de detalle, se diseñará el eje definitivo de la vía.
- Tendrá especial atención en la solución a considerar para el diseño en los tramos con pavimento existente en coordinación con la entidad.
- El proyecto requiere conseguir un alineamiento horizontal homogéneo, donde tangentes y curvas se sucedan armónicamente, evitando en lo posible la utilización de radios mínimos.
- Deberá tener en cuenta para la proyección de las secciones típicas en las zonas accidentadas, el ancho necesario para la proyección de barreras de seguridad.
- EL CONSULTOR priorizará al inicio de los trabajos de campo, la definición de los ejes de los puentes, a fin de dar frente a las perforaciones y demás estudios básicos para su diseño. Para lo cual se recomienda la constante coordinación entre los especialistas involucrados.
- Se indicarán los puntos del eje, distanciados cada 20 metros en tangente y 10 metros en curvas, identificándolos mediante la progresiva correspondiente.



TÉRMINOS DE REFERENCIA

Estudio Definitivo del Proyecto: Mejoramiento de la Carretera Puente Ricardo Palma – La Oroya: Variante Emp. PE-022 Km. 101+379 (Río Blanco) – Emp. Ruta PE-3S Km. 21+918 (Huari)

Página 16