



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica

**Análisis comparativo de productos cartográficos
elaborados a escala grande, obtenidos mediante
fotogrametría con RPAS y topografía con tecnología
GNSS – RTK**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo

AUTOR

José OROPEZA JULCARIMA

ASESOR

Luis Alberto HUAMÁN AMASIFUEN

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Oropeza, J. (2023). *Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y topografía con tecnología GNSS – RTK*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	José Oropeza Julcarima.
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47143096
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-5242-648X
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Luis Alberto Huamán Amasifuen
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	43322204
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0003-0834-3860
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Jose Antonio Sandoval Casas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08800785
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	José Luis Quispe Vílchez
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08119070
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Rolando Yarihuaman Aguilar
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07475732
Datos de investigación	

Línea de investigación	C.0.3.25. Tecnología de información y aplicaciones de sistemas
Grupo de investigación	Investigación en Geomática para la Gestión del Territorio - IGGT
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento.
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Junín Provincia: Yauli Distritos: Huay-Huay Latitud: -11.7443702 Longitud: -76.022148 País: Perú Departamento: Lima Provincia: Cañete Distritos: Asia Latitud: -12.725476 Longitud: -76.624002
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Marzo 2018 - diciembre 2022
URL de disciplinas OCDE	Ciencias de la Tierra, Ciencias ambientales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.00.00 Ingeniería, Tecnología https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.00.00



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO

En el Salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Geográfica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el día jueves 16 de marzo del 2023, siendo las 17:00 horas, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS

Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VILCHEZ

Ing. ROLANDO YARIHUAMAN AGUILAR

Presidente

Miembro

Miembro

Reunidos en Acto Académico Público de Sustentación de la Tesis titulada: **"ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS ELABORADOS A ESCALA GRANDE, OBTENIDOS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON RPAS Y TOPOGRAFÍA CON TECNOLOGÍA GNSS – RTK "** Presentada por el Bachiller **JOSÉ OROPEZA JULCARIMA**, para optar el Título Profesional de Ingeniero Geógrafo.

Expuesta la Tesis; los miembros del Jurado plantearon a la Bachiller las preguntas pertinentes, que fueron absueltas por el tesista: *JOSÉ OROPEZA JULCARIMA A SATISFACCIÓN*

Concluida la sustentación de Tesis, el Jurado procedió a evaluar y calificar la calidad y sustentación en secreto, cuyo calificativo fue: *DIECISIETE (17) APROBADO SOBRESALIENTE*

Habiendo sido aprobada la Sustentación de la Tesis por el Jurado Calificador, el Presidente del Jurado recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO GEÓGRAFO, a Don **JOSÉ OROPEZA JULCARIMA**

Siendo las *18:00* horas, se dio por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (05) Actas Originales de la Sustentación de Tesis, firmadas por el Jurado Calificador.

Ciudad Universitaria, 16 de marzo del 2023

[Firma]
Ing. JOSÉ ANTONIO SANDOVAL CASAS
PRESIDENTE

[Firma]
Ing. ROLANDO YARIHUAMAN AGUILAR
MIEMBRO

[Firma]
Ing. JOSÉ LUIS QUISPE VILCHEZ
MIEMBRO

[Firma]
Ing. LUIS ALBERTO HUAMÁN AMASIFUEN
ASESOR DE TESIS



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

INFORME DE ORIGINALIDAD

DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL INGENIERIA GEOGRÁFICA

Dr. Francisco Alejandro Alcántara Boza

OPERADOR DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES

Carla Marivi Ccora Huaman

DOCUMENTO EVALUADO:

Tesis para optar el Grado Académico de INGENIERO GEÓGRAFO titulado: «ANÁLISIS COMPARATIVO DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS ELABORADOS A ESCALA GRANDE, OBTENIDOS MEDIANTE FOTOGRAMETRÍA CON RPAS Y TOPOGRAFÍA CON TECNOLOGÍA GNSS – RTK»

AUTOR DEL DOCUMENTO:

Bach. JOSE OROPEZA JULCARIMA

FECHA DE RECEPCIÓN DEL DOCUMENTO:

08/04/2022

FECHA DE APLICACIÓN DEL PROGRAMA INFORMÁTICO DE SIMILITUDES:

11/04/2022

SOFTWARE UTILIZADO

Turnitin

CONFIGURACIÓN DEL PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

- Excluye textos entrecomillados
- Excluye fuentes para buscar similitud
- Excluye Bibliografía
- Excluye cadenas menores a 35 palabras

PORCENTAJE DE SIMILITUDES SEGÚN PROGRAMA DETECTOR DE SIMILITUDES

Siete por ciento (07%)

FUENTES ORIGINALES DE LAS SIMILITUDES ENCONTRADAS

Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología GNSS – RTK

Informe de Originalidad

	7%	7%	1%	2%
	ÍNDICE DE SIMILITUD	FUENTES DE INTERNET	PUBLICACIONES	TRABAJOS DEL ESTUDIANTE
Fuentes Principales				
1	dokumen.pub	Fuente de Internet	1 %	
2	hdl.handle.net	Fuente de Internet	1 %	
3	repositorio.unfv.edu.pe	Fuente de Internet	1 %	
4	cybertesis.unmsm.edu.pe	Fuente de Internet	1 %	
5	idoc.pub	Fuente de Internet	1 %	
6	edoc.pub	Fuente de Internet	1 %	
7	www.cel.cat	Fuente de Internet	<1 %	
8	repositorio.unsch.edu.pe	Fuente de Internet	<1 %	

9	protectyourrights.net	Fuente de Internet	<1 %
10	Submitted to Universidad de Costa Rica	Trabajo del estudiante	<1 %
11	dronprofesional.com	Fuente de Internet	<1 %
12	kpn.com.uy	Fuente de Internet	<1 %
13	tecnonewsnew.blogspot.com	Fuente de Internet	<1 %
14	www.imf.org	Fuente de Internet	<1 %
15	slideplayer.es	Fuente de Internet	<1 %
16	dspace.unl.edu.ec	Fuente de Internet	<1 %
17	es.slideshare.net	Fuente de Internet	<1 %



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS

Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y GEOGRÁFICA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

OBSERVACIONES

Ninguna

CALIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones

11/04/2022

Atentamente,



UNMSM

Firmado digitalmente por
ALCANTARA BOZA Francisco
Alejandro FAU 20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 11.04.2022 14:38:51 -05:00

Dr. FRANCISCO ALEJANDRO ALCANTARA BOZA
DIRECTOR DE LA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA(e)

DEDICATORIA

“A Dios por cuidarme en todo momento, y a
mi familia por su sacrificio constante y
apoyo en este camino de ser una persona con
valores y ética Profesional.”

AGRADECIMIENTOS

Quiero extender un agradecimiento especial al grupo de investigación de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos (UNMSM), denominado “Investigación en Geomática para la Gestión del Territorio” (IGGT), del cual soy miembro y tesista en el proyecto de investigación "Precisión de los levantamientos topográficos efectuados con un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS)", código N° C18162111. Este grupo fue constituido para desarrollar proyectos de investigación en Geomática, que agrupa a los diversos procesos de la tecnología de información geográfica tales como las principales geociencias de la Cartografía, Fotogrametría, Topografía, Geodesia, Percepción Remota y Teledetección, Sistema de Información Geográfica. Cuyo aporte académico y práctico fue fundamental para el desarrollo de este presente trabajo de investigación.

Estoy seguro que este proyecto al igual que otros de IGGT conducirán a la planificación y gestión territorial, gestión de riesgos ante desastres y su adaptación al cambio climático, zonificación ecológica económica y el ordenamiento territorial, formulación de planes de desarrollo a diversos niveles de análisis territoriales, que permita una reacción inmediata ante los mismos, para su uso y ocupación racional y su desarrollo sostenible, así como la evaluación, manejo y conservación de los recursos naturales.

TABLA DE CONTENIDO

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	13
1.2. FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA	14
1.2.1. PREGUNTA GENERAL	14
1.2.2. PREGUNTAS ESPECÍFICAS	14
1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	14
1.3.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA	14
1.3.2. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA	14
1.3.3. JUSTIFICACIÓN SOCIAL	15
1.4. OBJETIVOS	15
1.4.1. OBJETIVO GENERAL	15
1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.5. HIPÓTESIS	15
1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL	15
1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS	15
1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES	16
1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE	16
1.6.2. VARIABLE DEPENDIENTE	16
1.6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	16
1.6.4. MATRIZ DE CONSISTENCIA	17
2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	18
2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA	18
2.1.1. Antecedente Nacionales	18
2.1.2. Antecedentes internacionales	19
2.2. BASES TEÓRICAS	20
2.2.1. APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON RPAS.	20
2.2.2. GENERACIÓN DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS A ESCALA GRANDE.	23
2.3. MARCO CONCEPTUAL	24
2.3.1. CÁMARAS AEROFOTOGRAFICAS	24
2.3.2. PLATAFORMA AÉREA NO TRIPULADA	25
2.3.3. FRAME DE UN RPAS	25
2.3.4. ACELERÓMETRO	26
2.3.5. BRÚJULA	27

2.3.6.	GPS/GNSS	27
2.3.7.	BARÓMETRO	27
2.3.8.	FLUJO ÓPTICO	28
2.3.9.	CÁMARA DIGITAL	28
2.3.10.	SENSEFLY EBEE.	29
2.3.11.	TRIMBLE UX5.	30
2.3.12.	MAVINCI SIRIUS	31
2.3.13.	DJI PHANTOM 4.	32
2.3.14.	MICRODRONES MD4 – 1000.	33
2.3.15.	GEONMAP V6	34
2.3.16.	WINGTRAONE PPK.	35
2.3.17.	SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE	36
2.3.18.	CONSTELACIONES SATELITALES	38
2.3.19.	TÉCNICAS Y MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO SATELITAL	38
2.3.20	POSICIONAMIENTO GNSS ABSOLUTO	39
2.3.21	POSICIONAMIENTO GNSS RELATIVO	40
2.3.22	POST PROCESO CINEMÁTICO.	41
2.3.23	TIEMPO REAL CINEMÁTICO (RTK).	42
2.3.24	RED GEODÉSICA GEOCÉNTRICA NACIONAL	42
2.3.25	PÍXEL	43
2.3.26	IMAGEN DIGITAL	43
2.3.27	GROUND SAMPLING DISTANCE (GSD)	43
2.3.28	TRASLAPE TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL	47
2.3.29	SENSOR VISUAL	47
2.3.30	SENSOR CCD	48
2.3.31	SENSOR CMOS	49
2.3.32	PLANIFICACIÓN DE VUELO	49
2.3.33	CONTROL TERRESTRE APOYADO EN GNSS	51
2.3.34	PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO	53
3	CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO	54
3.1	TIPO DE INVESTIGACIÓN	54
3.2	NIVEL DE INVESTIGACIÓN	54
3.3	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	55
3.4	ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN	55
3.5	PLANEAMIENTO Y SOPORTE TÉCNICO.	55

3.6	PRIMERA EVALUACIÓN: DETERMINAR LA MEJOR DISTRIBUCIÓN DE PAF EN FUNCIÓN A LA FORMA DEL ÁREA DE ESTUDIO.	56
3.6.1	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.	56
3.6.2	CONTROL GEODÉSICO.	57
3.6.3	ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PAF	59
3.6.3.1	PAF BORDES EXTERNOS	59
3.6.3.2	PAF PERIMETRAL	62
3.6.3.3	PAF Bordes – Punto céntrico.	65
3.6.3.4	PAF Perimetral – Punto céntrico.	68
3.6.4	ANÁLISIS INTEGRAL	70
3.7	SEGUNDA EVALUACIÓN: DETERMINAR LA POSIBLE CANTIDAD DE PUNTOS DE APOYO FOTOGRAMÉTRICO RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO.	73
3.7.1	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	73
3.7.2	CONTROL GEODÉSICO.	74
3.7.3	ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE PAF	76
3.7.3.1	DISTRIBUCIÓN 5 PAF.	76
3.7.3.2	DISTRIBUCIÓN 6 PAF.	80
3.7.3.3	DISTRIBUCIÓN 7 PAF.	85
3.7.3.4	DISTRIBUCIÓN 8 PAF.	90
3.7.4	ANÁLISIS INTEGRAL	94
3.8	TERCERA EVALUACIÓN: EVALUACIÓN DE SISTEMA PPK CON EL MODELO VALIDADO.	97
3.8.1	CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO	97
3.8.2	CONTROL GEODÉSICO.	97
3.8.3	ANÁLISIS DE SISTEMA PPK CON SOFTWARE COMERCIAL.	98
3.8.4	ANÁLISIS DEL SISTEMA PPK CON FLUJOGRAMA DE CÓDIGO ABIERTO	101
3.8.4.1	USO DEL SOFTWARE LIBRE RTKLIB	101
3.8.4.2	INTERPOLACIÓN DE EVENTOS	102
3.9	EVALUACIÓN INTEGRAL	106
3.9.1	CONSIDERACIONES Y RESULTADOS FINALES	109
4	CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	111
5	CAPÍTULO V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N°1. Ejemplos de frame	26
Figura N°2. Ejemplos de acelerómetro.	26
Figura N°3. Ejemplo de un GPS/GNSS para RPA.	27
Figura N°4. Ejemplo de un barómetro	27
Figura N°5. Ejemplo de un sensor de flujo óptico.	28
Figura N°6. Cámara digital Canon G7X.	29
Figura N°7. Rpa Sensefly Ebee AG.	30
Figura N°8. Trimble UX5.	30
Figura N°9. Mavinci Sirius.	32
Figura N°10. Dji Phantom 4.	33
Figura N°11. Microdrones md4-1000.	34
Figura N°12. GeonMap V6.	35
Figura N°13. Funcionalidad VTOL.	35
Figura N°14. Comparativo de levantamiento con RPAS.	36
Figura N°15. Esquema de funcionamiento de sistema RPAS – PPK.	36
Figura N°16. Mercado GNSS.	37
Figura N°17. Constelaciones GNSS.	38
Figura N°18. Métodos de posicionamiento u observación GNSS.	39
Figura N°19. Posicionamiento absoluto GNSS.	39
Figura N°20. Aplicación del posicionamiento Absoluto. GPS Garmin.	40
Figura N°21. Posicionamiento relativo GNSS.	40
Figura N°22. Descripción de toma cinemática.	41
Figura N°23. Aplicación del método cinemático para trayectorias.	41
Figura N°24. Trabajos realizados con el método RTK con sistema de radio UHF.	42
Figura N°25. Ejemplo de estructuración de una imagen digital.	43
Figura N°26. Parámetros de cálculo para el GSD.	44
Figura N°27. Ejemplo de ortofotos con distintos valores de GSD.	46
Figura N°28. Ejemplo de traslape longitudinal y transversal.	47
Figura N°29. Captura de imagen con sensor CCD.	48
Figura N°30. Captura de imagen con sensor CMOS.	49
Figura N°31. Aplicación de vuelo PrecisionFlight for DJI.	50
Figura N°32. Parámetros disponibles en Mappilot.	51
Figura N°33. Toma de medidas de puntos de apoyo fotogramétrico con receptor GNSS.	52
Figura N°34. Algunos tipos de marcas de fotocontrol.	53

Figura N°35. Distribución apropiada para los PAF.	53
Figura N°36. Desfase planimétrico; ortofoto – punto en Civil 3D.	56
Figura N°37. Desfase altimétrico; MDT – punto de verificación.	56
Figura N°38. Punto base para la distribución de los PAF.	58
Figura N°39. Distribución de PAF – PAF bordes externos.	59
Figura N°40. Distribución de PAF – PAF perimetral.	62
Figura N°41. Distribución de PAF, PAF bordes – punto céntrico.	65
Figura N°42. Distribución de PAF, PAF perimetral – punto céntrico.	68
Figura N°43. Punto de control PC 01 – Alto Bujama	75
Figura N°44. Distribución de PAF, 5 PAF – 60 ha.	76
Figura N°45. Distribución de PAF, 6 PAF – 60 ha.	81
Figura N°46. Distribución de PAF, 7 PAF – 60 ha.	85
Figura N°47. Distribución de PAF, 8 PAF – 60 ha.	90
Figura N°48. Resumen de procesamiento cinemático en EZSURV, vuelo 01/04.	98
Figura N°49. Precisiones para la trayectoria del RPAS PPK.	98
Figura N°50. Desfase planimétrico ortofoto validada con ortofoto PPK.	99
Figura N°51. Resumen de procesamiento de datos del receptor GNSS, vuelo 01/04.	102
Figura N°52. Desfase planimétrico ortofoto validada con ortofoto PPK.	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N°01. Operacionalización de las variables	16
Tabla N°02. Matriz de consistencia	17
Tabla N°03. Especificaciones técnicas – Ebee.	29
Tabla N°04. Especificaciones técnicas – UX5.	30
Tabla N°05. Ponderación de GSD en función a la altura de vuelo de Mavinci.	31
Tabla N°06. Especificaciones técnicas – Mavinci.	31
Tabla N°07. Especificaciones técnicas – Phantom4.	32
Tabla N°08. Especificaciones técnicas – Md 4-1000.	33
Tabla N°09. Especificaciones técnicas – GeonMap V6.	34
Tabla N°10. Parámetros de algunos sensores de RPAS.	45
Tabla N°11. Desfase planimétrico – PAF bordes externos (6).	60
Tabla N°12. Desfase altimétrico – PAF bordes externos (6).	61
Tabla N°13. Desfase planimétrico – PAF perimetral (11).	63
Tabla N°14. Desfase altimétrico – PAF perimetral (11).	64
Tabla N°15. Desfase planimétrico, PAF bordes -punto céntrico (7).	66
Tabla N°16. Desfase altimétrico, PAF bordes -punto céntrico (7).	67
Tabla N°17. Desfase planimétrico, PAF perimetral-punto céntrico (12).	69
Tabla N°18. Desfase altimétrico, PAF perimetral -punto céntrico (12).	70
Tabla N°19. Desfase planimétrico, 5 PAF.	77
Tabla N°20. Desfase altimétrico, 5 PAF.	79
Tabla N°21. Desfase planimétrico, 6 PAF.	81
Tabla N°22. Desfase altimétrico, 6 PAF.	84
Tabla N°23. Desfase planimétrico, 7 PAF.	86
Tabla N°24. Desfase altimétrico, 7 PAF.	88
Tabla N°25. Desfase planimétrico, 8 PAF.	91
Tabla N°26. Desfase altimétrico, 8 PAF.	93
Tabla N°27. Desfase planimétrico de modelo PPK.	99
Tabla N°29. Interpolación de eventos	102
Tabla N°30. Desfase planimétrico de modelo PPK.	104
Tabla N°31. Desfase altimétrico de vuelo PPK.	105
Tabla N°32. Desfase altimétrico de vuelo PPK.	109
Tabla N°33. Relación de escalas topográficas con distribución de PAF.	110
Tabla N°34. Relación de dimensiones del terreno con la cantidad óptima de PAF.	110

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico N°01. Desfase promedio (x, y) vs distribución de PAF.	71
Gráfico N°02. Desviación estándar (x, y) vs distribución de PAF.	71
Gráfico N° 03. Desfase promedio (z) vs distribución de PAF.	72
Gráfico N°04. Desviación estándar (z) vs distribución de PAF.	72
Gráfico N°05. Desfase promedio (x, y) vs cantidad de puntos.	94
Gráfico N°06. Desviación Estándar (x, y) vs cantidad de puntos.	95
Gráfico N°07. Desfase promedio (z) vs cantidad de puntos.	95
Gráfico N°08. Desviación Estándar (z) vs cantidad de puntos.	96

RESUMEN

La fotogrametría con aeronaves no tripuladas es la técnica que permite obtener productos topográficos y cartográficos a partir de imágenes de alta resolución, logrando precisiones en el rango centimétrico. Para lograr esta precisión es necesario seguir un flujograma de procesos bien establecido, a la fecha existe un manual (MT N°3-01) que establece los lineamientos técnicos para el proceso de generación de ortoimágenes a partir de imágenes digitales, además de la evaluación de calidad del Modelo Digital de Elevación y ortoimágenes.

Esta técnica con aeronaves no tripuladas ya se viene implementado desde hace mucho tiempo en nuestro país, en la mayoría de casos con buenos resultados y en algunos se presenta cierta incertidumbre por precisiones fuera del margen de tolerancia del Proyecto. Esta técnica se ha difundido mucho sobre todo por los precios accesibles de Aeronaves comerciales, lo que ha llevado a muchos profesionales de otros rubros a recurrir a esta tecnología. Pero es preciso mencionar que el profesional que utilizará esta técnica debe conocer el marco conceptual de las técnicas de fotogrametría con aeronaves tripuladas y ahora no tripuladas.

Es preciso también establecer un marco de referencia que nos permita definir si en un determinado proyecto es posible aplicar esta técnica, y de ser así definir los criterios técnicos para lograr óptimos resultados que satisfagan el caso de uso topográfico y cartográfico, siendo necesario manejar las últimas tendencias en cuanto a estas técnicas como es el procesamiento PPK y la interpolación de eventos, lo que permitiría optimizar el flujograma de trabajo a la hora de obtener productos topográficos y cartográficos.

ABSTRACT

Photogrammetry with unmanned aircraft is the technique that allows obtaining topographic and cartographic products from high-resolution images, achieving precision in the centimeter range. To achieve this precision, it is necessary to follow a well-established process flowchart. To date, there is a manual (MT N°3-01) that establishes the technical guidelines for the orthoimage generation process from digital images, in addition to the evaluation of quality of the Digital Elevation Model and orthoimages.

This technique with unmanned aircraft has been implemented for a long time in our country, in most cases with good results and some have some uncertainty due to details outside the tolerance margin of the Project. This technique has become very popular, especially due to the affordable prices of commercial aircraft, which has led many professionals from other fields to resort to this technology. But it is necessary to mention that the professional who will use this technique must know the conceptual framework of photogrammetry techniques with manned and now unmanned aircraft.

It is also necessary to establish a frame of reference that allows us to define whether in a certain project it is possible to apply this technique, and if so, define the technical criteria to achieve optimal results that satisfy the topographic and cartographic use case. trends regarding these techniques such as PPK Processing and event interpolation, which would allow optimizing the workflow when obtaining topographic and cartographic products.

1. CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

Como bien sabemos, el empleo de información geoespacial se ha incrementado a grandes pasos en los últimos años; y hoy en día la aplicación fotogramétrica con RPAS ha optimizado drásticamente los tiempos de entrega del producto topográfico y cartográfico. Debido a las incertidumbres por la precisión de esta técnica que se presentaban en ciertos sectores y mercados ligados al ámbito de la geomática surgió la necesidad de buscar metodologías correctas que nos permitan obtener resultados con buenas precisiones, por ello además que se cuenta con una normativa reguladora de RPAS en el Perú (NTC 001-2015) también existe una Resolución Jefatural N° 053-2021/IGN/DIG/SDNGC que aprueba las Especificaciones Técnicas para la generación de ortoimágenes (MT N°03-01); en donde se establecen los lineamientos técnicos para este proceso a partir de fotografías digitales. Este manual técnico tiene como finalidad estandarizar una metodología en donde se establezcan los procesos y procedimientos a seguir para la generación de ortoimágenes; ya que, si bien las técnicas de fotogrametría con RPAS ofrecen grandes ventajas, esta como cualquier otro procedimiento requiere estrictamente de cumplimientos de varias etapas para obtener buenos resultados.

En la actualidad, se usan distintas técnicas fotogramétricas, siendo la de última tendencia el procesamiento cinemático en post proceso PPK, en donde se trabaja con una estación base en tierra, ubicado en un punto cuyas coordenadas son conocidas en el momento o posterior al vuelo, La Base registra datos GNSS en el mismo instante que se ejecuta el vuelo con el RPAS, realizándose una interpolación de eventos y geoetiquetado de fotografías, de tal manera que el uso de Puntos de Apoyo fotogramétrico ya no son necesarios, el post proceso, creación de un modelo digital de elevación y ortomosaico se realizan sin la necesidad que estos PAF ingresen a realizar un ajuste, de tal manera que para evaluar la precisión de nuestro modelo se realiza una verificación con puntos de chequeo tomados en campo. Gracias a esta técnica optimizamos tiempo y costo en un proyecto, además de obtener productos cartográficos con precisiones muy buenas a nivel centimétrico.

Esta tesis busca analizar los resultados de esta técnica (Fotogrametría con RPAS) frente a tomas directas de campo, como son los Receptores GNSS. Con estos resultados se busca dar la viabilidad o no de la utilización de técnicas actuales de fotogrametría con RPAS en productos topográficos y cartográficos a escala 1:1000 según el Instituto Geográfico Nacional.

1.1. SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

Hoy en día experimentamos los constantes avances tecnológicos – científicos de nuestro mundo, una instancia donde el hombre aprovecha al máximo sus conocimientos, con el mero fin de optimizar las actividades en todo ámbito profesional. En el mundo de la cartografía el desempeño es el mismo, y en la actualidad los distintos productos que nos ofrece se realizan con técnicas automatizadas desde la etapa de planeamiento en gabinete con el uso de distintos softwares de fotogrametría digital, apoyo de imágenes de satélite, hasta la etapa de campo mediante la captura del dato con receptores geodésicos de alta precisión, equipos de medición electrónica, tecnología UAV (RPA) y para concluir, nuevamente en un proceso de edición en gabinete.

Para iniciar cualquier proyecto de infraestructura civil es necesario tener como insumo una topografía – cartografía inicial. En todo aspecto es mucho mejor una topografía digital frente a una física. Y en la actualidad hay distintos métodos para obtener ese producto cartográfico; desde los más rápidos y sencillos hasta los que incluyen mayor tiempo y tecnología. A la hora de elegir dicho método para la topografía inicial, el punto más importante es el grado de precisión al que se desea llegar y con ello estimar los presupuestos.

Muchas entidades tanto privadas como públicas no tienen los suficientes fondos para asumir una inversión para un buen producto cartográfico y por ello recurren a técnicas rápidas que solo incluyen fase de gabinete; como la generación de curvas de nivel a partir de imágenes extraídas de google earth, extraer nube de puntos de imágenes satelitales con baja resolución, cuando estos métodos no son fiables para obtener cartografía a escalas grandes (1:5000, 1:1000).

En la actualidad la aplicación de fotogrametría con RPAS se ha ido consolidando como una buena técnica para obtención de modelos digitales de superficie y posteriormente con un post proceso el modelo digital de terreno, las metodologías modernas como PPK han permitido mapear zonas amplias y lugares con terrenos de difícil acceso, con la suficiente precisión para la representación cartográfica en escalas grandes. El flujo de trabajo que determina la técnica de fotogrametría con RPAS empieza desde la etapa de planeamiento en gabinete, luego la etapa de campo con el vuelo fotogramétrico y el control terrestre apoyado con receptores geodésicos de precisión, concluyendo con el procesamiento fotogramétrico digital con apoyo de Hardware y softwares especializados; es importante recalcar que el uso del control terrestre va a depender de la metodología utilizada. Hasta la fecha esta técnica de fotogrametría con RPAS utilizando

aeronaves con un sistema PPK se viene propagando cada vez más en nuestro país con resultados alentadores. Es de esperarse que el producto cartográfico como resultado de esta técnica sea similar en temas de precisión a los obtenidos con técnicas ya consolidadas en el ámbito topográfico como la Medición Electrónica de Distancias utilizando estaciones totales o el levantamiento topográfico con Receptores GNSS en modo RTK. Estas últimas técnicas mencionadas ya tienen muchos años en el ámbito de la Geomática y se consolidan como las de mayor precisión para la captura del dato y elaboración de modelos digitales de terreno.

1.2. FORMULACIÓN DE LA PREGUNTA

1.2.1. PREGUNTA GENERAL

¿Las precisiones de los productos cartográficos en altimetría y planimetría obtenidas por aplicaciones de fotogrametría con RPAS y RPAS-PPK se encuentran en el mismo rango de precisión que los productos cartográficos obtenidos por técnicas de levantamiento GNSS RTK?

1.2.2. PREGUNTAS ESPECÍFICAS

¿Cuáles son las discrepancias de las precisiones de campo en altimetría aplicando fotogrametría con RPAS frente a topografía con Tecnología GNSS – RTK?

¿Cuáles son las discrepancias de las precisiones de campo en planimetría aplicando fotogrametría con RPAS frente a topografía con Tecnología GNSS – RTK?

¿Cuáles son las discrepancias de las precisiones de campo en altimetría y planimetría utilizando RPAS con sistema PPK frente a topografía con Tecnología GNSS-RTK?

1.3. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. JUSTIFICACIÓN TEÓRICA

La investigación es relevante porque pretende validar el uso de productos cartográficos elaborados con técnicas modernas de Fotogrametría con RPAS – PPK.

1.3.2. JUSTIFICACIÓN PRÁCTICA

La investigación es relevante porque busca analizar las diferencias reales de campo que nos ofrece la fotogrametría con RPA frente a una técnica ya consolidada que es el levantamiento topográfico con Receptores GNSS en modo RTK. Este análisis comparativo brindará a los usuarios de esta técnica, un enfoque real de la precisión que ofrecen las técnicas modernas de fotogrametría con RPAS.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar un análisis comparativo de productos cartográficos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y RPAS-PPK con topografía GNSS – RTK.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Conocer las discrepancias de campo en altimetría de los modelos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con tecnología GNSS - RTK.
- ✓ Conocer las discrepancias de campo en planimetría de los modelos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con tecnología GNSS - RTK.
- ✓ Conocer las discrepancias de campo en planimetría y altimetría de los modelos obtenidos mediante Fotogrametría con RPAS – PPK y Topografía con tecnología GNSS - RTK..

1.5. HIPÓTESIS

1.5.1. HIPÓTESIS GENERAL

La comparación de las precisiones obtenidas con fotogrametría con RPAS y RPAS-PPK frente a las precisiones obtenidas con metodologías con GNSS RTK corroborados con puntos de validación se encuentran dentro del rango que indica la norma técnica de cartografía 1:1000 del IGN.

1.5.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICAS

- ✓ Mediante el uso de fotogrametría con RPAS se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en altimetría, semejantes a las precisiones obtenidas en altimetría con metodologías GNSS RTK.
- ✓ Mediante el uso de fotogrametría con RPAS se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en planimetría, semejantes a las precisiones obtenidas en planimetría con metodologías GNSS RTK.
- ✓ Con el uso de un RPAS – PPK y sin puntos de apoyo fotogramétricos se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en altimetría y planimetría, semejantes a las precisiones obtenidas con metodologías GNSS RTK.

1.6. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

1.6.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Aplicación de Fotogrametría con RPAS.

1.6.2. VARIABLE DEPENDIENTE

Generación de productos cartográficos a escala grande.

1.6.3. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla N°01. Operacionalización de las variables

VARIABLE (Independiente)	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
Aplicación de Fotogrametría con RPAS.	Es la aplicación que permite reconstruir Modelos 3D a partir de aerofotogramas capturados con vehículos aéreos no tripulados.	Reconstruir Modelos 3D	Precisión GSD
			Traslape
			Calidad de Imágenes.
		Calidad del posicionamiento de los aerofotogramas.	Precisión de vuelos sin PPK-RTK
			Precisión de vuelos con PPK-RTK
VARIABLE (Dependiente)	DEFINICION CONCEPTUAL	DIMENSIONES	INDICADORES
	Es la exportación de distintos insumos geoespaciales que	Escala	Graficismo

Generación de productos cartográficos a escala grande.	modelan la superficie terrestre a una escala mínima de 1:1000, sirviendo como base para el diseño y evaluación topográfica de distintos proyectos de ingeniería, dentro de un marco geodésico de referencia.		Precisión de Fotocontrol
			GSD
		Planimetría.	Precisión horizontal de Ortofoto
		Altimetría	Precisión vertical del DEM
			Valor mínimo de intervalo de curva.

Fuente: Elaboración Propia

1.6.4. MATRIZ DE CONSISTENCIA

Tabla N°02. Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO GENERAL	HIPOTESIS	VARIABLE INDEPENDIENTE
¿Es posible obtener productos cartográficos de alta precisión en planimetría y altimetría aplicando fotogrametría con RPAS y RPAS - PPK?	Realizar un análisis comparativo de productos cartográficos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y RPAS-PPK con topografía GNSS – RTK.	La aplicación fotogramétrica con RPAS y RPAS - PPK ofrecen óptimos resultados para el uso en cartografía a escala grande.	Aplicación de Fotogrametría con RPAS. Dimensiones: - Reconstruir dimensiones 3D - Calidad del posicionamiento de los aerofotogramas
PROBLEMAS ESPECIFICOS	OBJETIVOS ESPECIFICOS	HIPOTESIS ESPECIFICA	VARIABLE DEPENDIENTE
¿Cuáles son las precisiones de campo en altimetría aplicando fotogrametría con RPAS frente a topografía con Tecnología GNSS – RTK?	Conocer las discrepancias de campo en altimetría de los modelos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con tecnología GNSS - RTK.	Mediante el uso de fotogrametría con RPAS se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en altimetría.	Generación de productos cartográficos a escala grande. Dimensiones: - Escala - Planimetría - Altimetría
¿Cuáles son las precisiones de campo en planimetría aplicando fotogrametría con RPAS frente a topografía con Tecnología GNSS – RTK?	Conocer las discrepancias de campo en planimetría de los modelos obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con tecnología GNSS - RTK.	Mediante el uso de fotogrametría con RPAS se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en planimetría.	
¿Cuáles son las precisiones de campo en altimetría y planimetría utilizando RPAS con sistema PPK?	Conocer las discrepancias de campo en planimetría y altimetría de los modelos obtenidos mediante Fotogrametría con RPAS – PPK.	Con el uso de un RPAS – PPK y sin puntos de apoyo fotogramétricos se obtienen productos cartográficos a escala grande con óptimas precisiones en altimetría y planimetría.	

Fuente: Elaboración Propia

2. CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL PROBLEMA

2.1.1. Antecedente Nacionales

Quispe (2016) en su tesis titulada “Propuesta metodológica para la generación de ortofotomapas desde imágenes aéreas obtenidas con microdron – multirotor, Área de estudio: playas distrito de barranco, Lima-Perú 2016”, concluye y recomienda lo siguiente:

- ✓ En la presente propuesta metodológica se emplea el sistema “microdron-multirotor potenciado”, siendo esta una alternativa para la generación de ortofotomapas, con un error de trazo planimétrico del 76% y categorización del tercer y cuarto orden; el cual es recomendable a escalas que se encuentran entre 1:5000-1:1000; siendo muy útil en casos de evaluación y estudios planimétricos, por ejemplo, actualización cartográfica, geolocalización, estudios hidrográficos, mapas de ruta, estudios geográficos, medio ambiente, planeación territorial, estado de cobertura vegetal, visualización de paisaje, recreación, entre otras aplicaciones.
- ✓ En cuanto a la información planimétrica, el ortofotomapa final (constatado con un levantamiento de mayor orden), presenta una fiabilidad de trazo a una escala de 1:1000 del 76% de restitución (digitalización); no obstante, a una escala 1:1500, presenta una fiabilidad del 90%, según lo requerido por el IGN.
- ✓ En la metodología propuesta no es oportuno el uso del sistema microdron-multirotor para conseguir información altimétrica precisa y de calidad.
- ✓ Implementar un sensor que pueda registrar los giros de ejes de la cámara del dron (pitch, roll y yaw), a fin de que la reconstrucción del modelo digital sea posicionada de manera correcta en base a la toma aérea y sea constatado con datos experimentales.

El Mayor Brondi Rueda (2018) en su publicación “Empleo de Aeronaves tripuladas remotamente (RPA) para proyectos piloto de generación de cartografía de la revista científica N°17/agosto 2018; El Geógrafo - Instituto Geográfico Nacional del Perú” concluye lo siguiente:

- ✓ Las imágenes obtenidas con RPAS, en general proporcionan información de posición relativa en donde la precisión está directamente relacionada con el navegador GPS con que cuenta.

- ✓ Para llevar a cabo la restitución fotogramétrica es necesario adicionar puntos de apoyo (PAFHV) con la finalidad de ajustar la precisión.
- ✓ Respecto a la comparación de precisión entre el navegador GPS del RPA empleado en el ejercicio de vuelo, versus los PAFHV utilizados en campo, se pudo identificar como valores máximos: DX(ESTE) – 1.35 mt / DY (NORTE) 0.85 mt; por lo tanto, se demuestra que para ejercicios de esta naturaleza es necesario contar con PAFHV para el ajuste correspondiente.
- ✓ Con este ejercicio se pudo demostrar que el empleo de Aeronaves Tripuladas Remotamente (RPA) con fines cartográficos, constituye una herramienta sumamente importante y eficaz, la cual se encuentra en una evolución continua de mejora y precisión. El instituto Geográfico Nacional apuesta por la ciencia y tecnología con la intención de generar la normativa oficial del país para la generación de productos cartográficos obtenidos a través de RPAS.

2.1.2. Antecedentes internacionales

Villareal (2015) en su tesis titulada Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control, menciona que:

La precisión de los levantamientos topográficos usando UAV (hoy denominados RPAS) varía de acuerdo a la densidad y ubicación de los puntos de control, teniendo en cuenta la visibilidad de los mismos en el terreno de estudio y concluye que la cantidad óptima de puntos de apoyo fotogramétrico para ajuste del modelo es de 4 puntos por hectárea de terreno y como morfología adecuada establece la de tipo cruz con punto céntrico. En su investigación; Villareal usa como indicador de la precisión al error de reproyección del pixel generado por el Software fotogramétrico.

En la tesis titulada “Aplicación de Fotogrametría aérea en Levantamientos Topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados” presentado por Claros et al. (2016), concluyen que:

- ✓ Para producir productos cartográficos con esta tecnología, se parte de una buena planificación del proyecto de vuelo fotogramétrico, teniendo en cuenta el contenido visual y la orografía del terreno, como los cuerpos de agua, vegetación densa, campos

de agricultura, entre otros; corriendo así la precisión y exactitud del modelo y los errores que se puedan producir, propios de la tecnología y uso del software de fotogrametría.

- ✓ Con la correcta elección del número de puntos de apoyo fotogramétrico (Ground Control Points) y la ubicación de estas en el proyecto, podemos obtener un modelo digital del terreno (MDT) con mayor precisión y mejores resultados en la georreferenciación, permitiendo así poder escalarlo y trasladarlo a su posición correcta en el espacio de tal manera que se reduce el error de la geolocalización de las fotografías.
- ✓ En la metodología del proyecto se requiere de puntos de apoyo fotogramétrico y control terrestre para tener resultados óptimos y de calidad, el uso de equipos topográficos y geodésicos para la etapa de apoyo terrestre, tales como la estación total, receptor GNSS, teodolito y otros equipos utilizados habitualmente en el país son un complemento importante del flujo de trabajo; por lo que la presente metodología no es una solución definitiva a la necesidad de información topográfica ni descarta el uso de las técnicas topográficas clásicas, sino que se apoya en ellas para contrapesar sus propias deficiencias.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. APLICACIÓN DE FOTOGRAMETRÍA CON RPAS.

La fotogrametría es una disciplina que data desde 1839, y durante el transcurso del tiempo se ha convertido en una técnica clave de estudio en diferentes campos de la ingeniería; un año después, en 1839, se realizó la primera intención de utilizar la fotogrametría para la elaboración de un mapa topográfico. Actualmente es el principal método empleado en la cartografía topográfica y en la relación de otras formas de datos espaciales; tal como el servicio geológico de Estados Unidos (USGS) utiliza el procedimiento casi exclusivamente para la recopilación de sus mapas. Constantemente se perfeccionan las cámaras, películas y otros instrumentos y técnicas fotogramétricos, de modo que los datos espaciales recolectados por la fotogrametría actualmente satisfacen normas que exigen una precisión muy alta. Otras ventajas de este método son: (1) la velocidad de recolección de datos espaciales en una región, (2) costos relativamente bajo, (3) facilidad para lograr detalles topográficos, sobre todo en zonas inaccesibles y (4) menor probabilidad de omitir detalles en la recolección de datos espaciales.

En la actualidad, la fotogrametría comprende muchas aplicaciones en topografía e ingeniería, tales como los levantamientos para el cálculo de vértices de secciones, la determinación de vértices de linderos o puntos que ayuden a fijar esos vértices. Los mapas a gran escala se confeccionan utilizando procedimientos fotogramétricos con fines múltiples, por ejemplo, el diseño de subdivisiones. Además, la fotogrametría es importante ya que nos ayuda en la determinación de riberas o líneas de costa de los levantamientos hidrográficos, la determinación de coordenadas muy precisas de puntos de control en tierra en los levantamientos, para la elaboración de mapas y establecer secciones transversales en los levantamientos de caminos de ingeniería.

La fotogrametría se aplica también con éxito en muchos campos ajenos a la ingeniería, por ejemplo, geología, dasonomía, agricultura, conservación ecológica, planificación, arqueología, inteligencia militar, administración de tráfico e investigación de accidentes.

La fotogrametría se divide en dos tipos: métrica e interpretativa. La fotogrametría métrica se encarga de la obtención de información espacial, tales como las distancias, elevaciones, áreas, volúmenes, secciones transversales y otros datos para elaborar mapas topográficos en base a las mediciones hechas en fotografías; siendo ésta de especial interés para los ingenieros en geomática y topógrafos. Para esto, generalmente se utiliza la fotografía aérea, llevada a cabo por vehículos aeronáuticos, pero en algunos casos particulares, se aplica la fotogrametría terrestre, llevada a cabo por cámaras emplazadas en tierra. Por otro lado, está la fotogrametría interpretativa, cuya finalidad es la identificación de objetos a partir de sus imágenes fotográficas y apreciación de su significado. Los factores críticos a considerar en el reconocimiento de objetos son la forma, tamaño, configuración, sombra, textura y tono de su imagen. Esta área de la fotogrametría se llamó interpretación fotográfica, debido a que en un principio se basó en las fotografías aéreas. Para ayudar en la interpretación, recientemente se han creado otros aparatos, sensores y de imágenes tales como los analizadores multispectrales, los analizadores térmicos, los radiómetros y el radar aerotransportado de visión lateral. Estos instrumentos detectan energía en longitudes de onda más allá que las del ojo humano puede percibir o la película fotográfica ordinaria puede registrar. Generalmente se transportan en aeronaves tan remotas como los satélites; por ellos el término de percepción remota generalmente se aplica ahora al aspecto interpretativo de la fotogrametría.

La fotogrametría métrica se ejerce de diferentes maneras dependientes de las necesidades de proyecto y del tipo de equipo disponible. Pueden hacerse cálculos y análisis sencillos haciendo

mediciones en impresiones en papel de aerofotos usando un escalímetro, y suponiendo que las fotos son “realmente verticales” es decir, el eje de la cámara coincide con una línea aplomada en el momento de la fotografía. Estos métodos producen resultado de orden inferior, pero zona adecuados para diferentes aplicaciones. Otras técnicas más avanzadas, incluyendo métodos analógicos, analíticos y de copia de presentación transitoria, no suponen fotos verticales y proporcionan determinaciones más exactas de la ubicación espacial de los objetos. El procedimiento analógico se funda en dispositivos mecánicos y ópticos de precisión para crear modelos de terreno que puedan medirse y cartografiarse. El método analítico de basa en mediciones precisas de las posiciones fotográficas de las imágenes de los objetos de interés, seguidas de una solución matemática para su ubicación. Los instrumentos de copia de presentación transitoria utilizan imágenes digitales en procedimientos computarizados que son altamente automatizados. Cada uno de estos tipos de procedimientos de análisis métrico se describe en las siguientes secciones.

La fotogrametría ha ido fortaleciéndose aún más con el avance de la tecnología, mejorando desde la fotogrametría analógica, analítica hasta la digital, siendo los RPAS parte de esta última. En la actualidad, gracias a los RPAS podemos recopilar información y procesar datos geoespaciales de manera más rápida a comparación de levantamientos topográficos tradicionales; trayendo como consecuencia la disminución de costos. Además, con los RPAS se pueden realizar vuelos a alturas más bajas obteniendo así datos con una alta resolución espacial. Otra de las ventajas del uso de RPAS es que con ellos podemos tener acceso a zonas difíciles de alcanzar, ya sea por la topografía del terreno; siendo un trabajo más seguro y reduciendo algún tipo de peligro. Los RPAS se clasifican por ala fija y ala rotatoria y son buena técnica con suficiente calidad y precisión para la representación cartográfica en escalas grandes.

Los RPA de ala fija son sistemas que por lo general recubren mayor terreno ya que tienen mayor autonomía de vuelo y por su misma aerodinámica ahorran batería y se desplazan con mayor velocidad. Esta clase de RPA es recomendable utilizar cuando las extensiones a cartografiar superan las 300 Hectáreas y es preciso tener los entregables cartográficos en un periodo de tiempo corto. Una desventaja de estos RPA es que necesitan de una pista considerablemente larga para aterrizar, y en muchos casos estas condiciones no se encuentran. Entre ellos tenemos: Sensefly Ebee, Trimble UX5, Mavinci Sirius.

Los RPAS de ala multirrotor son sistemas que por lo general recubren menores dimensiones ya que tienen menor autonomía de vuelo y por su misma aerodinámica necesitan mayor potencia y consumo de batería para controlar sus hélices. Esta clase de RPA es recomendable utilizar cuando las extensiones a cartografiar son menores a las 300 Hectáreas. Una gran ventaja de estos RPA frente a los de ala fija es que no necesitan de una pista de aterrizaje, y son muy estables frente a considerables ráfagas de viento por lo que el mapeo se puede realizar en terrenos agrestes. Entre ellos tenemos: DJI Phantom 4, Microdrones Md4 – 1000, GeonMap V6, WingtraOne PPK.

2.2.2. GENERACIÓN DE PRODUCTOS CARTOGRÁFICOS A ESCALA GRANDE.

La cartografía es una disciplina que, desde la antigüedad, juega un rol fundamental en la generación de productos cartográficos, desde la generación de mapas en papel hasta la cartografía digital, siendo estos importantes para estudios y proyectos de diversas temáticas. Los productos cartográficos se obtienen del proceso de un conjunto de datos espaciales cuya finalidad es la representación gráfica de la realidad; y gracias a estos podemos generar importantes recursos e información para el desarrollo del hombre.

Existen diversos métodos para la generación de productos cartográficos, este dependerá del grado de precisión y escala que se requiera; donde la escala correcta representará los elementos de manera clara; en un proyecto a escala grande se requiere información topográfica a detalle para poder tener confiabilidad en sus resultados. Uno de los métodos de gran impacto para la elaboración de cartografía es la fotogrametría digital con RPAS, donde se trabaja con fotografías para obtener información de la geometría de los objetos, como información bidimensional y tridimensional. Como bien se mencionó con anterioridad esta tecnología se viene implementando en nuestro País desde aproximadamente el 2013, y en este último año su expresión ha sido mayor. Las metodologías han tenido poco a poco que implementarse, desde lo empírico a la consideración de aspectos técnicos, y en este caso se hace un mayor énfasis a los fundamentos de la fotogrametría digital aérea.

Con los RPAS se pueden obtener imágenes de alta resolución espacial ya que estos vuelan a alturas bajas, convirtiéndose en los últimos años una herramienta útil para la obtención de información a detalle; por ejemplo, las ortofotos, curvas de nivel o modelos tridimensionales como modelos digitales de elevación (MDE), modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT); donde todos los datos geoespaciales que se generan serán la base para la elaboración de la cartografía requerida. El modelo digital del terreno (MDE), uno de

los elementos primordiales de la representación digital de la superficie terrestre que representa las características diversas del terreno; dentro de este se tiene al modelo digital de superficie (MDS) que nos representa las alturas con respecto al nivel medio del mar; teniendo en cuenta elementos como las infraestructuras, vegetación, edificaciones, entre otros; y el modelo digital del terreno (MDT) que representa la forma de la superficie terrestre sin considerar elementos ajenos a esta mencionados anteriormente (edificaciones, vegetación, etc).

2.3. MARCO CONCEPTUAL

2.3.1. CÁMARAS AEROFOTOGRAFICAS

“Las cámaras fotográficas para cartografía aérea son tal vez los instrumentos fotogramétricos más importantes, ya que con ellas se toman las fotos de las que depende esta tecnología. Para entender la fotogrametría, especialmente la base geométrica de sus ecuaciones, es fundamental tener un conocimiento elemental de las cámaras y cómo operan. Las cámaras aéreas tienen que realizar un gran número de exposiciones en rápida sucesión, mientras se desplazan en un aeroplano a alta velocidad de modo que necesita un siglo corto, lente rápida, obturador eficiente y magazín de gran capacidad”.

En la actualidad se usa un nuevo tipo de cámara para obtener imágenes en forma digital. En vez de película, estas cámaras emplean un arreglo de detectores de estado sólido que se colocan en el plano focal. El tipo más común de detector es el dispositivo acoplado de carga (CCD: Charge-coupled device). El arreglo está compuesto de diminutos detectores dispuestos en hileras y columnas contiguas. Cada detector percibe la energía recibida de su correspondiente escena en tierra, y esto constituye un “elemento pictórico” (pixel) dentro de la imagen total. El principio de operación de los CCD es fundamentalmente bastante sencillo. Para cualquier posición específica de un píxel, el elemento CCD que está ahí se expone a la energía de la luz incidente que acumula una carga eléctrica proporcional a la intensidad de la luz incidente. La carga eléctrica se amplifica, se convierte de forma analógica a digital, y se almacena en un archivo junto con su posición de hilera y columna dentro del arreglo. Actualmente, el tamaño de los elementos CCD individuales que se fabrican están en el rango de aproximadamente 5 a 15 micrómetros cuadrados, y los arreglos pueden consistir en desde 500 hileras y columnas (250000 pixeles) para cámaras económicas, hasta más de 4000 hileras y columnas. Obviamente que son necesarias capacidades significativas de manejo de datos y de almacenaje para la adquisición y procesamiento digital.

2.3.2. PLATAFORMA AÉREA NO TRIPULADA

La tecnología de los vehículos aéreos no tripulados surge al igual que el GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) en el ámbito militar; después de la segunda guerra mundial, científicos de la aviación tripulada trabajaron en prototipos de UAV (Vehículo Aéreo no tripulado).

El término “vehículo aéreo no tripulado” (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) se hizo común en los años 90 para describir a las aeronaves robóticas y reemplazó el término vehículo aéreo pilotado remotamente (Remotely Piloted Vehicle, RPV), el cual fue utilizado durante la guerra de Vietnam.

Esta tecnología llegó al Perú hace muchos años, pero ha alcanzado el pico y máxima expansión a partir del 2014. A la fecha, el Ministerio de Cultura en el Perú emplea esta tecnología de drones para obtener registro cartográfico con detalles estructurales de los sitios arqueológicos con rapidez, precisión, incluso en los lugares de difícil acceso. Esta aplicación en esta cartera viene realizándose desde noviembre del 2013, año en el que adquirió equipos y softwares de procesamiento para dicho fin (Ministerio de Cultura, 2014). Actualmente, el Ministerio de Cultura, mediante su área de nuevas tecnologías, completó el inventario de 375 sitios arqueológicos, donde 235 de ellos se encuentran en Lima Metropolitana; y el resto de ellos en los departamentos de Puno, Ayacucho, Junín, Ica, Ancash, La Libertad, Lambayeque, Piura y Tumbes (Ministerio de Cultura, 2016).

Es preciso mencionar según nuestra normativa vigente y la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) el termino DRON queda descartado y se denominan RPAS (Aeronaves Piloteadas a Distancia), cualquier otra acepción como VANT o UAV no es consistente con la Circular OACI 328 del año 2001 y el Documento OACI 10019 emitido en abril del 2015 y que constituyen la guía del marco normativo de los países miembros de la Organización de Aviación Civil Internacional, entre ellos el Perú.

2.3.3. FRAME DE UN RPAS

Es la estructura o esqueleto del Sistema de Aeronave Pilotado a Distancia (RPAS), ya sea de ala fija o multirrotor. El marco asegura y cubre a los demás componentes de la aeronave.

Históricamente eran hechos con aleaciones ligeras de magnesio, aluminio y titanio. A fin de reducir peso y aumentar la resistencia han aparecido los materiales compuestos: fibra de carbono, fibra de vidrio y plástico. Tanto la fibra de carbono como la de vidrio estarán

impregnadas con epoxi o poliéster para aumentar su rigidez. Además, en las zonas críticas del fuselaje suele haber refuerzos de fibra de carbono o de kevlar, que es un material de gran resistencia.

Los marcos pueden ser de diversos tamaños y diseños según la aerodinámica del sistema como se aprecia en la siguiente imagen.

Figura N°1. Ejemplo de un frame



Fuente: Elaboración Propia.

2.3.4. ACELERÓMETRO

Miden la inclinación del RPA respecto al suelo, y son necesarios para mantener un vuelo nivelado. Suelen tener redundancia al ser un sensor crítico, pero por lo general este sensor no falla.

Figura N°2. Ejemplo de un acelerómetro.



Fuente: Impextrom S.L. – Electrónica.

2.3.5. BRÚJULA

Mide la orientación del RPA respecto a la tierra, requiere calibración y es sensible a campos magnéticos y estructuras metálicas.

2.3.6. GPS/GNSS

Este sensor mide la posición del RPA (latitud, longitud y altura elipsoidal) y también permite determinar la velocidad de la aeronave. Es un componente esencial si queremos realizar vuelos programados por way points, como es lo usual en fotogrametría digital.

Figura N°3. Ejemplo de un GPS/GNSS para RPA.



Fuente: Ublox – NEO M8 series.

2.3.7. BARÓMETRO

Este sensor mide la presión del aire y permite determinar la altura del RPA con relación al punto de despegue con mayor precisión que el GPS/GNSS. Gracias a este sensor es posible monitorear en tiempo real la altura de la aeronave con un rango del metro.

Figura N°4. Ejemplo de un barómetro



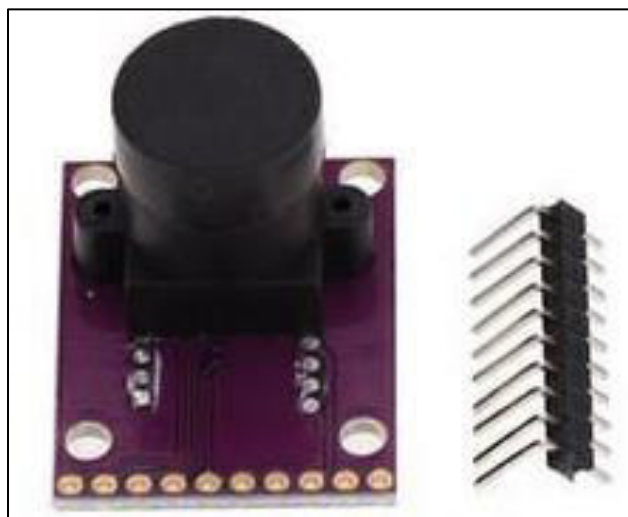
Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología con GNSS – RTK.

Fuente: Elaboración Propia.

2.3.8. FLUJO ÓPTICO

Este sensor permite medir la velocidad del RPA cuando se vuela a baja altura, facilita el vuelo en interiores y en zonas agrestes donde no se tiene señal de GPS/GNSS. Con este sensor tenemos redundancia para la aeronave y permite una mayor respuesta respecto al GPS/GNSS para determinar la velocidad. Tiene el mismo principio de funcionamiento que un mouse.

Figura N°5. Ejemplo de un sensor de flujo óptico.



Fuente: Elaboración Propia.

2.3.9. CÁMARA DIGITAL

En fotogrametría la cámara digital es el sensor más importante del RPA ya que determina la resolución final de la imagen, y este se relaciona con las precisiones alcanzadas en posición y altura de los productos cartográficos a partir de este método. La resolución de una cámara fotográfica digital está determinada por el sensor de la cámara, comúnmente un CCD o CMOS; este sensor está conformado por millones de “cubos” encargados de responder a las señales de luz, reemplazando el trabajo de la película en fotografía tradicional. Por lo general, estos cubos responden solo a una gama limitada de longitudes de onda ligeras, debido a que cada una tiene un filtro de color. Cada cubo capta un píxel y mediante un algoritmo de mosaicismo e interpolación se une la imagen de cada gama de longitud de onda por píxel en una imagen del RGB en donde se encuentran las 3 imágenes por píxel a fin de mostrar un color completo.

Figura N°6. Cámara digital Canon G7X.



Fuente: Soporte técnico Canon Perú

2.3.10. SENSEFLY EBEE.

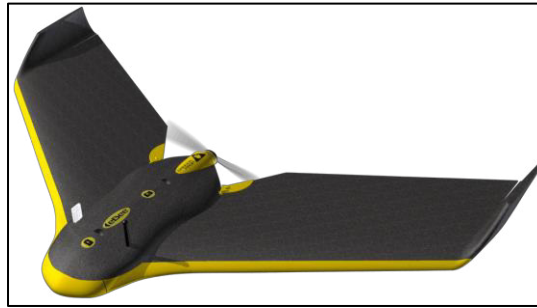
El eBee es el RPA más fácil de usar del mercado. Se considera profesional para Cartografía porque viene listo para el Mapeo y es totalmente autónomo. Su software de planeamiento es el emotion2 y tiene todas las funciones para programar un vuelo para fotogrametría. El emotion2 tiene en su base de datos un Modelo digital de elevación que permitirá al Ebee ascender y descender según sea conveniente, de esa manera mantiene una altura de vuelo constante y seguridad para el equipo.

Tabla N°03. Especificaciones técnicas – Ebee.

Peso	700 gr.
Envergadura	96 cm.
Cámaras	WX (18.2 Mpx), S110 NIR, ThermoMAP
Autonomía	50 minutos
Alcance de Radio	Hasta 3 km

Fuente: Soporte técnico Ebee Sensefly 2018.

Figura N°7. Rpa Sensefly Ebee AG.



Fuente: Soporte técnico Ebee Sensefly 2018.

2.3.11. TRIMBLE UX5.

Este RPA también se considera Profesional para cartografía ya que es totalmente autónomo, desde su despegue hasta su aterrizaje. Es un sistema completo con potentes tecnologías de monitoreo y seguridad (Empuje en reversa y procedimientos de seguridad automáticos). Su software de planeación es el Trimble Acces con un flujo de trabajo más simplificado. Al tener un mayor peso, este equipo despegue con una catapulta mecánica exclusivamente fabricada.

Tabla N°04. Especificaciones técnicas – UX5.

Peso	2.5 Kg.
Envergadura	100 cm.
Cámaras	24 Mpx sin espejo.
Autonomía	50 minutos
Alcance de Radio	Hasta 5 km

Fuente: Soporte técnico UX5 Trimble.

Figura N°8. Trimble UX5.



Fuente: Soporte técnico UX5 Trimble.

2.3.12. MAVINCI SIRIUS

RPA profesional para actividades cartográficas, cuenta con un simple lanzamiento manual, el avión Sirius opera en piloto automático completo o modo de vuelo asistido en forma automática, y puede aterrizar en modo totalmente automático o manual, con asistencia del piloto automático. Después del aterrizaje de la aeronave, se puede confirmar la adquisición de los datos con una rápida verificación de datos en el campo. Los datos de registro fotográfico (posición GNSS y sellos de tiempo en imágenes) se copian de forma inalámbrica desde Sirius Pro a MAVinci Desktop.

Tabla N°05. Ponderación de GSD en función a la altura de vuelo de Mavinci.

GSD	AGL / m / ft		side overlap / in flight overlap	
			65 / 85 %**	20 / 80 %
1.6 cm	59.4 m	195 ft	0.7 km ²	1.62 km ²
2.6 cm	96.5 m	317 ft	1.13 km ²	2.65 km ²
3.2 cm	119 m	390 ft	1.42 km ²	3.20 km ²
5.0 cm	186 m	610 ft	2.25 km ²	5.12 km ²
10 cm	371 m	1217 ft	4.54 km ²	9.97 km ²
20 cm	743 m	2438 ft	8.67 km ²	18.20 km ²

Fuente: Soporte técnico Mavinci.de, 2014.

Tabla N°06. Especificaciones técnicas – Mavinci.

Peso	2.7 Kg.
Envergadura	120 cm.
Cámaras	LUMIX GX1 16 Mpx.
Autonomía	45 minutos
Alcance de Radio	Hasta 6 km

Fuente: Soporte técnico Topcon Positioning Systems

Figura N°9. Mavinci Sirius.



Fuente: Soporte técnico Topcon Positioning Systems

2.3.13. DJI PHANTOM 4.

Este RPA desde el punto de vista de su fabricación no lo podemos considerar como profesional para cartografía, ya que su diseño en cuanto a hardware y software no viene preparado inicialmente para estas actividades. Pero hoy en día, las industrias colaboradoras o no de la marca DJI han fabricado softwares de planificación para mapeo totalmente compatibles con este modelo como son la marca Precisión Fligth, Drone made easy MapPilot, Pix4D etc. Teniendo en cuenta este soporte, el Phantom 4 se plantea como una gran opción para Mapeos de pequeñas extensiones y medianas extensiones.

Una gran ventaja del phantom 4 es que cuenta con una avanzada rótula de estabilización en 3 ejes, que elimina la vibración y movimientos no deseados en vuelo, permitiendo que la cámara grabe vídeo fluido en maniobras complejas. De igual manera esto influye en la adquisición de fotografías bien enfocadas y sin mucha distorsión que pueda producir el movimiento de la plataforma. El Phantom 4 se conecta tanto a GPS como a GLONASS, permitiendo que se conecte a los satélites más rápido y posicionándose con una precisión extrema en el aire.

Tabla N°07. Especificaciones técnicas – Phantom4.

Peso	1.38 Kg.
Envergadura	0.35 cm.
Cámaras	1/2.3"CMOS Píxeles efectivos: 12 M
Autonomía	28 minutos
Alcance de Radio	Hasta 5 Km.

Fuente: Soporte técnico DJI, 2017.

Figura N°10. Dji Phantom 4.



Fuente: Soporte Técnico DJI

2.3.14. MICRODRONES MD4 – 1000.

Equipo profesional para mapeo 2D y 3D. La electrónica a bordo garantiza que cada situación este bajo control, con gran precisión. Su tecnología mdCockpit es una aplicación que reúne todas las funciones para la planificación, seguimiento y análisis de sus vuelos totalmente autónomos para fotogrametría. Con este RPA de alto rendimiento es posible ejecutar aterrizajes totalmente automáticos con una mínima intervención del operador si es necesario.

Con este sistema es posible acceder a una prestación RTK o PPK, esta tecnología proporciona ahorros de costes significativos a los usuarios y permite el acceso cuando las imágenes se deben georreferenciar en lugares difíciles.

Tabla N°08. Especificaciones técnicas – Md 4-1000.

Peso	2.650 Kg.
Envergadura	1730 cm.
Cámaras	✓ A elección del usuario final: ✓ Cámara térmica. ✓ Cámara multiespectral y NIR. ✓ Cámara digital Sony NEX7.
Autonomía	Hasta 45 minutos
Alcance de Radio	Hasta 20 Km con WP.

Fuente: Soporte técnico Microdones, 2017.

Figura N°11. Microdrones md4-1000.



Fuente: Soporte técnico Microdrones

2.3.15. GEONMAP V6

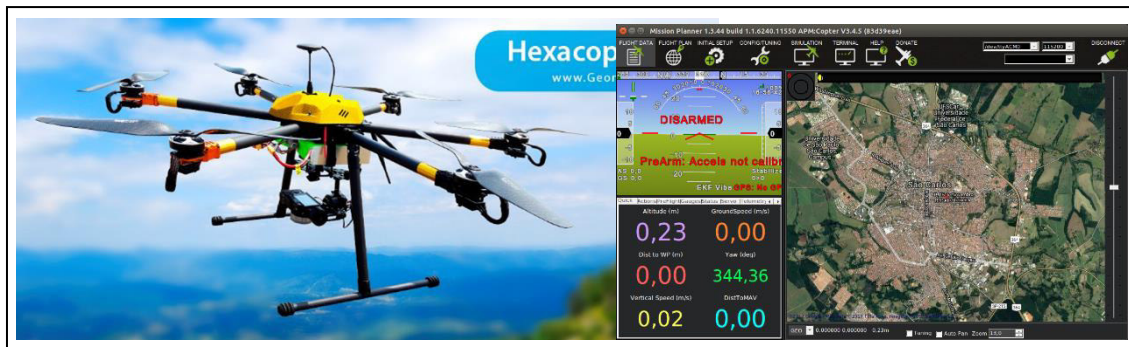
Este RPAS ensamblado y calibrado en Perú ofrece bajo vuelo y cartografía de alta precisión. Fácil de volar y simple de operar, el Hexacoptero V6 puede despegar y aterrizar incluso en las áreas más estrechas, lo que hace que el vehículo sea compatible con casi cualquier tipo de terreno. Y debido a que el equipo puede volar a baja altura y a una velocidad lenta, puede capturar imágenes con un nivel de detalle y precisión que es imposible adquirir con vuelos tripulados o imágenes de satélite. El software para diseñar su plan de vuelo es el Mision Planner, Una plataforma sencilla para programar vuelos fotogramétricos y realizar maniobras de seguridad.

Tabla N°09. Especificaciones técnicas – GeonMap V6.

Peso	5.90 Kg.
Envergadura	1.10 cm.
Cámara	Sony 24.3 Mpx.
Autonomía	Hasta 30 minutos
Alcance de Radio	Hasta 10 Km.

Fuente: Soporte técnico GeonMap, 2017.

Figura N°12. GeonMap V6.

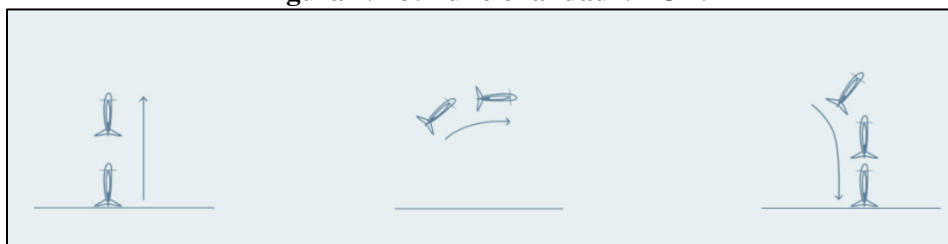


Fuente: Elaboración Propia.

2.3.16. WINGTRAONE PPK.

Es un RPAS para Mapeo profesional de Origen Suizo, Posee una capacidad de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) como un equipo multirotor pero para la misión de reconocimiento pasa a un vuelo de crucero hacia adelante, que coincide con la resistencia y la velocidad de los equipos de ala fija, por lo que se le considera híbrido.

Figura N°13. Funcionalidad VTOL.



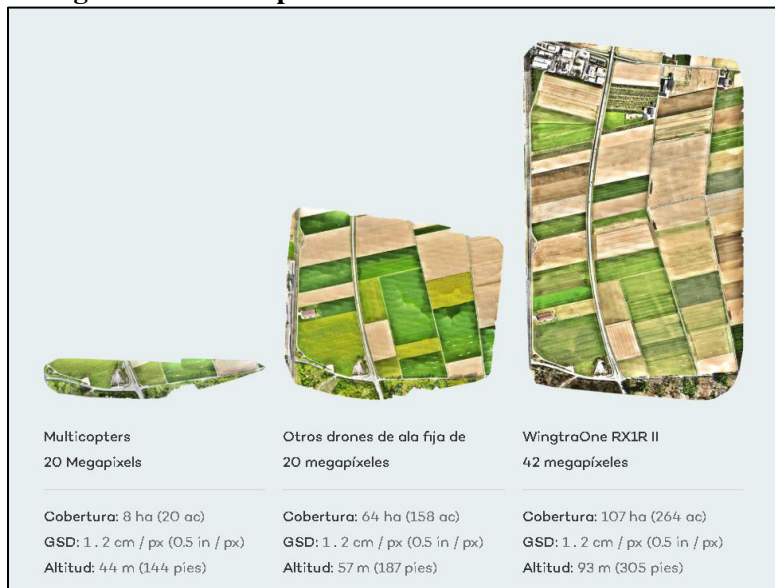
Fuente: Soporte Técnico WingtraOne.

WingtraOne ofrece una carga útil Sony RX1RII de 42 MP de fotograma completo, que garantiza una mejor reconstrucción del mapa, una cobertura más amplia y los resultados de mayor precisión. Este equipo también posee una funcionalidad PPK para alcanzar una precisión de hasta 1 cm, Que antes solo era posible con equipos de levantamiento en tierra, El fabricante menciona usar tan solo tres puntos de control en el campo para verificar los resultados.

En un vuelo, WingtraOne puede mapear casi 2 veces más que un RPAS convencional de ala fija y aproximadamente 10 a 14 veces más que los drones multirotor. Debido a su sensor de

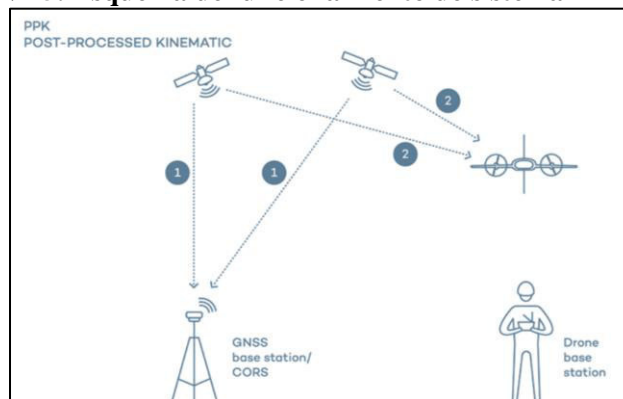
alta resolución, el WingtraOne puede volar más alto abarcando una mayor extensión de terreno, pero garantizando un óptimo valor de GSD.

Figura N°14. Comparativo de levantamiento con RPAS.



Fuente: Soporte Técnico WingtraOne.

Figura N°15. Esquema de funcionamiento de sistema RPAS – PPK.



Fuente: Soporte Técnico WingtraOne.

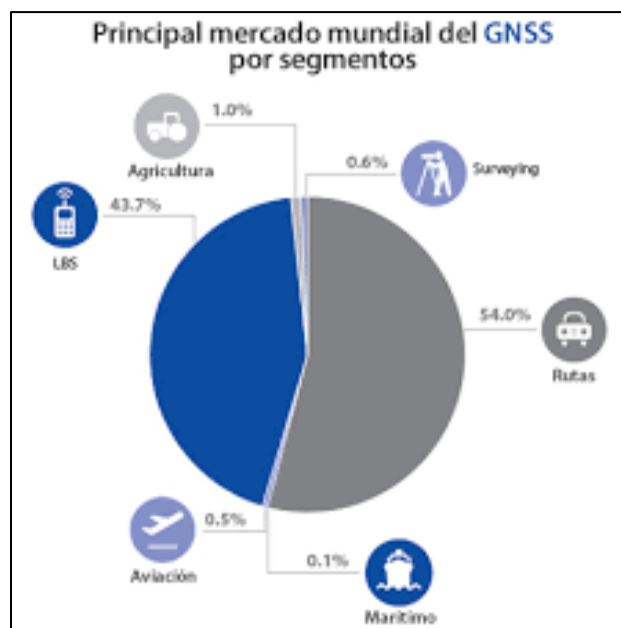
2.3.17. SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Jose Luis Berné Valero (2014) sostiene: “Un Sistema Global de Navegación por Satélite (su acrónimo en inglés GNSS) es una constelación de satélites que transmite rangos de señales utilizados para el posicionamiento y localización en cualquier parte del globo terrestre, ya sea en tierra, mar o aire. Estos permiten determinar las coordenadas geográficas y la altitud de un punto dado como resultado de la recepción de señales provenientes de constelaciones de satélites artificiales de la Tierra para fines de navegación, transporte, geodésicos, hidrográficos,

agrícolas, y otras actividades afines. Un sistema de navegación basado en satélites artificiales puede proporcionar a los usuarios información sobre la posición y la hora (cuatro dimensiones) con una gran exactitud, en cualquier parte del mundo, las 24 horas del día y en todas las condiciones climatológicas”.

Este sistema satelital fue creado y diseñado originalmente para su aplicación a fines militares, y posteriormente para uso civil. La navegación y topografía fueron sus dos primeras aplicaciones principales de uso civil. Actualmente, las aplicaciones del sistema satelital para uso civil han aumentado considerablemente, desde la navegación de automóviles o la administración de una flota de camiones, hasta la automatización de maquinaria de construcción. A continuación, podemos observar el principal mercado mundial del GNSS.

Figura N°16. Mercado GNSS.



Fuente: GNSS.GPS, Jose Luis Berné Valero. 2014.

- ✓ RUTAS: Sistemas Portable Navigation Device (PND) y en el vehículo, la navegación de apoyo.
- ✓ LBS: Servicio basado en Geolocalización (LBS – GNSS) compatibles con teléfonos y servicios.
- ✓ Aviación: Los dispositivos GNSS para aplicaciones regionales, comerciales, generales y de negocio de la aviación.
- ✓ Agricultura: Tecnología de Aplicación Variable de Insumos (VRT) – dirección automática, orientación del tractor.

Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología con GNSS – RTK.

- ✓ Marítima: La flota mercante y las aplicaciones de los GNSS en el mar abierto.
- ✓ Surveying: Geodesia y Topografía, la tierra y levantamientos hidrográficos.

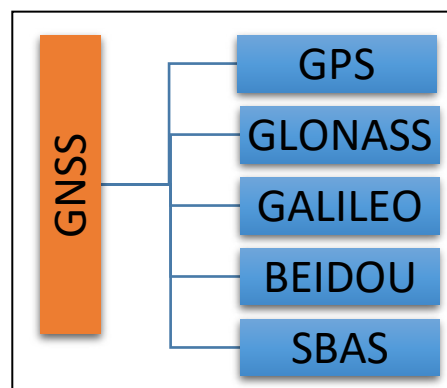
La arquitectura del sistema GNSS se divide en tres segmentos diferentes:

- El segmento Espacial: conformado por las constelaciones satelitales que orbitan alrededor de la Tierra.
- El segmento de Control: conformado por todas las estaciones ubicadas en Tierra, cerca del ecuador terrestre que se encargan de controlar y hacer seguimiento a los satélites.
- El segmento de Usuarios: conformado por cualquier receptor que reciba y utilice las señales procedentes del segmento espacial.

2.3.18. CONSTELACIONES SATELITALES

El sistema de Navegación Global por Satélite (GNSS), está compuesto por los siguientes Sistemas: NAVSTAR-GPS-1973. (Funciona mediante una red de 24 satélites en órbita sobre el planeta tierra y pertenece a EEUU), GLONASS (Consta de una constelación de 31 satélites, 24 en activo, 3 satélites de repuesto, 2 en mantenimiento, uno en servicio y otro en pruebas), Galileo (El sistema Galileo estará formado por una constelación mundial de 30 satélites en órbita terrestre) y Beidou (Se prevé la segunda generación, cuente con 12 a 14 satélites entre 2011 y 2015. Para 2020, ya plenamente operativo deberá contar con 30 satélites. De momento, ya tienen 14 en órbita).

Figura N°17. Constelaciones GNSS.

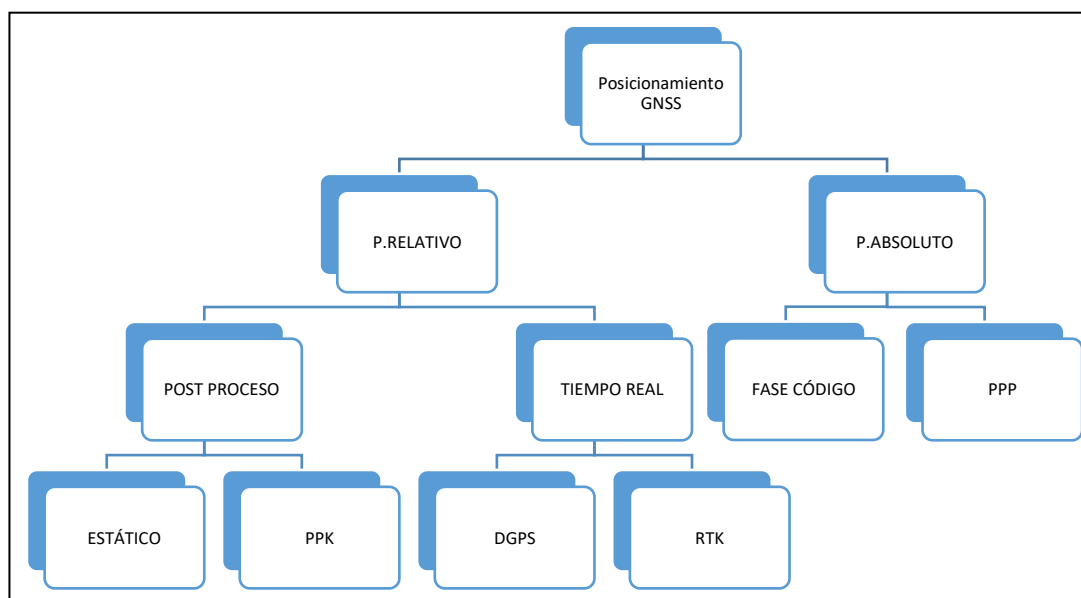


Fuente: Elaboración propia.

2.3.19. TÉCNICAS Y MÉTODOS DE POSICIONAMIENTO SATELITAL

“El GNSS es un sistema que permite el posicionamiento con distintos métodos de observación, de acuerdo a la instrumentación, a la exigencia de precisión y a la técnica de proceso de los observables” (Berné et al., 2014). Por lo tanto, determinar una clasificación para el posicionamiento preciso en base a técnicas GNSS y sistemas aumentativos, es nada más que organizar bajo un cierto criterio estas condiciones previas.

Figura N°18. Métodos de posicionamiento u observación GNSS.

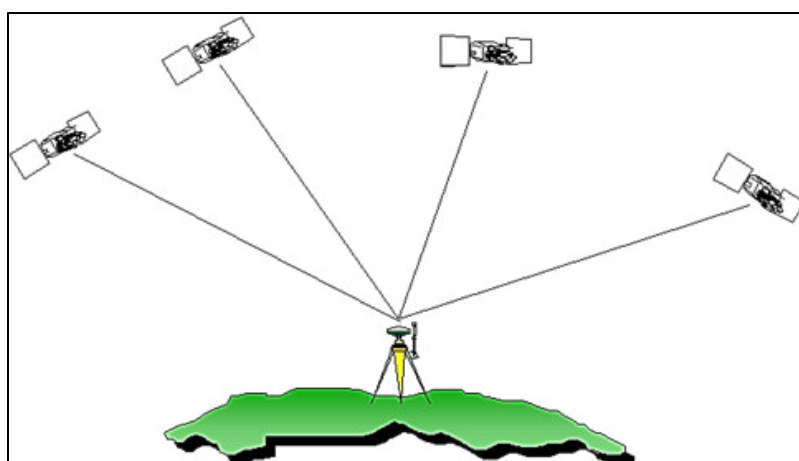


Fuente: Elaboración propia.

2.3.20 POSICIONAMIENTO GNSS ABSOLUTO

“El posicionamiento Absoluto es el cálculo de la posición de un punto mediante la observación de al menos 4 satélites, sea por pseudodistancia de código o fase” (Berné et al., 2014). En esta técnica solo se utilizará un único Receptor GNSS.

Figura N°19. Posicionamiento absoluto GNSS.



Fuente: Soporte Técnico Geomax.

Figura N°20. Aplicación del posicionamiento absoluto. GPS Garmin.

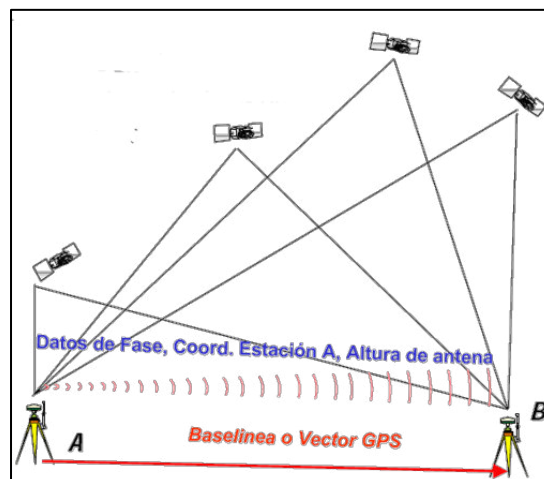


Fuente: Elaboración propia.

2.3.21 POSICIONAMIENTO GNSS RELATIVO

“El objetivo del posicionamiento relativo consiste en la determinación de las componentes del vector que une dos puntos A y B, donde uno de ellos se establece como fijo, a este vector se le llama *baseline* o *línea base*” (Berné et al., 2014). Dichas componentes se determinan en incrementos de coordenadas (ΔX , ΔY , ΔZ) o cálculo del azimut de la distancia relativa y diferencia de altura. Dentro de esta metodología se encuentra el posicionamiento RTK Y PPK.

Figura N°21. Posicionamiento relativo GNSS.



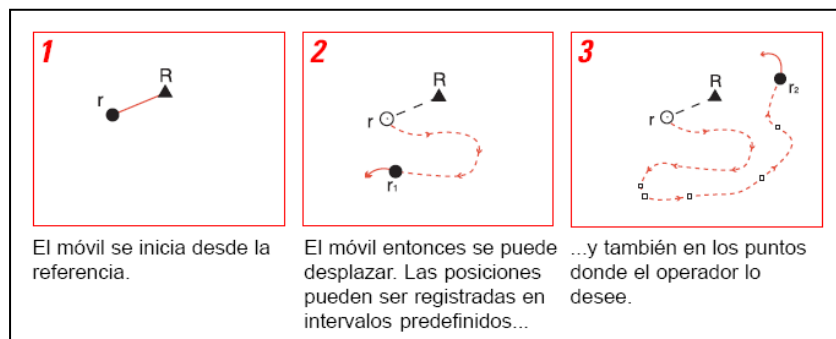
Fuente: Soporte Técnico Geomax.

En el posicionamiento relativo una estación de referencia fija rastrea de modo continuo con capacidad de resolver las ambigüedades en tiempo real. El otro receptor en una plataforma móvil. El segundo receptor obtiene su posición en tiempo real o luego de un post proceso con gran precisión entre 1 a 2 cm, de acuerdo a la longitud de la línea base. Dentro del posicionamiento relativo GNSS podemos encontrar las técnicas de post proceso cinemático y tiempo real cinemático (RTK).

2.3.22 POST PROCESO CINEMÁTICO.

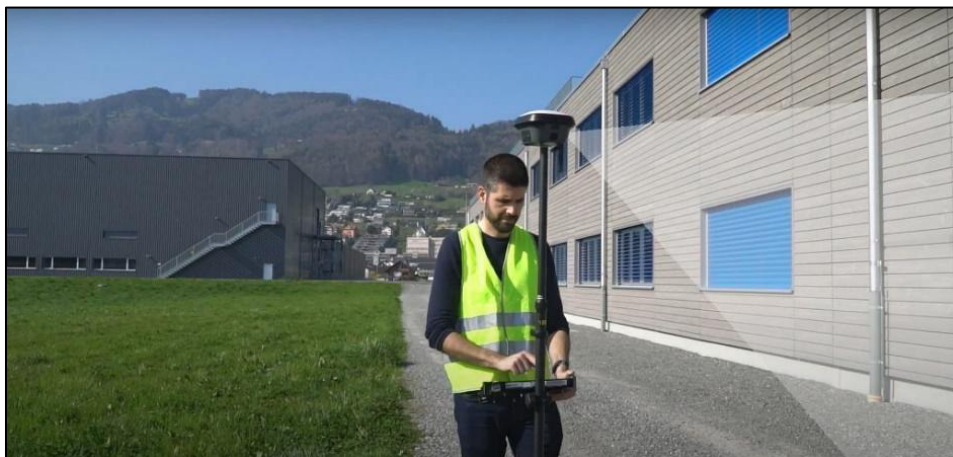
La técnica se basa en el cálculo de la posición de un receptor móvil respecto de un fijo que permanece en una referencia de coordenadas conocidas. El conocimiento de la trayectoria seguida por el receptor móvil solo es conocido cuando se realce el cálculo en gabinete, por ello su nombre de post proceso cinemático.

Figura N°22. Descripción de toma cinemática.



Fuente: Soporte Técnico Leica Geosystems.

Figura N°23. Aplicación del método cinemático para trayectorias.



Fuente: Soporte Técnico Leica Geosystems.

2.3.23 TIEMPO REAL CINEMÁTICO (RTK).

Es un tipo de levantamiento cinemático (Trayectorias) en tiempo real. La estación base de referencia tiene un sistema de radio conectado y puede transmitir los datos de corrección diferencial. El receptor móvil (rover) también cuenta con una radio interna y recibe la señal emitida de la Estación base. Este receptor móvil también recibe señal de los satélites directamente desde su propia antena. Estos datos recibidos por el móvil son procesados conjuntamente para resolver las ambigüedades y obtener una posición muy precisa alrededor de 1 o 2 centímetros en relación con el Receptor de Referencia y ello en tiempo real gracias al software del receptor.

Por lo general, los sistemas RTK GNSS emplean un pequeño radio modem UHF. La mayoría de los usuarios han experimentado algunos inconvenientes con la radio comunicación del sistema RTK debido a la pérdida de la señal con el receptor base. Por ello, es importante considerar algunos factores al tratar de optimizar y mejorar el rendimiento del radio; por ejemplo, la potencia del radio transmisor, la altura de la antena del transmisor, entre otros.

Figura N°24. Trabajos realizados con el método RTK con sistema de radio UHF.



Fuente: Elaboración propia. 2017.

2.3.24 RED GEODÉSICA GEOCÉNTRICA NACIONAL

El Instituto Geográfico Nacional es el ente encargado de administrar esta red geodésica y sostiene lo siguiente: “La Red Geodésica Geocéntrica es una red que integra a 71 Estaciones de Referencia Permanentes distribuidas convenientemente en el territorio nacional. Esta nueva infraestructura de posicionamiento brindará a nivel nacional la posibilidad de realizar procesamiento en línea RTK (tiempo real) en las modalidades de Single Station y Multistation; sin embargo, una de las novedades más importantes de este proyecto será el empleo de la

tecnología de Estación de Regencia Virtual (Virtual Reference Station) VRS, que se implementará en Lima Metropolitana y otras ciudades importantes del país”.

“El concepto de VRS (Virtual Referente Station) reduce o elimina los errores sistemáticos de efectos de la ionósfera y la tropósfera en la estación de referencia, esto no sólo permite incrementar la distancia entre los Roversny las Estaciones de Referencias, sino que también aumenta la fiabilidad del sistema y disminuye el tiempo de inicialización, alcanzando precisiones de 1cm”.

2.3.25 PÍXEL

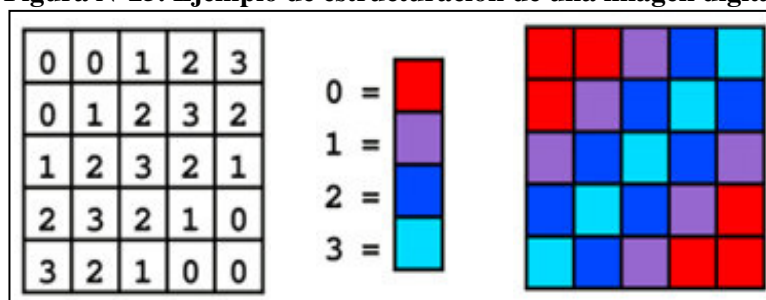
El píxel es el elemento más pequeño de una imagen que recoge radiación de una pequeña área sobre el terreno. Cada píxel queda determinado por un nivel digital relacionado con la radiación recibida durante el breve tiempo de exposición.

2.3.26 IMAGEN DIGITAL

Una imagen digital o gráfico digital es una representación bidimensional de una imagen a partir de una matriz numérica, generalmente en binario (unos y ceros).

La imagen digital está conformada por dos tipos de información: geométrica y radiométrica. La información geométrica se compone por coordenadas (filas y columnas) y tamaños del píxel (size pixel, um); y la información radiométrica está compuesta por los niveles digitales y el rango dinámico, este último es el rango de niveles digitales que usa la cámara.

Figura N°25. Ejemplo de estructuración de una imagen digital.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.27 GROUND SAMPLING DISTANCE (GSD)

Las Fotografías o imágenes digitales se caracterizan por el valor de GSD, que es la resolución espacial final de la imagen, “Representa la distancia de remuestreo sobre el terreno que es la longitud del terreno cuya imagen es recogida por la anchura de un píxel sensor (Huella del píxel sobre terreno). El valor de GSD viene influenciado directamente por la altura de vuelo del RPAS y la resolución de su cámara”.

$$GSD = ESC \times PS \quad \dots (1)$$

Donde:

- ESC: Escala de la imagen.
- PS: Anchura del sensor.

DETERMINACIÓN DEL GSD

$$H = GSD * R * \frac{f}{Sw} \quad \dots (2)$$

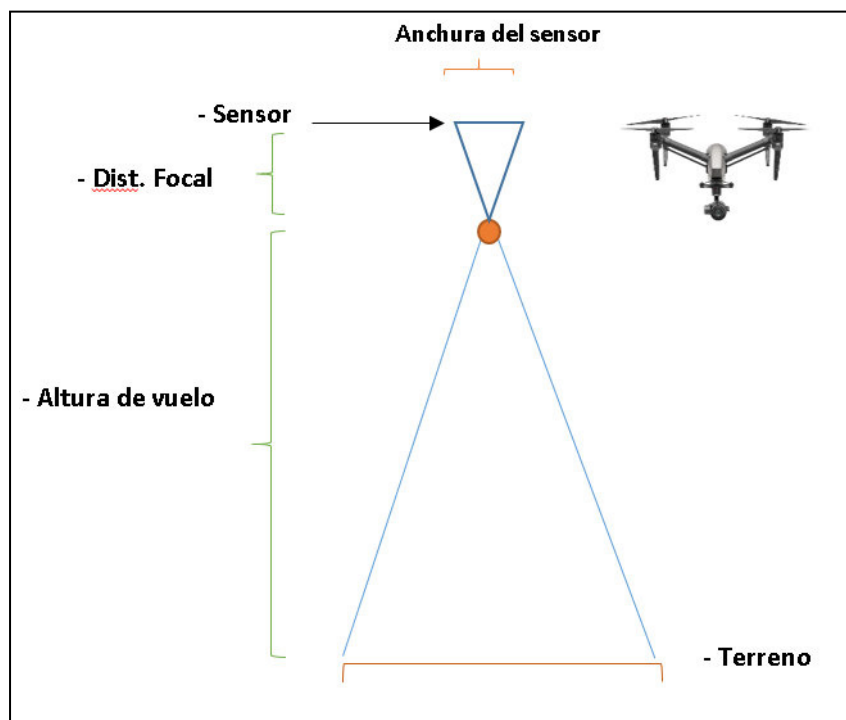
Despejando

$$GSD = \frac{H}{R} * \frac{Sw}{f} \quad \dots (3)$$

Donde:

- H: Altura de vuelo.
- Sw: Anchura del sensor.
- R: Resolución del sensor (Horizontal).
- f: Distancia focal.

Figura N°26. Parámetros de cálculo para el GSD.



Fuente: Elaboración propia.

En el siguiente ejemplo se va a determinar el valor de GSD para una altura de 60 metros y utilizando el RPAS Phantom 4.

- H: 60 m.
- Sw: 6.31748 mm.
- R: 4000 Pix.
- f: 3.72193 mm.

Para obtener los parámetros nos apoyamos en la siguiente información de sensores.

A continuación, se muestra algunos parámetros de algunas cámaras de RPAS comerciales:

Tabla N°10. Parámetros de algunos sensores de RPAS.

RPAS - PHANTOM 4	
Sensor Width (SW) - mm	6.31748
Sensor Height - mm	4.73811
Pixel Size - um	1.57937
Focal Length (f) - mm	3.72193
Focal Length (f) - Pixel	2356.59
Imagen width (Resolución Horizontal) - pixel	4000
Imagen Height (Resolución Vertical) - pixel	3000
RPAS - PHANTOM 4 PRO	
Sensor Width (SW) - mm	11.4074
Sensor Height - mm	8.55554
Pixel Size - um	2.34527
Focal Length (f) - mm	8.55554
Focal Length (f) - Pixel	3666.96
Imagen width (Resolución Horizontal) - pixel	4864
Imagen Height (Resolución Vertical) - pixel	3648
RPAS - EBEE S110 CANON POWERSHOT	
Sensor Width (SW) - mm	7.44
Sensor Height - mm	5.58
Pixel Size - um	1.86
Focal Length (f) - mm	5.36403
Focal Length (f) - Pixel	2883.89
Imagen width (Resolución Horizontal) - pixel	4000
Imagen Height (Resolución Vertical) - pixel	3000
RPAS - EBEE SONY DSC - WX220	
Sensor Width (SW) - mm	6.16999
Sensor Height - mm	4.62749
Pixel Size - um	1.26021
Focal Length (f) - mm	4.5724
Focal Length (f) - Pixel	3628.28
Imagen width (Resolución Horizontal) - pixel	4896
Imagen Height (Resolución Vertical) - pixel	3672

Fuente: Elaboración propia

$$GSD = \frac{60\,000}{4000} * \frac{6.31748}{3.72193}$$

$$GSD = 25.461\,mm/Pix.$$

$$GSD = 2.546\,cm/Pix$$

De manera convencional el valor del GSD se expresa en centímetros por pixel por lo tanto para una altura de 60 metros utilizando el Phantom 4 tenemos un GSD promedio de 2.5461 cm/Pix.

Ahora calculemos el GSD con la misma altura de 60 metros utilizando el Phantom 4 PRO.

- H: 60 m.
- Sw: 11.4074 mm.
- R: 4864 Pix.
- f: 8.55554 mm.

$$SD = \frac{60\,000}{4864} * \frac{11.4074}{8.55554}$$

$$GSD = 16.447\,mm/Pix.$$

$$GSD = 1.645\,cm/Pix$$

De manera convencional el valor del GSD se expresa en centímetros por pixel por lo tanto para una altura de 60 metros utilizando el Phantom 4 PRO tenemos un GSD promedio de 1.645 cm/Pix.

El GSD es el valor más importante a la hora de predecir precisiones del levantamiento y los costos del mismo. Es preciso tenerlo en cuenta desde la etapa inicial hasta el procesamiento de datos.

Figura N°27. Ejemplo de ortofotos con distintos valores de GSD.

GSD = 17 cm/Pix.	GSD = 10 cm/Pix.
	

Fuente: Elaboración propia.

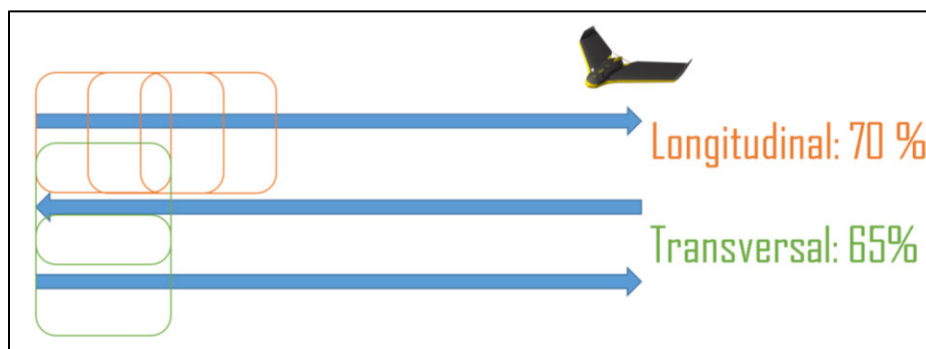
2.3.28 TRASLAPE TRANSVERSAL Y LONGITUDINAL

Superposición parcial de las fotografías tomadas por la aeronave, en la realización de un levantamiento fotogramétrico. El traslape puede ser Longitudinal; es el que se da en la misma línea de vuelo, y el transversal; entre líneas de vuelo contiguas. Se recomienda que el traslape longitudinal mínimo sea de 70 % y el transversal de 65% para Levantamientos Fotogramétricos con RPAS.

El algoritmo de los programas informáticos, utilizados para el procesamiento inicial de las imágenes, se encarga de realizar el emparejamiento de los puntos comunes entre las fotografías. Para que esto suceda, es imprescindible que existan puntos característicos comunes entre fotografías contiguas, los cuales se correlacionan y realizan una triangulación para determinar la posición de cada uno de los miles o cientos de miles de puntos que integran la nube de puntos; reconstruyendo así el modelo tridimensional 3D.

Esta correlación y emparejamiento no sería posible si no existe una superposición frontal y lateral de las fotografías capturadas, es decir, si no tendrían un “traslape longitudinal” y “traslape trasversal”, por lo que estas deberían estar superpuestas una sobre otra en un determinado porcentaje. Si el traslape entre cada fotografía es mayor, la reconstrucción del modelo tridimensional será más preciso; por ello, para terrenos ondulados o abruptos se recomienda tener un mayor porcentaje de traslape en comparación de terrenos llanos.

Figura N°28. Ejemplo de traslape longitudinal y transversal.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.29 SENSOR VISUAL

La cámara digital viene a ser el principal sensor de la aeronave a la hora de realizar fotogrametría aérea, ya que en función a sus parámetros y conjuntamente con la altura de vuelo vamos a obtener el valor el valor del GSD.

“La primera característica a considerar para determinar la calidad de imagen de una cámara digital es su resolución. La resolución de una cámara se determina por píxeles: mientras más píxeles, más alta la resolución”.

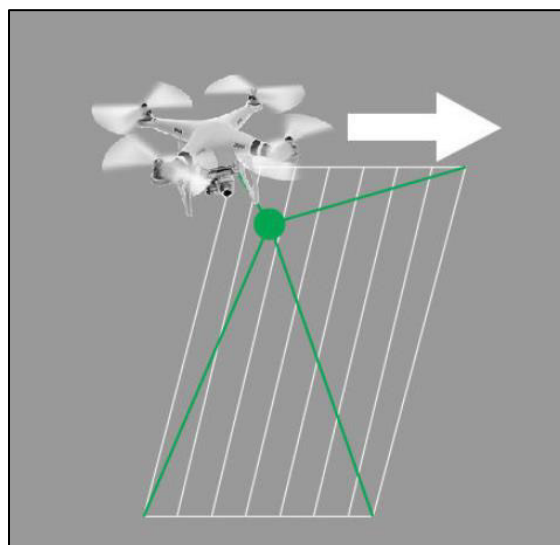
En fotogrametría digital el sensor electrónico es el componente más importante; se trata de un chip formado por millones de componentes fotosensibles que funciona convirtiendo la luz que capta en señales eléctricas que formarán la imagen y cada uno de los elementos fotosensibles del sensor se denomina Píxel.

2.3.30 SENSOR CCD

El sensor CCD o dispositivo de carga acoplada es uno de los más comunes y utilizados en la imagen digital. Su coste es elevado por su complejo proceso de fabricación. Necesita un chip externo denominado conversor analógico – digital. Estos sensores por lo usual van implementados en las cámaras de los RPAS de ala Fija como Ebee, UX5, Mapvinci por lo mismo de sus costos elevados. Una cámara con sensor CCD cuenta con un obturador global que permite que la imagen se grabe casi al mismo tiempo de la toma.

Esta tecnología permite que el efecto de distorsión por movimiento se reduzca a cero o casi nula. Por lo general van instaladas en cámaras profesionales de las aeronaves de ala fija ya que éstas vuelan a mayor velocidad.

Figura N°29. Captura de imagen con sensor CCD.



Fuente: Soporte técnico PIX4D.

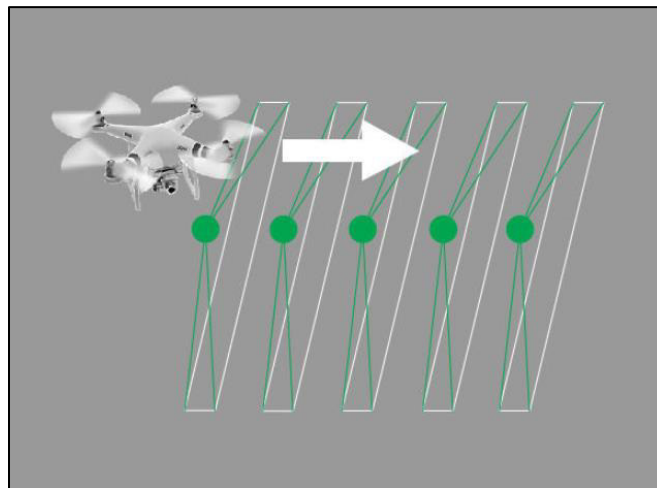
2.3.31 SENSOR CMOS

También llamado sensor semiconductor complementario de óxido metálico, puede integrar muchas funciones y procesos. Consume mucha menos energía por lo que su costo es más económico. Por lo general va instalado en los equipos de ala rotatoria como el Phantom 3, 4 Phantom 4 Pro etc. Estos tipos de sensores registran cada cuadro de imagen línea por línea, pudiéndose generar el efecto de persiana enrollable.

El efecto de obturador giratorio se produce cuando la relación cámara-objeto ya ha cambiado durante la lectura línea por línea de la misma imagen. Cuando se utilizan estas imágenes distorsionadas en el software de fotogrametría, el desplazamiento de píxeles puede causar problemas para la coincidencia de características y, por lo tanto, parámetros de la cámara inexactos. Los parámetros de cámara incorrectamente calculados darán como resultado precisiones de mapeo de baja calidad.

Algunos softwares de fotogrametría han desarrollado algoritmos para mitigar este efecto, pero por lo general se recomienda cuando un equipo tenga este tipo de sensor, volar a baja velocidad; como máximo los 9m x segundo.

Figura N°30. Captura de imagen con sensor CMOS.



Fuente: Soporte técnico PIX4D.

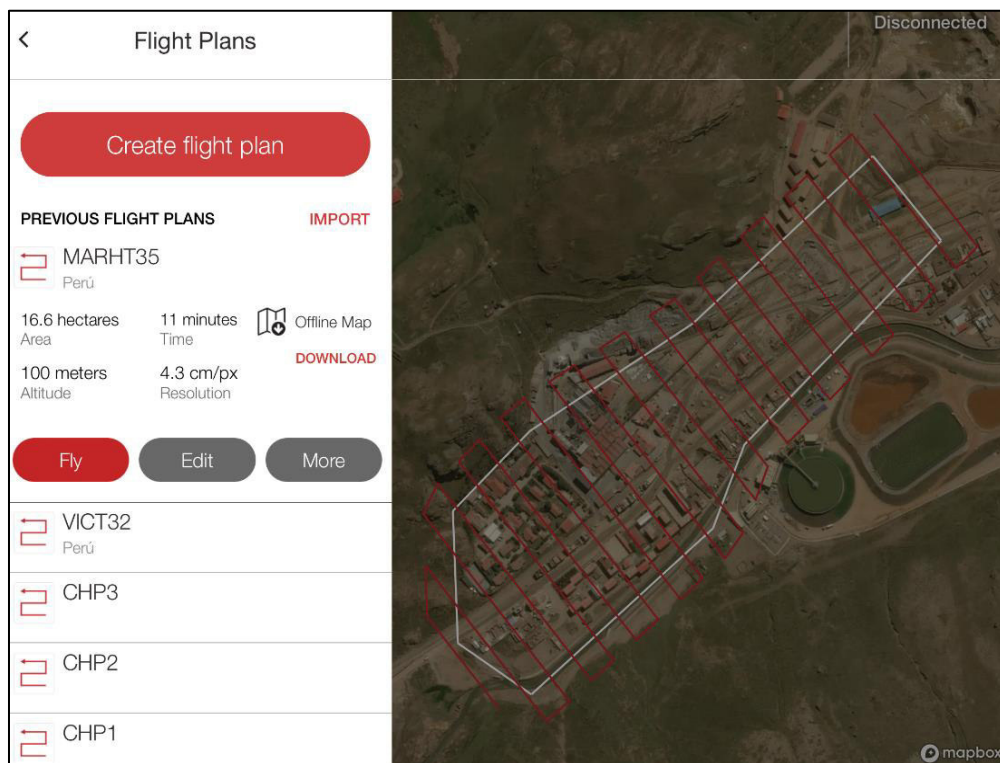
2.3.32 PLANIFICACIÓN DE VUELO

La planificación de vuelo, es la obtención de adecuada “cobertura fotográfica” con un mínimo de fotografías, tal que cada porción de terreno, debe ser cubierta estereoscópicamente, esto significa que toda la superficie debe aparecer en las zonas de superposición tanto de fotografías adyacentes de un recorrido como en las áreas superpuestas de recorridos vecinos.

La etapa de planificación de vuelo consiste en asignar coordenadas (Waypoints) de ruta para la aeronave, Altura de vuelo y GSD, Traslapes, Dirección de las líneas de vuelo, velocidad y demás parámetros que lo permita la aplicación elegida. En primera instancia esta etapa se lleva a cabo en gabinete seleccionando de manera adecuada los parámetros del proyecto y guardando la misión (Waypoints, Altura y GSD, Dirección, velocidad etc) para posteriormente iniciar la misión en campo.

En la actualidad para aeronaves DJI existen varias aplicaciones de vuelo como Precision Fligth, MapPilot, DJI GS pro, Drone deploy etc. Algunas libres y otras con paquetes de costo según la necesidad del usuario.

Figura N°31. Aplicación de vuelo PrecisionFligth for DJI.



Fuente: Elaboración propia.

La aplicación Precisión fligth for DJI tiene una versión libre para sistema IOS y Android, Con prestaciones óptimas para proyectos de fotogrametría con aeronaves de ala rotatoria DJI. Permite la asignación de:

- ✓ Altura de vuelo y GSD.
- ✓ Traslape transversal y Longitudinal.
- ✓ Velocidad de aeronave.

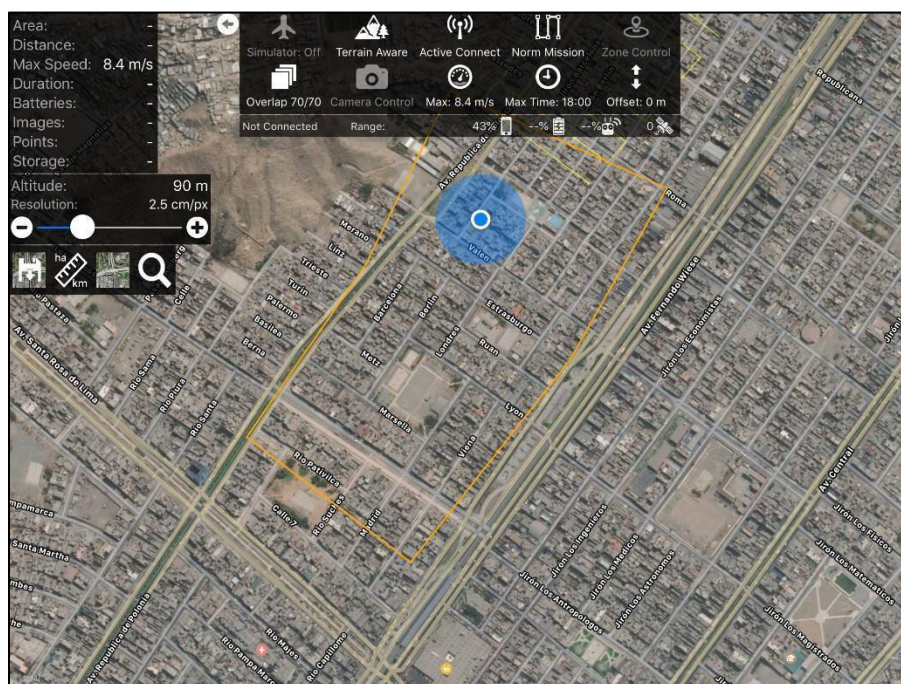
Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología con GNSS – RTK.

- ✓ Extensión de líneas de vuelo.
- ✓ Ingreso manual de coordenadas.
- ✓ Función para completar vuelos extensos.
- ✓ Importar KML (Solo para Android).

De igual manera Precisión flight for DJI tiene diversas opciones de monitoreo y maniobras de emergencia para la aeronave como:

- ✓ Estado de batería de la aeronave.
- ✓ Estado de batería del mando y Tablet o IPAD.
- ✓ Estado de la telemetría entre aeronave y mando.
- ✓ Opción para detener la misión y retornar a casa la aeronave.

Figura N°32. Parámetros disponibles en Mappilot.



Fuente: Elaboración propia.

2.3.33 CONTROL TERRESTRE APOYADO EN GNSS

En la actualidad se incorpora un receptor GPS/GNSS a bordo de la aeronave fotogramétrica, puede ser de calidad de navegación o diferencial RTK/PPK, es uno de los avances más importantes en materia de apoyo para los levantamientos aerofotogramétricos con RPAS, reduciendo en forma notable el control terrestre.

El control terrestre es la adquisición in situ de coordenadas de puntos estratégicos con mayor precisión, ya que estos puntos permitirán regenerar el modelo en el sistema local deseado. La precisión del modelo depende en gran medida de la distribución y cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico. Para aplicaciones de Topografía y cartografía a escala grande es muy importante que se realice un control terrestre en campo, para ajustar el modelo al sistema de referencia del proyecto.

La etapa de fotocontrol se realiza de manera habitual con Receptores GPS - GNSS en modo RTK. Incluso, se podría usar otros instrumentos y equipos como la estación Total, pero por cuestiones de optimizar tiempo y calidad se puede optar por el Sistema RTK.

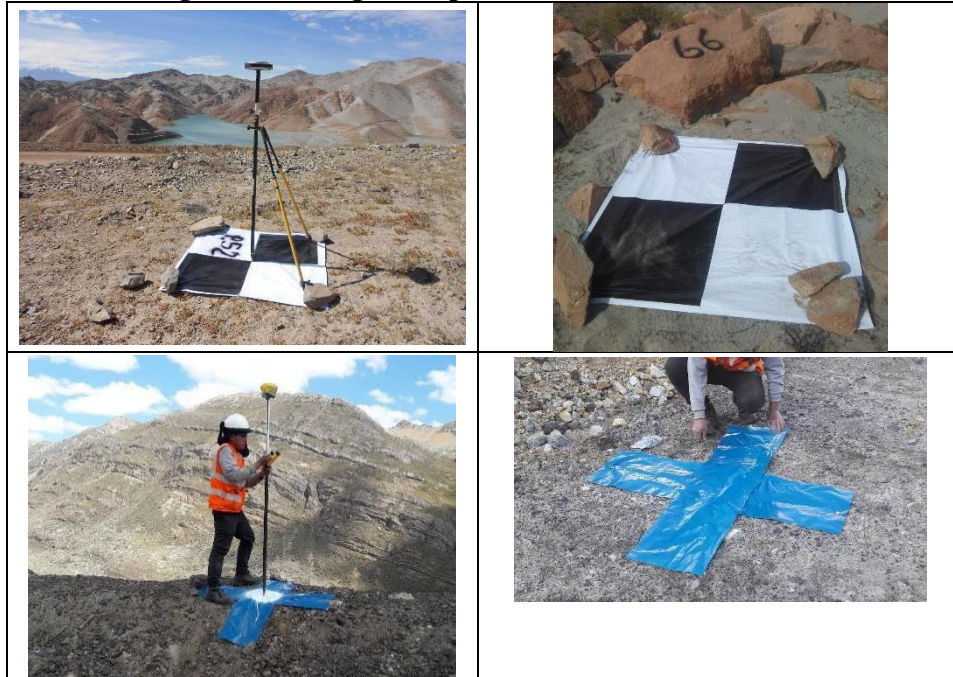
Figura N°33. Toma de medidas de puntos de apoyo fotogramétrico con receptor GNSS.



Fuente: Elaboración propia.

Las marcas a colocar en campo deben ser las adecuadas para poder distinguirlas a la hora del procesamiento fotogramétrico. Las dimensiones de la marca están de acuerdo con la precisión a donde se estima llegar, altura de vuelo y GSD.

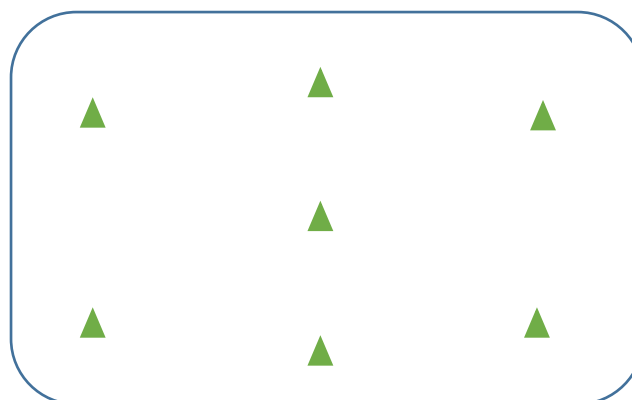
Figura N°34. Algunos tipos de marcas de fotocontrol.



Fuente: Elaboración propia.

La distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétrico (PAF) debe ser la adecuada para que abarque en proporción toda el área de estudio. Por lo general las últimas investigaciones apuntan a que se coloque en los bordes del área de estudio.

Figura N°35. Distribución apropiada para los PAF.

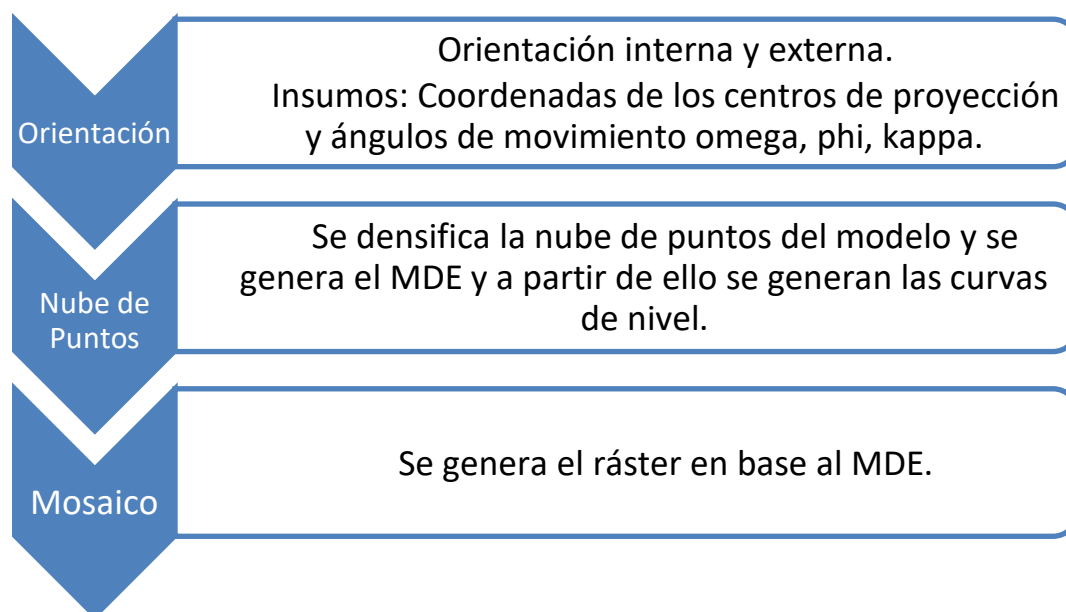


Fuente: Elaboración propia.

2.3.34 PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO

Luego de la planificación de Vuelo y control Terrestre empieza la etapa del procesamiento de los datos capturados, en este caso las imágenes tomadas por el RPAS y en algunos casos un archivo de geolocalización que acompaña al grupo de fotos.

A continuación, se muestra un flujograma del procesamiento que se realiza con las imágenes capturas por el RPAS.



Fuente: Elaboración propia.

3 CAPÍTULO III: MARCO METODOLÓGICO

De acuerdo con el autor Carrasco Díaz S. (2014) en su libro “Metodología de la Investigación Científica”, se determina el Tipo, Nivel, Diseño y enfoque del presente trabajo de investigación.

3.1 TIPO DE INVESTIGACIÓN

Se realiza una investigación de tipo aplicada ya que se pretende dar a conocer el grado de precisión de los productos cartográficos a partir de técnicas de Fotogrametría con RPAS y métodos directos observados en campo.

3.2 NIVEL DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es de nivel explicativo ya que se explica y demuestra los diferentes rangos de precisión que podemos obtener utilizando técnicas de referenciación directa e indirecta de fotogrametría con RPAS frente a tecnología consolidadas de alta precisión como Levantamientos GNSS – RTK, en distintos casos de uso.

3.3 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Según Hernández, Fernández y Baptista “La investigación no experimental es la que se realiza sin manipular deliberadamente las variables, este proyecto de Investigación presenta un diseño no experimental transversal.

No experimental porque observa el fenómeno tal y como se da en su contexto natural, sin manipular las variables. No obstante, se ha evaluado y analizado el comportamiento de estas y su tipo de aplicación según sea el caso de estudio. Transversal porque el análisis y trabajos de campo se realizaron en un momento determinado del tiempo, esto se efectúa con el propósito de describir las variables y analizar su incidencia e interrelación en un momento dado.

3.4 ENFOQUE DE INVESTIGACIÓN

De acuerdo con Hernández Sampieri, R., Mendoza Torres C. (2018) en su libro “Metodología de la Investigación: Rutas cuantitativa, cualitativa y mixta”, se ha determinado el enfoque de esta investigación.

El enfoque de este estudio es cuantitativo desde la perspectiva de Fotogrametría con RPAS y levantamientos con métodos directos porque se han realizado diversas mediciones en campo con el objetivo de cuantificar los errores permisibles.

El enfoque cuantitativo utiliza la recolección y análisis de datos para responder y probar una hipótesis establecida previamente. Es secuencial y probatorio, su orden es riguroso, pero ciertamente podemos redefinir alguna etapa.

En conclusión, el presente estudio es de tipo aplicativo, nivel explicativo, diseño no experimental y presenta un enfoque cuantitativo.

3.5 PLANEAMIENTO Y SOPORTE TÉCNICO.

Este estudio analizará los resultados finales del producto cartográfico, utilizando un software ajeno al software de fotogrametría. Se analizará la ortofoto en la planimetría (X, Y) y el MDT (COTA) en la altimetría. Para la verificación del desfase horizontal se utilizará un software comercial para la Ingeniería, Autocad Civil 3D y para los desfases de la cota se utilizará el modelo digital de elevación. Con esto se pretende un análisis más real y fiable ya que desestimaremos los indicadores de precisión del Software de Fotogrametría, que podrían ser

Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología con GNSS – RTK.

propios del ajuste matemático en la fotogrametría, pero no indicar de manera real la precisión en campo.

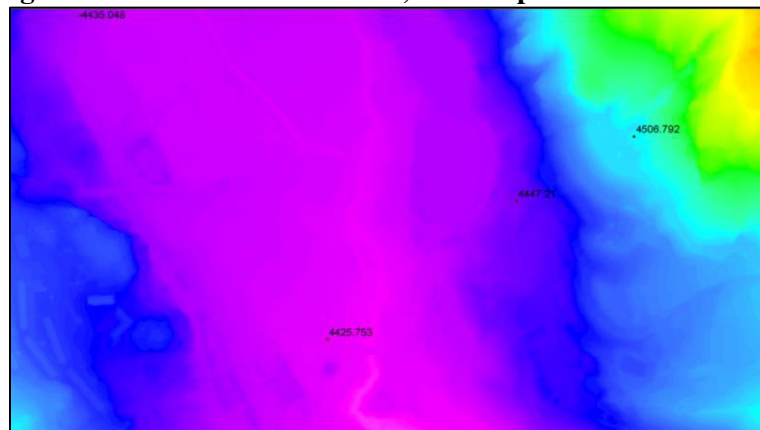
El software de fotogrametría que se utilizará en el presente estudio es el Agisoft Metashape.

Figura N°36. Desfase planimétrico; ortofoto – punto en Civil 3D.



Fuente: Elaboración propia

Figura N°37. Desfase altimétrico; MDT – punto de verificación.



Fuente: Elaboración propia

3.6 PRIMERA EVALUACIÓN: DETERMINAR LA MEJOR DISTRIBUCIÓN DE PAF EN FUNCIÓN A LA FORMA DEL ÁREA DE ESTUDIO.

3.6.1 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO.

En este primer análisis determinaremos la mejor distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la forma del área de estudio. Las características son las siguientes:

ÁREA: 140 Hectáreas

PENDIENTE PROMEDIO: 60.4%

DISTRIBUCIÓN DE LOS PAF: Se analizarán 04 distribuciones de puntos de apoyo fotogramétrico (PAF) y se asignarán los siguientes nombres:

- A. Distribución en los bordes externos del área de estudio: tomará el nombre abreviado de PAF Bordes externos.
- B. Distribución acomodándose al perímetro del área de estudio: tomará el nombre abreviado de PAF Perimetral.
- C. Distribución en los bordes externos del área de estudio con punto céntrico: tomará el nombre abreviado de PAF Bordes – punto céntrico.
- D. Distribución acomodándose al perímetro del área de estudio con punto céntrico: tomará el nombre abreviado de PAF Perimetral – punto céntrico.

CANTIDAD DE PUNTOS DE APOYO FOTOGRAFÉTRICO: En total se colocaron 18 Puntos de Apoyo Fotogramétrico en el área de estudio.

SOPORTE TÉCNICO: Se utilizó un RPAS de la marca DJI Phantom 4 con una cámara de sensor CMOS de 12 Megapíxeles de Resolución, tal y como se produce de fábrica. Se utiliza la aplicación de vuelo Precisión Flight for DJI.

GSD PROMEDIO: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 7cm/Pix.

3.6.2 CONTROL GEODÉSICO.

Como punto base para la distribución de puntos de apoyo fotogramétrico se utilizó un punto geodésico de Orden C denominado PC07, establecido con técnica diferencial en post proceso GNSS. La lectura del Punto fue de aproximadamente 07 horas y se enlazó a la Estación de Rastreo Permanente JU01 ubicada en el distrito de Tambo, provincia de Huancayo y departamento de Junín.

Para la obtención de la Cota respecto al Nivel del mar se utilizó el modelo de Gravedad Terrestre 2008 (EGM-2008). Para el procesamiento de este punto se utilizó el Software de Postproceso GNSS Onpoz Ezsurv.

A continuación, se detalla la descripción monográfica del punto PC07.

Figura N°38. Punto base para la distribución de los PAF.

Figura N° 001 Punto base para la distribución de los TTA.			
DESCRIPCIÓN MONOGRÁFICA			
NOMBRE PC07	CÓDIGO PC07	LOCALIDAD YAUJI	ESTABLECIDA POR: SOLUCIONES GEOGRÁFICAS JJ S.A.C
UBICACIÓN: PUCAURCO		CARACTERÍSTICAS DE LA MARCA: Placa de bronce donde está inscrito PC 07	
LATITUD (S) WGS-84 11° 44' 39.73394" S	LONGITUD (W) WGS-84 76° 01' 19.73385" W	NORTE (N) WGS-84 8701510.876	ESTE (E) WGS-84 388620.668
ALTURA ELIPSOIDAL 4797.070		ELEVACIÓN (EGM-08) 4765.751	ZONA UTM 18S
ORDEN DEL PUNTO ORDEN "C"			
CROQUIS TOPOGRÁFICO		  IMAGEN DE RASTREO DE ANTENA IMAGEN DEL DISCO 	
DESCRIPCIÓN El Punto PC07 , está ubicado en la zona de PUCAURCO. El monumento es un hito de concreto, sobre este lleva una placa de bronce de 8cm de diámetro, donde lleva inscrito el nombre del punto PC07 .			
DESCRITA POR: HÉCTOR VERGARA URIBE	REVISADO POR: JESUS HUAYHUA	JEFE PROYECTO: JOSE OROPEZA JULCARIMA	FECHA: 12 de septiembre del 2018

Fuente: Elaboración propia

3.6.3 ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN DE PAF

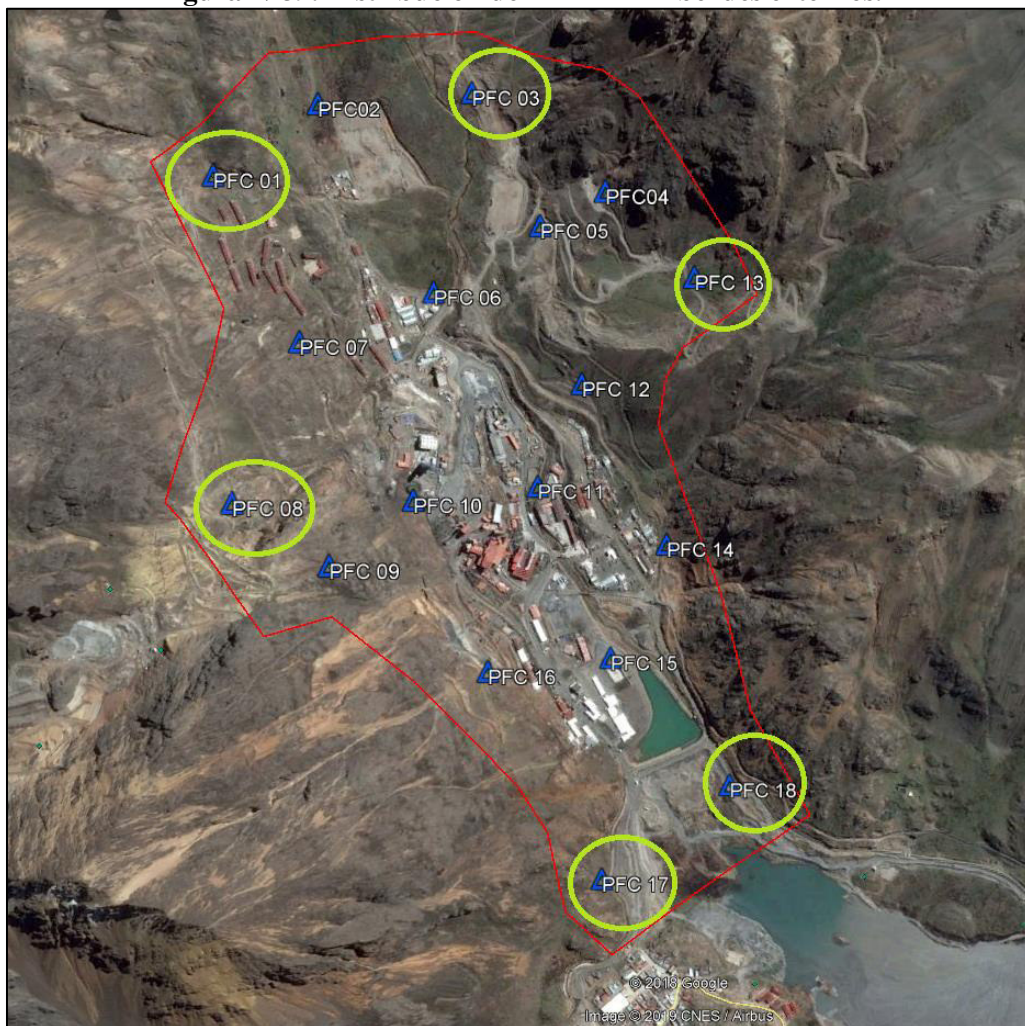
GSD Promedio: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 7cm/Pix y finalizado el procesamiento el GSD Promedio fue de 6.7 cm/ Pix.

Traslape longitudinal y transversal: Para este vuelo se utiliza un traslape longitudinal de 70% y transversal de 68%.

3.6.3.1PAF BORDES EXTERNOS

Para este análisis utilizaremos en la aerotriangulación 6 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros 12 puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico en el software.

Figura N°39. Distribución de PAF – PAF bordes externos.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

Tabla N°11. Desfase planimétrico – PAF bordes externos (6).

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA (X,Y)	PROMEDIO
PAF02	0.2441	1.077	1.104315992	1.1031469
	0.2764	1.0651	1.100379466	
	0.2322	1.0857	1.110252823	
	0.2308	1.0731	1.097639399	
PAF 07	0.0014	0.0857	0.085711434	0.092937
	0.0039	0.0997	0.09977625	
	0.0244	0.0947	0.097792893	
	0.0199	0.0862	0.088467226	
PAF 06	0.4524	1.0882	1.178492681	1.1850922
	0.4469	1.0954	1.183055692	
	0.4336	1.1039	1.186003444	
	0.4131	1.119	1.19281709	
PAF 05	0.2326	0.6216	0.663693694	0.6647742
	0.2284	0.6348	0.674638866	
	0.2099	0.6251	0.659399742	
	0.2065	0.6283	0.661364604	
PAF04	0.0283	0.7124	0.712961885	0.711879
	0.0247	0.718	0.718424728	
	0.0057	0.7102	0.710222873	
	0.003	0.7059	0.705906375	
PAF 12	0.8895	1.0429	1.370711735	1.3792927
	0.9184	1.0414	1.388514501	
	0.8923	1.0489	1.37709495	
	0.8996	1.0476	1.380849709	
PAF 11	1.3275	1.1116	1.731447605	1.7179125
	1.3145	1.0754	1.698350791	
	1.3248	1.1005	1.722264582	
	1.3219	1.0998	1.719587058	
PAF 10	0.2778	0.9166	0.957772624	0.9629812
	0.2941	0.9175	0.963483814	
	0.2763	0.9099	0.950925707	
	0.2721	0.9412	0.979742747	
PAF 09	1.3408	0.6903	1.508064564	1.5055853
	1.3362	0.6797	1.499140597	
	1.3445	0.6879	1.510260461	
	1.3449	0.6752	1.504875759	
PAF 16	0.2498	1.4717	1.492749453	1.5447879
	0.2281	1.5471	1.563824805	
	0.2357	1.5768	1.594318892	
	0.2552	1.5068	1.52825825	
PAF 15	0.8835	0.6017	1.068931775	1.0533357
	0.8699	0.5847	1.04814126	
	0.8789	0.5836	1.055013825	
	0.8669	0.5768	1.0412559	
PAF 14	0.9971	0.786	1.269647357	1.2713666
	0.9951	0.7783	1.263319002	
	1.0026	0.7873	1.274773725	
	0.9916	0.8058	1.277726183	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.10m hasta 1.72 m con el ajuste de 6 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Bordes – externos.

Desfase promedio (Planimetría): **1.10 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (4)$$

$$d = 0.451 \text{ m}$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.451**metros.

Ahora se analizará el desfase altimétrico, obteniéndose los siguientes valores:

Tabla N°12. Desfase altimétrico – PAF bordes externos (6).

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE COTA	PROMEDIO	DESV. ESTÁNDAR
PAF02	1.10314692	0.613918	10.456	6.245
PAF 07	0.092936951	11.239211		
PAF 06	1.185092227	14.052316		
PAF 05	0.664774227	7.422402		
PAF04	0.711878965	3.410148		
PAF 12	1.379292724	13.075297		
PAF 11	1.717912509	20.58641		
PAF 10	0.962981223	16.202492		
PAF 09	1.505585345	0.468367		
PAF 16	1.54478785	12.003695		
PAF 15	1.05333569	13.33809		
PAF 14	1.271366567	13.06018		

Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **6.245** metros.

3.6.3.2 PAF PERIMETRAL

Para este análisis utilizaremos en la aerotriangulación 11 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros 7 puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°40. Distribución de PAF – PAF perimetral.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase en los 7 puntos de chequeo.

Tabla N°13. Desfase planimétrico – PAF perimetral (11).

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA (X, Y)	PROMEDIO
PAF 02	0.1825	0.1963	0.268029737	0.272537664
	0.1871	0.1877	0.265023961	
	0.1845	0.2036	0.274760277	
	0.183	0.215	0.282336678	
PAF 07	0.1408	0.1569	0.210813306	0.216701945
	0.1352	0.159	0.208710421	
	0.1511	0.1556	0.216892992	
	0.161	0.1648	0.230391059	
PAF 06	0.067	0.075	0.100568385	0.102223223
	0.039	0.0668	0.077351406	
	0.08	0.085	0.116726175	
	0.077	0.0844	0.114246926	
PAF05	0.1836	0.1465	0.234885525	0.23423019
	0.1588	0.1344	0.208040381	
	0.1961	0.1648	0.256152786	
	0.1922	0.1401	0.237842069	
PAF10	0.1424	0.111	0.180551267	0.193194924
	0.1777	0.123	0.216116381	
	0.1699	0.1073	0.200946013	
	0.1383	0.1075	0.175166036	
PAF11	0.082	0.017	0.083743656	0.077363701
	0.0699	0.0097	0.070569824	
	0.0933	0.0105	0.093888977	
	0.0599	0.0128	0.061252347	
PAF15	0.035	0.0039	0.035216615	0.019746113
	0.0232	0.007	0.024233035	
	0.0115	0.0031	0.0119105	
	0.0073	0.0022	0.007624303	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.02 m hasta 0.273 m con el ajuste de 11 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF perimetral.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.159 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (5)$$

$$d = 0.093 \text{ m}$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.093 metros.**

Ahora se analizará el desfase altimétrico, obteniéndose los siguientes valores:

Tabla N°14. Desfase altimétrico – PAF perimetral (11).

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
PAF 02	0.272537664	0.252293	0.726	0.389
PAF 07	0.216701945	0.843215		
PAF 06	0.102223223	0.86091		
PAF05	0.23423019	0.764199		
PAF10	0.193194924	1.329445		
PAF11	0.077363701	0.832504		
PAF15	0.019746113	0.200484		

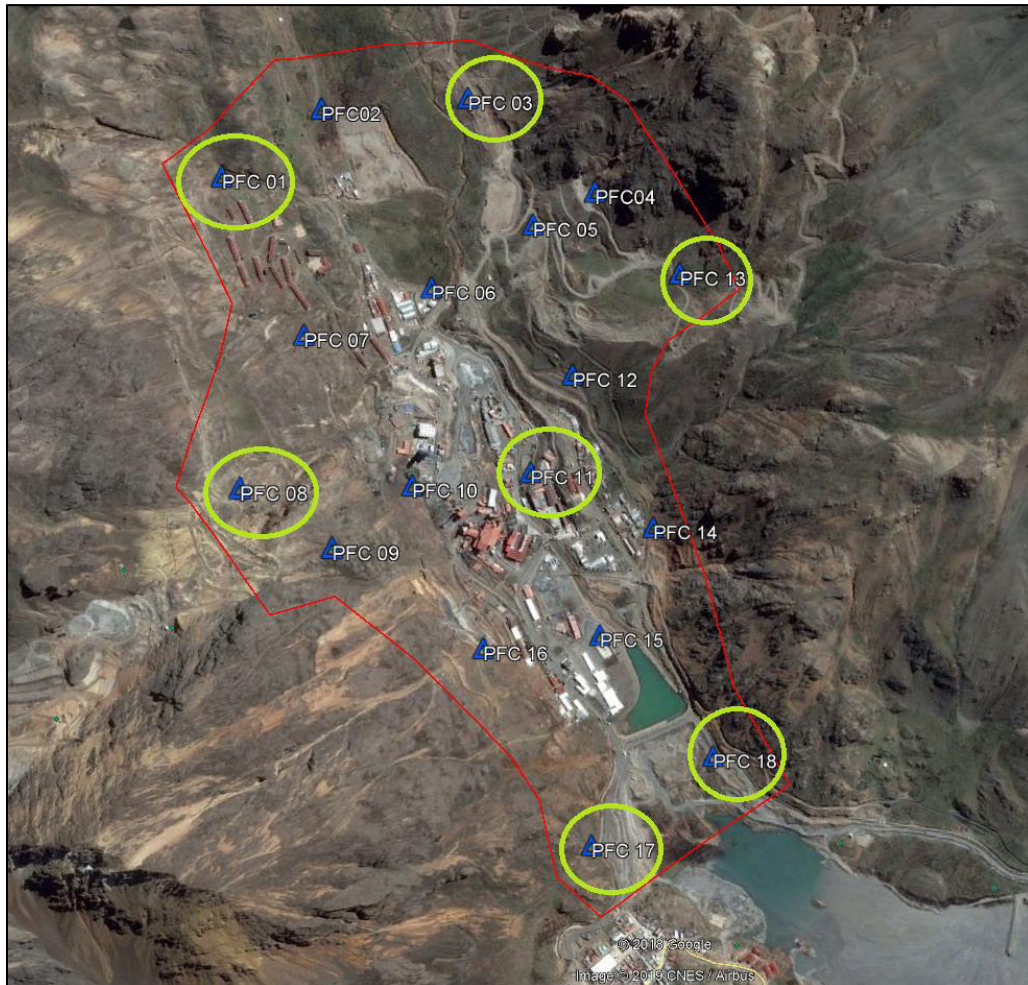
Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.389** metros.

3.6.3.3 PAF Bordes – Punto céntrico.

Para este análisis utilizaremos en la aerotringulación 7 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros 11 puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°41. Distribución de PAF, PAF bordes – punto céntrico.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase en los 11 puntos de chequeo.

Tabla N°15. Desfase planimétrico, PAF bordes -punto céntrico (7).

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA (X, Y)	PROMEDIO
PAF 02	0.3467	0.3646	0.503124289	0.4939665
	0.3248	0.3579	0.483308856	
	0.3268	0.3512	0.479728757	
	0.3571	0.3637	0.509703934	
PAF 07	0.4515	0.3715	0.584691799	0.5909063
	0.4633	0.3731	0.594853343	
	0.4755	0.3701	0.602556437	
	0.4563	0.3605	0.581523809	
PAF 06	0.3782	0.3288	0.501143373	0.4864564
	0.3763	0.3226	0.495653558	
	0.3472	0.3125	0.467123206	
	0.3698	0.309	0.481905634	
PAF 05	0.211	0.2121	0.29917789	0.2921159
	0.2157	0.2066	0.298680515	
	0.1999	0.2148	0.293426396	
	0.1898	0.202	0.277178715	
PAF 04	0.1368	0.3335	0.360467044	0.3567082
	0.1284	0.3343	0.358110388	
	0.1395	0.3279	0.356340652	
	0.1383	0.3236	0.351914549	
PAF 12	0.202	0.3188	0.37740885	0.3702751
	0.1958	0.3243	0.378824669	
	0.1884	0.3104	0.363101529	
	0.1843	0.3113	0.361765366	
PAF 10	0.3441	0.4146	0.538793068	0.546192
	0.3487	0.4234	0.548506381	
	0.3643	0.4131	0.550786801	
	0.3607	0.4108	0.546681928	
PAF 09	0.935	0.1509	0.947098627	0.9412827
	0.9301	0.1476	0.941738695	
	0.9295	0.1483	0.94125615	
	0.9226	0.152	0.935037304	
PAF 16	0.3027	1.546	1.575354973	1.6113537
	0.3399	1.5887	1.624653717	
	0.314	1.5961	1.626693336	
	0.332	1.5843	1.618712603	
PAF 15	0.5598	0.9907	1.137920265	1.1413408
	0.5634	1.0009	1.148573189	
	0.5598	0.979	1.12774866	
	0.5684	1.001	1.151121001	
PAF 14	0.8008	0.3473	0.872867647	0.8716729
	0.7974	0.3581	0.874118053	
	0.7941	0.3546	0.869675784	
	0.7948	0.3539	0.870030028	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.292 m hasta 1.611 m con el ajuste de 7 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Bordes - puntos céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.70 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d_f = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (6)$$

$$d_f = 0.404$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.404** metros.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°16. Desfase altimétrico, PAF bordes -punto céntrico (7).

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
PAF 02	0.493966459	0.067723	1.0845174	0.936236445
PAF 07	0.590906347	0.985793		
PAF 06	0.486456443	0.027762		
PAF 05	0.292115879	0.713828		
PAF 04	0.356708158	2.30175		
PAF 12	0.370275103	1.393453		
PAF 10	0.546192044	0.13198		
PAF 09	0.941282694	2.939836		
PAF 16	1.611353657	1.698453		
PAF 15	1.141340779	0.97441		
PAF 14	0.871672878	0.694703		

Fuente: Elaboración propia

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.936** metros.

3.6.3.4PAF Perimetral – Punto céntrico.

Para este análisis utilizaremos en la aerotringulación 12 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros 6 puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°42. Distribución de PAF, PAF perimetral – punto céntrico.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase en los 6 puntos de chequeo.

Tabla N°17. Desfase planimétrico, PAF perimetral-punto céntrico (12).

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA (X,Y)	PROMEDIO
PAF 02	0.1638	0.2372	0.288260785	0.280333168
	0.1338	0.2283	0.264619217	
	0.1695	0.236	0.290561956	
	0.161	0.2265	0.277890716	
PAF 07	0.1065	0.1281	0.166588895	0.172217893
	0.1151	0.1349	0.177330257	
	0.1238	0.1318	0.180824998	
	0.111	0.1209	0.16412742	
PAF06	0.0408	0.0549	0.068400658	0.083443869
	0.0501	0.0801	0.094477616	
	0.0493	0.0727	0.087839513	
	0.0383	0.0737	0.083057691	
PAF05	0.1739	0.0781	0.190632683	0.188700513
	0.1872	0.0834	0.204937551	
	0.136	0.0956	0.166238864	
	0.1748	0.0818	0.192992953	
PAF10	0.1149	0.2038	0.233958223	0.242028593
	0.1091	0.2196	0.245208014	
	0.1205	0.2128	0.244548748	
	0.1235	0.2109	0.244399386	
PAF15	0.0039	0.0526	0.052744384	0.052839963
	0.009	0.0596	0.0602757	
	0.0201	0.0441	0.048464626	
	0.0103	0.0488	0.049875144	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.053 m hasta 0.28 m con el ajuste de 12 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.17 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}$$

$$d = 0.088$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.088 metros**.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°18. Desfase altimétrico, PAF perimetral -punto céntrico (12).

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTANDAR
PAF 02	0.280333168	0.231785	0.32829767	0.179212108
PAF 07	0.172217893	0.212844		
PAF06	0.083443869	0.123117		
PAF05	0.188700513	0.339883		
PAF10	0.242028593	0.613137		
PAF15	0.052839963	0.44902		

Fuente: Elaboración propia

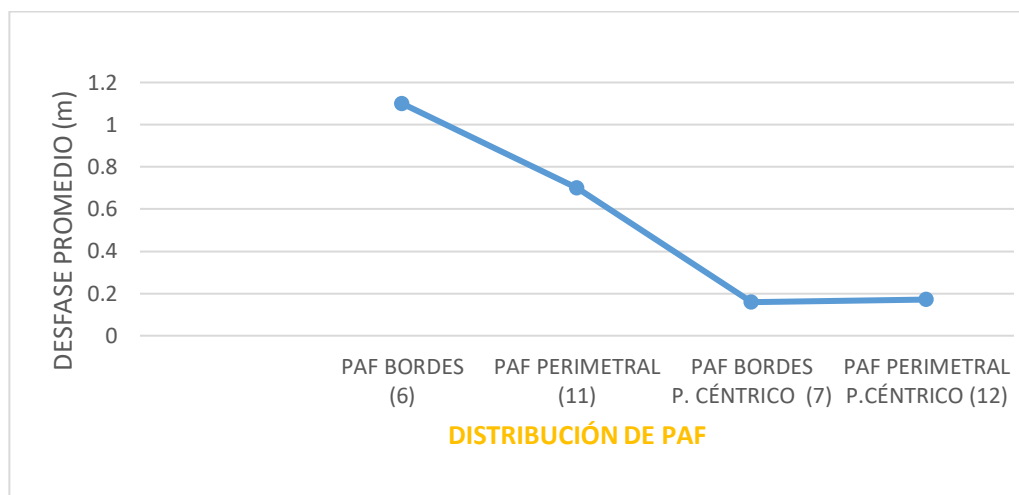
Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.179** metros.

3.6.4 ANÁLISIS INTEGRAL

En base al desarrollo del análisis se presentará la información mediante gráficos para una mejor perspectiva del estudio, y en primer lugar reflejaremos el análisis planimétrico.

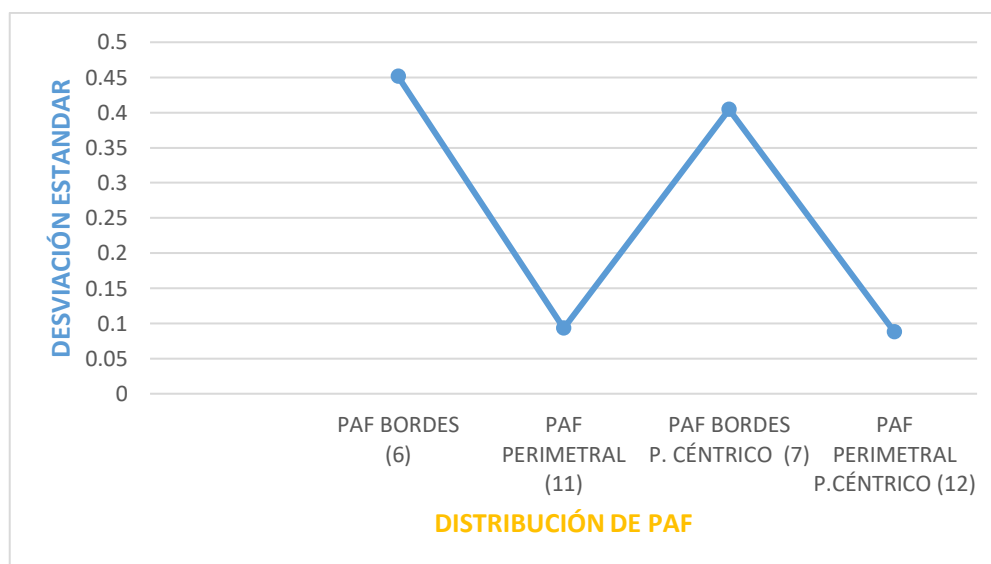
A continuación, se presentará las gráficas de este primer análisis planimétrico que busca determinar la mejor distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la forma del área de estudio. Las características son las siguientes:

Gráfico N°01. Desfase promedio (x, y) vs distribución de PAF.



Fuente: Elaboración propia

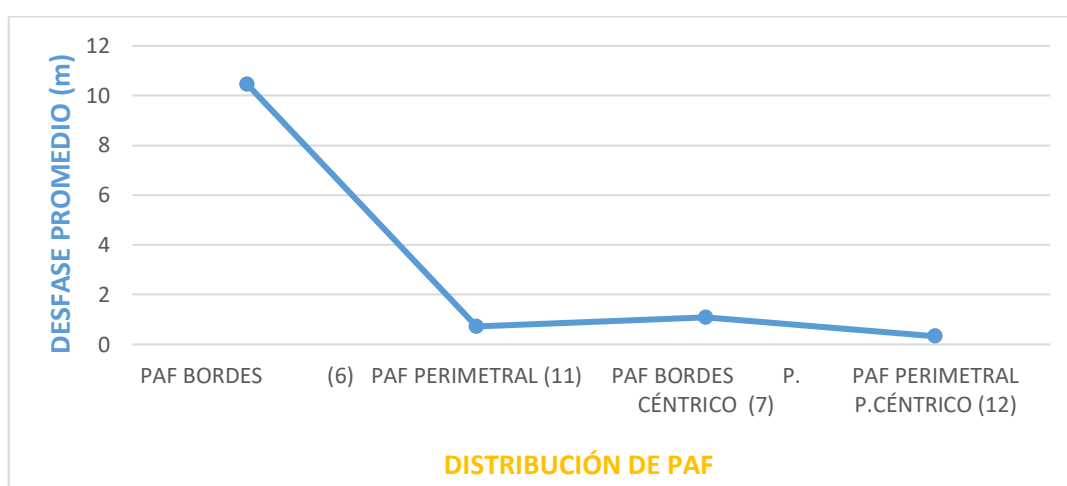
Gráfico N°02. Desviación estándar (x, y) vs distribución de PAF.



Fuente: Elaboración propia

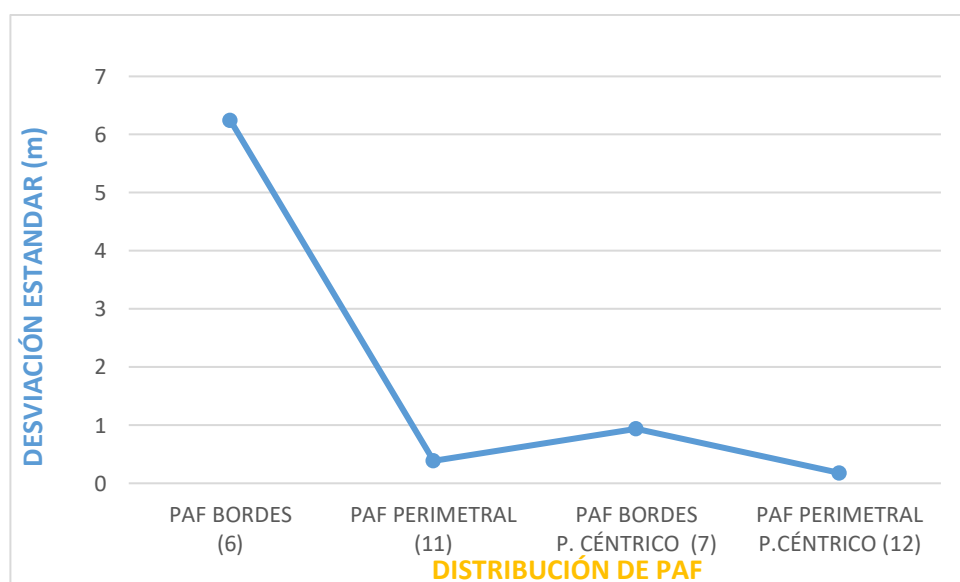
A continuación, se presentará las gráficas de este primer análisis altimétrico que busca determinar la mejor distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la forma del área de estudio. Las características son las siguientes:

Gráfico N° 03. Desfase promedio (z) vs distribución de PAF.



Fuente: Elaboración propia

Gráfico N°04. Desviación estándar (z) vs distribución de PAF.



Fuente: Elaboración propia

Como podemos observar en el primer gráfico (Gráfico N° 01), las distribuciones PAF Bordes con punto céntrico y PAF Perimetral con punto céntrico presentan desfases promedio (x, y) de 0.159 y 0.17 m respectivamente, lo que inicialmente llevaría a pensar que la mejor elección sería PAF Bordes con punto céntrico. Pero analizando la desviación estándar (Gráfico N°02) notamos una gran ventaja por la distribución PAF Perimetral con punto céntrico cuyo valor es de 0.08 m, notando a la desviación estándar como el indicador idóneo para la uniformidad del modelo.

En el desfase promedio altimétrico, la distribución PAF Perimetral con punto céntrico es la mejor elección con un valor de 0.328 m y una desviación estándar de 0.179 m.

Este primer análisis determina a la distribución PAF Perimetral con punto céntrico como la mejor para Puntos de Apoyo Fotogramétrico en vuelos con RPAS. Notamos el gran valor, sobre todo para la cota, de los puntos colocados al centro del modelo. De igual manera identificamos a la desviación estándar como un indicador de uniformidad en todo el modelo fotogramétrico, asimismo notamos que las precisiones alcanzadas no solo dependerán de la cantidad de puntos sino también de su distribución.

Con este primer análisis finalizado faltaría determinar la óptima cantidad de Puntos de Apoyo Fotogramétrico para un área cuyo parámetro principal será su dimensión en Hectáreas ya que en función a esta se estiman las operaciones y logística de un Levantamiento Fotogramétrico con RPAS.

3.7 SEGUNDA EVALUACIÓN: DETERMINAR LA POSIBLE CANTIDAD DE PUNTOS DE APOYO FOTOGAMÉTRICO RESPECTO A LAS DIMENSIONES DEL ÁREA DE ESTUDIO.

3.7.1 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

En este segundo análisis determinaremos la óptima cantidad de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la dimensión del área de estudio. Las características son las siguientes:

ÁREA: 60 Hectáreas

PENDIENTE PROMEDIO: 34.6%

DISTRIBUCIÓN DE LOS PAF: Se analizarán 03 distribuciones con el régimen anterior seleccionado (Perimetral con punto céntrico) y se variará la cantidad de Puntos de Apoyo Fotogramétrico para estimar la cantidad óptima:

- A. Distribución Perimetral - punto céntrico con 5 Puntos de Apoyo Fotogramétrico, en adelante 5 PAF.
- B. Distribución Perimetral - punto céntrico con 6 Puntos de Apoyo Fotogramétrico, en adelante 6 PAF.

- C. Distribución Perimetral - punto céntrico con 7 Puntos de Apoyo Fotogramétrico, en adelante 7 PAF.
- D. Distribución Perimetral - punto céntrico con 8 Puntos de Apoyo Fotogramétrico, en adelante 8 PAF.

CANTIDAD DE PUNTOS DE APOYO FOTOGRAFÉTICO: En total se colocaron 27 Puntos de Apoyo Fotogramétrico para el control y verificación en planimetría y altimetría, y 03 Puntos adicionales para el control altimétrico, en total una muestra de 30.

SOPORTE TÉCNICO: Se utilizó un RPAS de la marca DJI Phantom 4 con una cámara de sensor CMOS de 12 Megapíxeles de Resolución, tal y como produce el fabricante. Se utiliza la aplicación de vuelo Precisión Flighth for DJI.

GSD PROMEDIO: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 4cm/Pix, finalizado el vuelo se obtuvo 3.7 cm/Pix.

3.7.2 CONTROL GEODÉSICO.

Como punto base para la distribución de Puntos de Apoyo Fotogramétrico se utilizó un Punto de apoyo Topográfico denominado PC01, establecido con técnica GNSS de Posicionamiento por Punto Preciso. La lectura del Punto fue de aproximadamente cuatro horas y media, y se procesó con orbita y reloj preciso de calidad Final.

Para la obtención de la Cota respecto al Nivel del mar se utilizó el modelo de Gravedad Terrestre 2008 (EGM-2008). Para el procesamiento de este punto se utilizó el Software de Postproceso GNSS Onpoz Ezsurv.

Figura N°43. Punto de control PC 01 – Alto Bujama

<u>DESCRIPCIÓN MONOGRÁFICA</u>			
NOMBRE PC01	CÓDIGO PC01	LOCALIDAD MALA	ESTABLECIDA POR: SOLUCIONES GEOGRÁFICAS JJ S.A.C
UBICACIÓN: ALTO BUJAMA		CARACTERÍSTICAS DE LA MARCA: Clavo de acero con marca central.	
LATITUD (S) WGS-84 -12.725475868 ° S	LONGITUD (W) WGS-84 -76.624002854° W	NORTE (N) WGS-84 8592672.001	ESTE (E) WGS-84 323677.899
ALTURA ELIPSOIDAL 67.819		ELEVACIÓN (EGM-08) 42.962	ZONA UTM 18S
ORDEN DEL PUNTO PUNTO DE APOYO TOPOGRÁFICO			
CROQUIS TOPOGRÁFICO		IMAGEN DE RASTREO DE ANTENA	
			
		IMAGEN DEL DISCO	
			
DESCRIPCIÓN			
El Punto PC01 , se encuentra dentro de la residencial Alto bujama, en el mirador. El monumento es un clavo de acero que lleva una marca central.			
DESCRITA POR: HÉCTOR VERGARA URIBE	REVISADO POR: JOSE OROPEZA JULCARIMA	JEFE PROYECTO: JOSE OROPEZA JULCARIMA	FECHA: 05 de enero del 2019

Fuente: Elaboración propia

3.7.3 ANÁLISIS DE LA CANTIDAD DE PAF

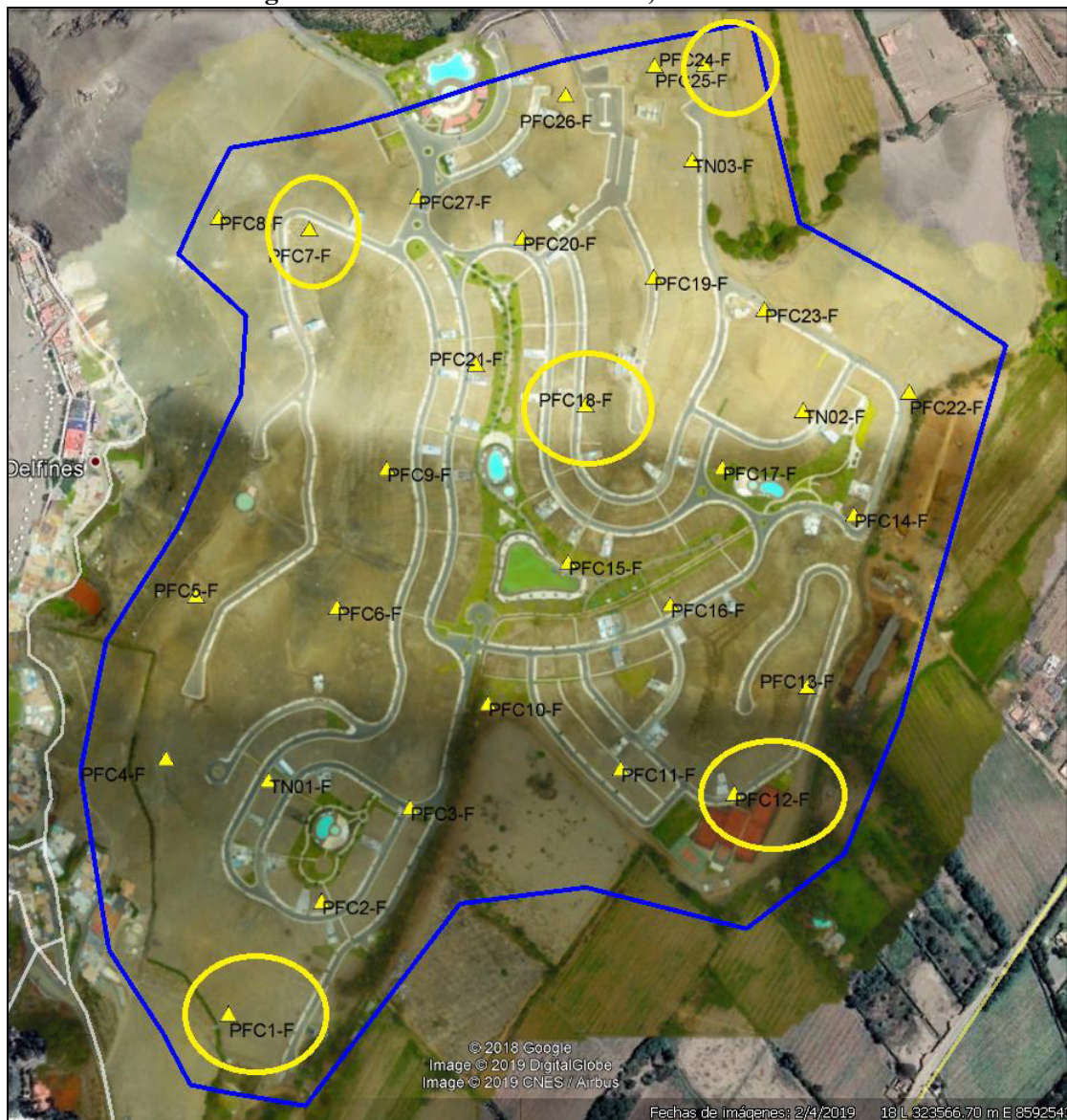
GSD Promedio: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 4 cm/Pix y finalizado el procesamiento el GSD Promedio fue de 3.8 cm/ Pix.

Traslape longitudinal y transversal: Para este vuelo se utiliza un traslape longitudinal de 70% y transversal de 68%.

3.7.3.1 DISTRIBUCIÓN 5 PAF.

En este apartado utilizaremos en la aerotriangulación 5 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°44. Distribución de PAF, 5 PAF – 60 ha.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase en los puntos de chequeo.

Tabla N°19. Desfase planimétrico, 5 PAF.

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA	PROMEDIO
4(PAF 4)	0.1478	0.319	0.351576222	0.349998283
	0.1572	0.3184	0.355092101	
	0.1463	0.3149	0.347225719	
	0.1553	0.3093	0.34609909	
2 (PAF 2)	0.0059	0.1663	0.166404627	0.16178504
	0.0027	0.1638	0.163822251	
	0.01	0.1611	0.161410068	
	0.0125	0.155	0.155503215	
3 (PAF 3)	0.0221	0.1366	0.13837619	0.141330961
	0.0236	0.1452	0.147105404	
	0.0152	0.1362	0.13704554	
	0.0119	0.1423	0.142796709	
11 (PAF11)	0.0021	0.1607	0.160713721	0.163951911
	0.0018	0.1666	0.166609724	
	0.0025	0.1624	0.162419241	
	0.0074	0.1659	0.166064957	
10 (PAF 10)	0.0169	0.1749	0.175714598	0.16012693
	0.0157	0.1557	0.156489552	
	0.0016	0.1553	0.155308242	
	0.0054	0.1529	0.152995327	
13 (PAF 13)	0.0328	0.1313	0.135334881	0.14135664
	0.0314	0.1358	0.139382926	
	0.0344	0.151	0.154868848	
	0.0352	0.1312	0.135839906	
6 (PAF 6)	0.037	0.1615	0.165684188	0.161893706
	0.0305	0.1542	0.157187436	
	0.0307	0.1554	0.158403441	
	0.038	0.1619	0.166299759	
5 (PAF 5)	0.2309	0.2643	0.35095484	0.356289226
	0.2392	0.2743	0.363946603	
	0.2365	0.2693	0.358405831	
	0.231	0.2654	0.351849627	
16 (PAF 16)	0.0122	0.0956	0.096375308	0.090340072
	0.0181	0.0853	0.087199197	
	0.0119	0.0839	0.084739719	
	0.0091	0.0926	0.093046064	

15 (PAF15)	0.0044	0.0637	0.063851781	0.063480339
	0.0035	0.0648	0.064894453	
	0.0047	0.0631	0.063274798	
	0.0086	0.0613	0.061900323	
14 (PAF14)	0.132	0.1367	0.190028656	0.195128917
	0.1279	0.1359	0.186620524	
	0.1403	0.1495	0.205022779	
	0.1351	0.1459	0.198843707	
17 (PAF17)	0.0143	0.0038	0.014796283	0.021126494
	0.0166	0.0027	0.016818145	
	0.022	0.006	0.022803509	
	0.03	0.0023	0.030088037	
9 (PAF9)	0.0181	0.032	0.036764249	0.043069732
	0.0181	0.0407	0.044543237	
	0.0239	0.032	0.03994008	
	0.0248	0.0446	0.051031363	
21 (PAF21)	0.0178	0.0082	0.019597959	0.01634598
	0.0118	0.0101	0.015532225	
	0.0104	0.0122	0.01603122	
	0.0062	0.0128	0.014222517	
22 (PAF22)	0.3677	0.0546	0.371731691	0.367480805
	0.365	0.0501	0.368422326	
	0.3616	0.0506	0.365123157	
	0.3607	0.0535	0.364646048	
23 (PAF23)	0.045	0.0231	0.050582705	0.057559229
	0.0311	0.0493	0.058289793	
	0.058	0.0332	0.066829933	
	0.0499	0.022	0.054534485	
19 (PAF 19)	0.0139	0.0879	0.088992247	0.088635091
	0.0138	0.0899	0.09095301	
	0.0114	0.0867	0.087446269	
	0.0114	0.0864	0.087148838	
20 (PAF 20)	0.0658	0.055	0.085759198	0.075805452
	0.0603	0.0386	0.071596438	
	0.0673	0.0387	0.077633627	
	0.0572	0.0372	0.068232544	
27 (PAF 27)	0.0754	0.0111	0.076212663	0.073409868
	0.0671	0.005	0.067286031	
	0.0686	0.0114	0.069540779	
	0.0806	0	0.0806	
8 (PAF8)	0.0246	0.0064	0.025418891	0.028186353
	0.0341	0.0088	0.035217183	
	0.0274	0.0055	0.027946556	
	0.024	0.0028	0.024162781	

26 (PAF 26)	0.0518	0.0045	0.051995096	0.050781172
	0.0496	0.0119	0.051007548	
	0.0491	0.0069	0.049582457	
	0.0496	0.0097	0.050539588	
25 (PAF 25)	0.0314	0.0421	0.052520187	0.050449799
	0.024	0.0392	0.045963464	
	0.0296	0.0414	0.050893222	
	0.0213	0.0479	0.052422323	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.016 m hasta 0.367 m con el ajuste de 5 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.13 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (7)$$

$$d = 0.107$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.107 metros**.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°20. Desfase altimétrico, 5 PAF.

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
4(PAF 4)	0.349998283	0.219327	0.12524656	0.12059985
2 (PAF 2)	0.16178504	0.024878		
3 (PAF 3)	0.141330961	0.121505		
11 (PAF11)	0.163951911	0.003298		
10 (PAF 10)	0.16012693	0.013945		
13 (PAF 13)	0.14135664	0.005303		
6 (PAF 6)	0.161893706	0.455428		
5 (PAF 5)	0.356289226	0.443572		
16 (PAF 16)	0.090340072	0.049066		
15 (PAF15)	0.063480339	0.048912		

14 (PAF14)	0.195128917	0.12324
17 (PAF17)	0.021126494	0.051306
9 (PAF9)	0.043069732	0.169783
21 (PAF21)	0.01634598	0.052962
22 (PAF22)	0.367480805	0.175273
23 (PAF23)	0.057559229	0.104805
19 (PAF 19)	0.088635091	0.215445
20 (PAF 20)	0.075805452	0.012959
27 (PAF 27)	0.073409868	0.119592
8 (PAF8)	0.028186353	0.17442
26 (PAF 26)	0.050781172	0.227697
25 (PAF 25)	0.050449799	0.144205
TN01		0.100278
TN02		0.019053
TN03		0.054912

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.003 m hasta 0.455 m con el ajuste de 5 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.125 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (8)$$

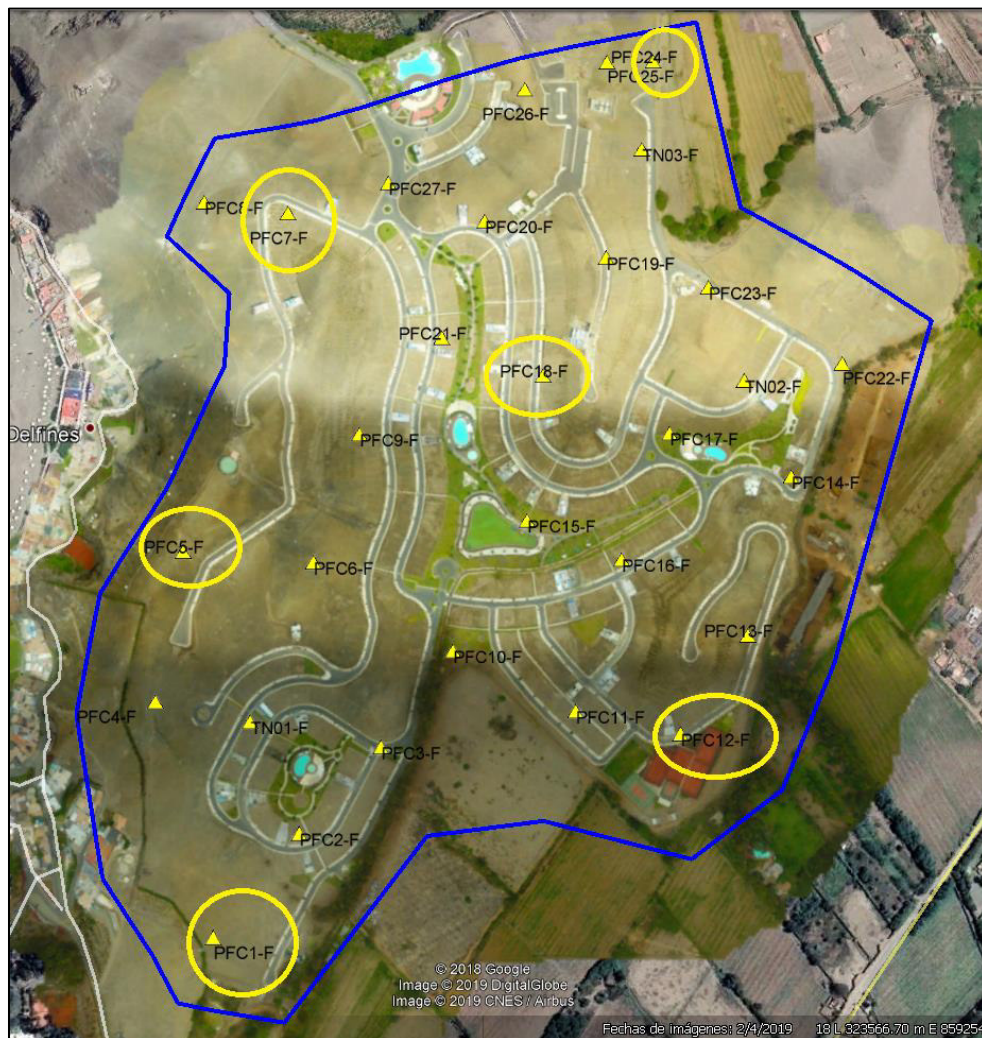
$$d = 0.121$$

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.121** metros.

3.7.3.2DISTRIBUCIÓN 6 PAF.

En este apartado utilizaremos en la aerotringulación 6 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°45. Distribución de PAF, 6 PAF – 60 ha.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase planimétrico de los puntos de chequeo.

Tabla N°21. Desfase planimétrico, 6 PAF.

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA	PROMEDIO
4(PAF 4)	0.0111	0.067	0.067913253	0.06561401
	0.0141	0.0655	0.067000448	
	0.0116	0.0658	0.066814669	
	0.0063	0.0604	0.060727671	
2 (PAF 2)	0.0874	0.1022	0.134475277	0.142546305
	0.1019	0.0992	0.14221199	
	0.1123	0.0954	0.147351451	

	0.1086	0.0978	0.146146502	
3 (PAF 3)	0.0857	0.0454	0.09698273	0.099098036
	0.0865	0.044	0.097047669	
	0.0968	0.0424	0.105678759	
	0.0926	0.0278	0.096682987	
11 (PAF11)	0.0406	0.1056	0.113135848	0.112663692
	0.0289	0.1117	0.115378074	
	0.0308	0.1086	0.112883125	
	0.0341	0.1038	0.109257723	
10 (PAF 10)	0.0411	0.0362	0.054769061	0.063039819
	0.0597	0.03	0.066813846	
	0.0574	0.034	0.066714017	
	0.0572	0.0284	0.063862352	
13 (PAF 13)	0.0532	0.0947	0.108620118	0.101894175
	0.0404	0.0862	0.095197689	
	0.045	0.0913	0.101787475	
	0.0416	0.0931	0.101971418	
6 (PAF 6)	0.0474	0.0238	0.053039608	0.049419446
	0.0375	0.0192	0.042129443	
	0.043	0.0229	0.048717656	
	0.0472	0.0258	0.053791077	
16 (PAF 16)	0.0192	0.0603	0.063282936	0.062311284
	0.0138	0.0625	0.06400539	
	0.0161	0.0657	0.067643921	
	0.0035	0.0542	0.05431289	
15 (PAF15)	0.0397	0.0099	0.040915767	0.039313849
	0.0258	0.0066	0.026630809	
	0.0452	0.0025	0.045269084	
	0.0433	0.01	0.044439734	
14 (PAF14)	0.1313	0.0632	0.145718667	0.159317717
	0.1439	0.0714	0.160639877	
	0.1444	0.0778	0.164024998	
	0.1507	0.0717	0.166887327	
17 (PAF17)	0.0305	0.0158	0.034349527	0.036879213
	0.0373	0.015	0.040203109	
	0.0366	0.0146	0.039404568	
	0.0316	0.0113	0.033559648	
9 (PAF9)	0.0553	0.006	0.055624545	0.048895787
	0.0461	0.0086	0.046895309	
	0.0417	0.0123	0.0434762	
	0.0488	0.0088	0.049587095	
21 (PAF21)	0.0262	0.0197	0.032780024	0.027575824
	0.0215	0.0158	0.026681267	
	0.0185	0.0154	0.024070937	
	0.023	0.0137	0.026771066	
22 (PAF22)	0.3531	0.0178	0.35354837	0.356935884

	0.3617	0.019	0.362198689	
	0.3571	0.0267	0.358096775	
	0.3534	0.0188	0.353899703	
23 (PAF23)	0.0626	0.0082	0.063134776	0.065435272
	0.0699	0.0058	0.070140217	
	0.0668	0.0068	0.067145216	
	0.0613	0.0016	0.061320877	
19 (PAF 19)	0.0071	0.0768	0.077127492	0.074602835
	0.0151	0.0797	0.081117816	
	0.014	0.0687	0.070111982	
	0.0191	0.0674	0.070054051	
20 (PAF 20)	0.0455	0.0563	0.07238743	0.067418199
	0.0358	0.0518	0.062967293	
	0.0293	0.0605	0.067221574	
	0.0325	0.0587	0.067096498	
27 (PAF 27)	0.0559	0.018	0.05872657	0.058525168
	0.0501	0.0278	0.05729616	
	0.0524	0.0272	0.05903897	
	0.0524	0.0272	0.05903897	
8 (PAF8)	0.0218	0.0171	0.027706497	0.022619744
	0.0178	0.0082	0.019597959	
	0.0223	0.0051	0.022875751	
	0.0202	0.002	0.020298768	
26 (PAF 26)	0.0359	0.0182	0.040249845	0.038933887
	0.0361	0.0198	0.041173414	
	0.0354	0.0192	0.040271578	
	0.0271	0.0206	0.034040711	
25 (PAF 25)	0.0536	0.0739	0.091291675	0.088512616
	0.0326	0.0767	0.083340566	
	0.0401	0.0814	0.090741225	
	0.034	0.0819	0.088676998	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.023 m hasta 0.357 m con el ajuste de 6 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.085** m

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d_f = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (9)$$

$$d_f = 0.072$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.072** metros.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°22. Desfase altimétrico, 6 PAF.

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
4(PAF 4)	0.06561401	0.148891	0.08809775	0.07300906
2 (PAF 2)	0.142546305	0.079995		
3 (PAF 3)	0.099098036	0.037472		
11 (PAF11)	0.112663692	0.015732		
10 (PAF 10)	0.063039819	0.039992		
13 (PAF 13)	0.101894175	0.097117		
6 (PAF 6)	0.049419446	0.193965		
16 (PAF 16)	0.062311284	0.062236		
15 (PAF15)	0.039313849	0.072101		
14 (PAF14)	0.159317717	0.05774		
17 (PAF17)	0.036879213	0.012296		
9 (PAF9)	0.048895787	0.017952		
21 (PAF21)	0.027575824	0.057937		
22 (PAF22)	0.356935884	0.055735		
23 (PAF23)	0.065435272	0.048545		
19 (PAF 19)	0.074602835	0.181742		
20 (PAF 20)	0.067418199	0.032616		
27 (PAF 27)	0.058525168	0.040433		
8 (PAF8)	0.022619744	0.061829		
26 (PAF 26)	0.038933887	0.324098		
25 (PAF 25)	0.088512616	0.140627		
TN01		0.177055		
TN02		0.084562		
TN03		0.073678		

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.012 m hasta 0.324 m con el ajuste de 6 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.088 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (10)$$

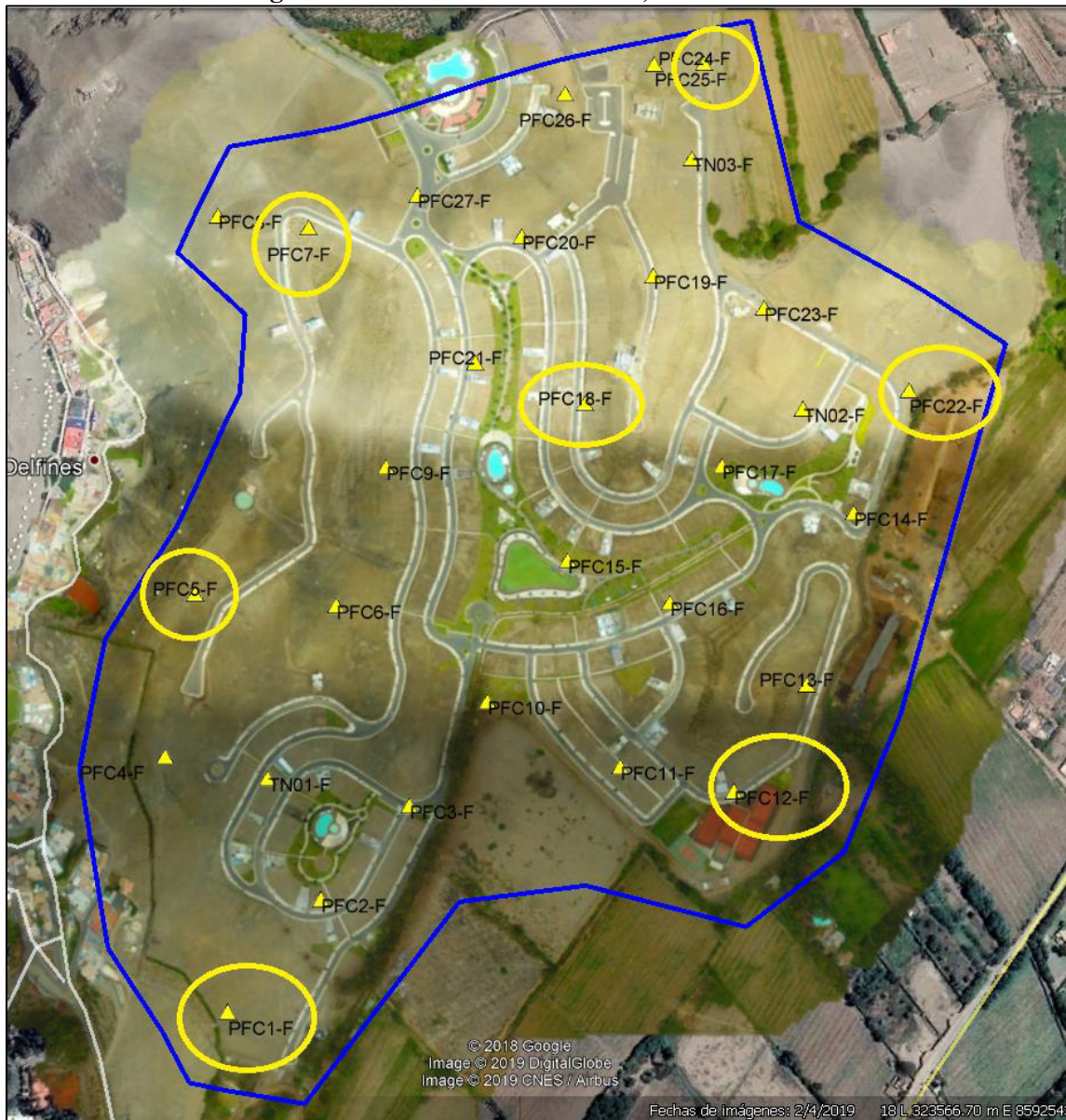
$$s = 0.073$$

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.073** metros.

3.7.3.3 DISTRIBUCIÓN 7 PAF.

En este apartado utilizaremos en la aerotringulación 7 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°46. Distribución de PAF, 7 PAF – 60 ha.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase planimétrico de los puntos de chequeo.

Tabla N°23. Desfase planimétrico, 7 PAF.

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA	PROMEDIO
4(PAF 4)	0.0107	0.0527	0.053775273	0.054442327
	0.015	0.0577	0.059617866	
	0.0128	0.0518	0.053358036	
	0.0091	0.0502	0.051018134	
2 (PAF 2)	0.1104	0.0675	0.129400193	0.119594719
	0.105	0.0608	0.121332766	
	0.1	0.052	0.112712022	
	0.0956	0.0638	0.114933894	
3 (PAF 3)	0.0786	0.0061	0.078836349	0.085570701
	0.0842	0.0161	0.085725434	
	0.0857	0.0302	0.09086545	
	0.0858	0.0135	0.08685557	
11 (PAF11)	0.0103	0.0533	0.054286094	0.055892401
	0.0005	0.0475	0.047502632	
	0.0042	0.0625	0.062640961	
	0.0072	0.0587	0.059139919	
10 (PAF 10)	0.0601	0.0061	0.060408774	0.054268705
	0.0532	0.0008	0.053206015	
	0.0469	0.0052	0.047187392	
	0.055	0.0119	0.05627264	
13 (PAF 13)	0.0685	0.0459	0.082456413	0.081525438
	0.0719	0.0449	0.084768036	
	0.068	0.0401	0.078943081	
	0.0662	0.0448	0.079934223	
6 (PAF 6)	0.0367	0.0066	0.037288738	0.034949379
	0.0406	0.0094	0.041673973	
	0.0321	0.0095	0.03347626	
	0.0265	0.0068	0.027358545	
16 (PAF 16)	0.0402	0.0275	0.04870616	0.043690385
	0.0343	0.0211	0.040270336	
	0.0323	0.0139	0.035163902	
	0.0425	0.0275	0.050621142	
15 (PAF15)	0.0244	0.0334	0.041363269	0.041490705
	0.0163	0.0322	0.03609058	
	0.0194	0.0398	0.044276405	
	0.0126	0.0424	0.044232567	
14 (PAF14)	0.0937	0.0569	0.109623446	0.098343453
	0.0689	0.0429	0.081164155	
	0.0854	0.0486	0.09826047	
	0.0905	0.0519	0.10432574	

17 (PAF17)	0.0256	0.002	0.025678006	0.027637409
	0.029	0.004	0.029274562	
	0.0265	0.0035	0.026730133	
	0.0287	0.0031	0.028866936	
9 (PAF9)	0.0375	0.0271	0.046267267	0.043969769
	0.0354	0.0238	0.04265677	
	0.0371	0.0156	0.040246366	
	0.0379	0.0273	0.046708672	
21 (PAF21)	0.0352	0.0169	0.039046767	0.035976807
	0.0342	0.0136	0.036804891	
	0.0434	0.0011	0.043413938	
	0.0239	0.006	0.024641631	
23 (PAF23)	0.0527	0.0025	0.052759265	0.049775485
	0.0497	0.0012	0.049714485	
	0.0504	0.0038	0.050543051	
	0.046	0.0028	0.046085139	
19 (PAF 19)	0.0024	0.0438	0.043865704	0.04148342
	0.006	0.0411	0.041535647	
	0.0059	0.0398	0.040234935	
	0.0028	0.0402	0.040297394	
20 (PAF 20)	0.0616	0.0098	0.062374674	0.059472848
	0.0582	0.0108	0.059193581	
	0.0547	0.0008	0.05470585	
	0.061	0.0087	0.061617287	
27 (PAF 27)	0.0793	0.0051	0.079463828	0.071106351
	0.0734	0.0033	0.073474145	
	0.0677	0.0045	0.067849392	
	0.0636	0.0022	0.063638039	
8 (PAF8)	0.0199	0.0141	0.024388932	0.018615025
	0.0023	0.0118	0.012022063	
	0.0011	0.02	0.020030227	
	0.0028	0.0178	0.018018879	
26 (PAF 26)	0.0588	0.0759	0.096011718	0.091226332
	0.0442	0.0738	0.086023718	
	0.0525	0.0754	0.091877146	
	0.0448	0.0792	0.090992747	
25 (PAF 25)	0.0497	0.0818	0.095714837	0.092628238
	0.0458	0.08	0.092182645	
	0.0507	0.076	0.091359127	
	0.0496	0.0766	0.091256342	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.018 m hasta 0.12 m con el ajuste de 7 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.06 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (11)$$

$$d = 0.027$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.027** metros.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°24. Desfase altimétrico, 7 PAF.

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
4(PAF 4)	0.054442327	0.169608	0.09023787	0.079312895
2 (PAF 2)	0.119594719	0.083975		
3 (PAF 3)	0.085570701	0.039311		
11 (PAF11)	0.055892401	0.004005		
10 (PAF 10)	0.054268705	0.028997		
13 (PAF 13)	0.081525438	0.067508		
6 (PAF 6)	0.034949379	0.22127		
16 (PAF 16)	0.043690385	0.050086		
15 (PAF15)	0.041490705	0.077469		
14 (PAF14)	0.098343453	0.011592		
17 (PAF17)	0.027637409	0.019825		
9 (PAF9)	0.043969769	0.040734		

21 (PAF21)	0.035976807	0.061925
23 (PAF23)	0.049775485	0.021622
19 (PAF 19)	0.04148342	0.225225
20 (PAF 20)	0.059472848	0.072701
27 (PAF 27)	0.071106351	0.067071
8 (PAF8)	0.018615025	0.099423
26 (PAF 26)	0.091226332	0.303731
25 (PAF 25)	0.092628238	0.177359
TN01		0.144778
TN02		0.049497
TN03		0.037759

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.004 m hasta 0.304 m con el ajuste de 7 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.09** m

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$s^2 = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (12)$$

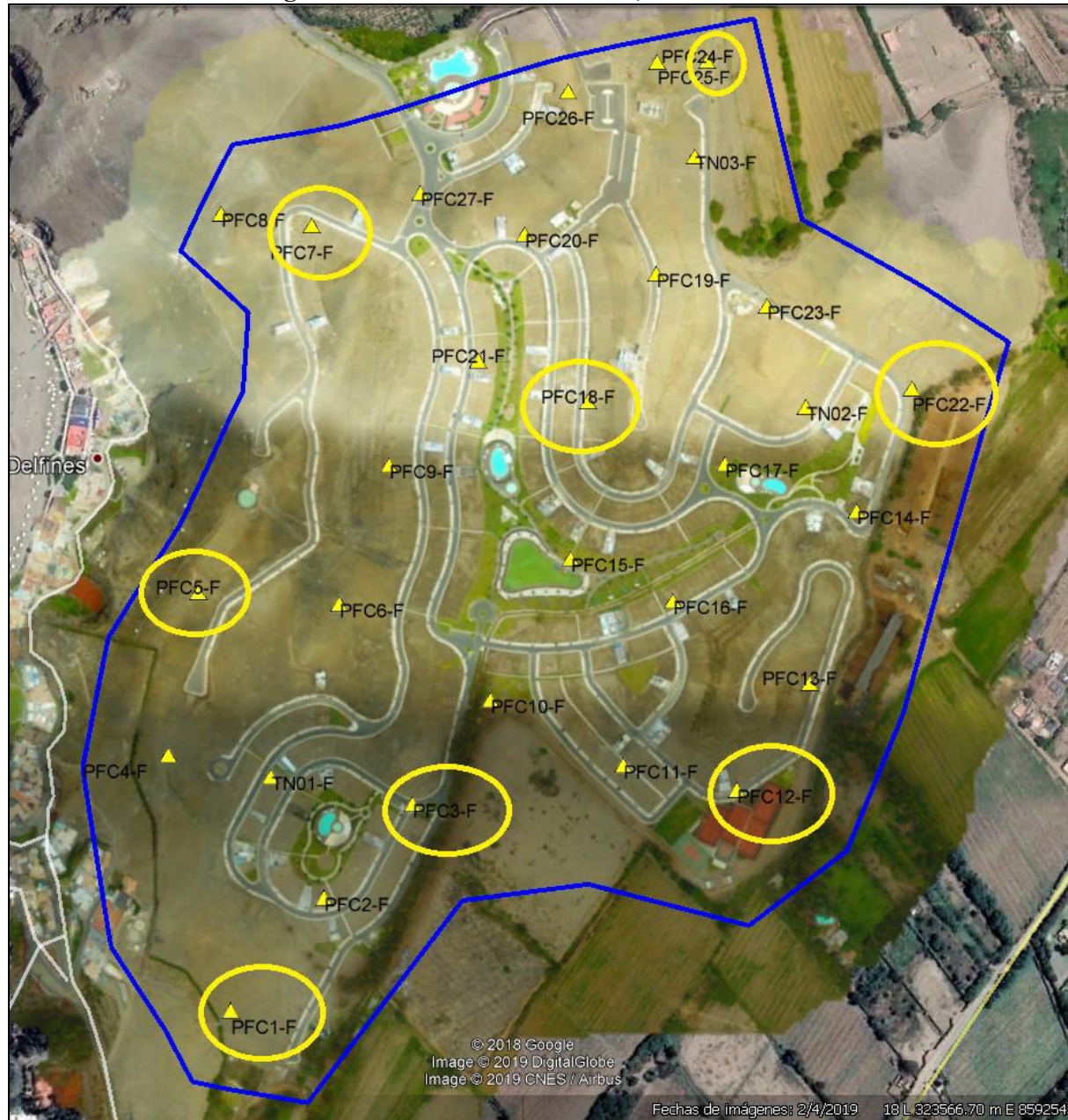
$$s = 0.079$$

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.079** metros.

3.7.3.4 DISTRIBUCIÓN 8 PAF.

En este apartado utilizaremos en la aerotringulación 8 puntos de apoyo fotogramétrico y analizaremos el desfase en los otros puntos que no entrarán en el proceso fotogramétrico.

Figura N°47. Distribución de PAF, 8 PAF – 60 ha.



Fuente: Elaboración propia

Con la ortofoto final procesada en Agisoft Photoscan, se procede a realizar 4 mediciones para cada punto de chequeo, ya que no se puede determinar con certeza el centro de la marca en la ortofoto.

A continuación, se muestra la tabla con el desfase planimétrico de los puntos de chequeo.

Tabla N°25. Desfase planimétrico, 8 PAF.

N° PAF	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA	PROMEDIO
4(PAF 4)	0.0066	0.0485	0.048947012	0.069813882
	0.0143	0.0709	0.072327726	
	0.0163	0.078	0.079684942	
	0.0068	0.078	0.078295849	
2 (PAF 2)	0.0332	0.0751	0.082111205	0.074149432
	0.0402	0.0582	0.070733867	
	0.0414	0.0596	0.072568037	
	0.0447	0.0554	0.071184619	
11 (PAF11)	0.0069	0.0662	0.066558621	0.063117494
	0.0065	0.0611	0.061444772	
	0.0072	0.0625	0.062913353	
	0.0096	0.0608	0.061553229	
10 (PAF 10)	0.0189	0	0.0189	0.010965228
	0.0089	0.0055	0.010462313	
	0.006	0.0004	0.006013319	
	0.0084	0.0012	0.008485281	
13 (PAF 13)	0.058	0.0377	0.069175791	0.071119177
	0.0569	0.0335	0.066029236	
	0.0602	0.0409	0.072779461	
	0.0625	0.0441	0.076492222	
6 (PAF 6)	0.007	0	0.007	0.004958362
	0.0026	0.0009	0.002751363	
	0.006	0.0006	0.006029925	
	0.0039	0.0011	0.00405216	
16 (PAF 16)	0.0164	0.0403	0.043509194	0.041602131
	0.0147	0.041	0.043555597	
	0.006	0.0426	0.04302046	
	0.0067	0.0357	0.036323271	
15 (PAF15)	0.0021	0.0295	0.029574651	0.025206364
	0.0073	0.0278	0.028742477	
	0.0034	0.0226	0.022854321	
	0.0042	0.0192	0.019654007	
14 (PAF14)	0.0902	0.0501	0.103179698	0.102315895
	0.0877	0.0522	0.102059443	
	0.0853	0.0543	0.101116665	
	0.09	0.0499	0.102907774	
17 (PAF17)	0.0265	0.0061	0.027193014	0.026711523
	0.0293	0.0031	0.029463537	
	0.024	0.0057	0.02466759	

	0.0056	0.0249	0.025521951	
9 (PAF9)	0.0351	0.0319	0.047430159	0.040104021
	0.0272	0.0239	0.036208424	
	0.0244	0.0196	0.031297284	
	0.0363	0.0274	0.045480215	
21 (PAF21)	0.0324	0.003	0.032538592	0.027956421
	0.029	0.0134	0.031946205	
	0.0213	0.0103	0.02365967	
	0.0188	0.0144	0.023681216	
23 (PAF23)	0.0534	0.0045	0.053589271	0.044316541
	0.0513	0.0009	0.051307894	
	0.0383	0.0023	0.038368998	
	0.0336	0.0052	0.034	
19 (PAF 19)	0.0103	0.0209	0.023300215	0.027095915
	0.0108	0.0283	0.030290758	
	0.0177	0.0147	0.023008259	
	0.0177	0.0264	0.03178443	
20 (PAF 20)	0.0608	0.0029	0.060869122	0.060847788
	0.0637	0.0071	0.064094462	
	0.0604	0.0046	0.060574912	
	0.0577	0.0042	0.057852658	
27 (PAF 27)	0.0805	0.0066	0.080770106	0.076945599
	0.0679	0.0047	0.068062471	
	0.081	0.0155	0.082469691	
	0.0764	0.0035	0.076480128	
8 (PAF8)	0.0153	0.0328	0.036192955	0.036430544
	0.015	0.0405	0.04318854	
	0.0154	0.0396	0.042489057	
	0.0051	0.0233	0.023851625	
26 (PAF 26)	0.0661	0.0881	0.110140002	0.108184845
	0.0603	0.0971	0.114300044	
	0.0548	0.0915	0.106655005	
	0.0401	0.0934	0.101644331	
25 (PAF 25)	0.0266	0.0041	0.026914123	0.02352627
	0.0243	0.0063	0.025103386	
	0.0181	0.0105	0.020925105	
	0.0116	0.0177	0.021162467	

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.005 m hasta 0.108 m con el ajuste de 8 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.05 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (13)$$

$$d = 0.029$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.029** metros.

De igual manera se analiza el desfase altimétrico y se obtiene los siguientes resultados:

Tabla N°26. Desfase altimétrico, 8 PAF.

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO	PROMEDIO	DESVIACIÓN ESTÁNDAR
4(PAF 4)	0.069813882	0.113074	0.085523591	0.075039833
2 (PAF 2)	0.074149432	0.124559		
11 (PAF11)	0.063117494	0.03317		
10 (PAF 10)	0.010965228	0.085519		
13 (PAF 13)	0.071119177	0.070048		
6 (PAF 6)	0.004958362	0.172561		
16 (PAF 16)	0.041602131	0.058761		
15 (PAF15)	0.025206364	0.072645		
14 (PAF14)	0.102315895	0.002261		
17 (PAF17)	0.026711523	0.006931		
9 (PAF9)	0.040104021	0.016344		
21 (PAF21)	0.027956421	0.054061		
23 (PAF23)	0.044316541	0.014586		
19 (PAF 19)	0.027095915	0.216208		
20 (PAF 20)	0.060847788	0.064274		
27 (PAF 27)	0.076945599	0.046758		
8 (PAF8)	0.036430544	0.059246		
26 (PAF 26)	0.108184845	0.294065		
25 (PAF 25)	0.02352627	0.149836		
TN01		0.168208		
TN02		0.022775		
TN03		0.035629		

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.002 m hasta 0.294 m con el ajuste de 8 puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en la forma PAF Perimetral - punto céntrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.086 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$d = \frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (14)$$

$$d = 0.075$$

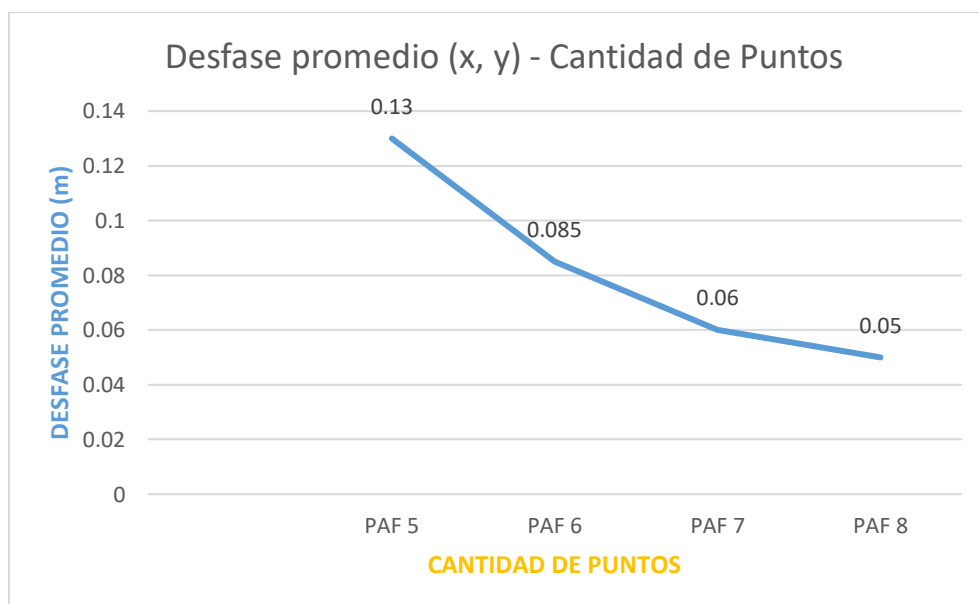
Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.075 metros**.

3.7.4 ANÁLISIS INTEGRAL

En base al desarrollo del actual análisis y el anterior ya consolidado, se presentará la información mediante gráficos para una mejor perspectiva del estudio, y en primer lugar reflejaremos el análisis planimétrico.

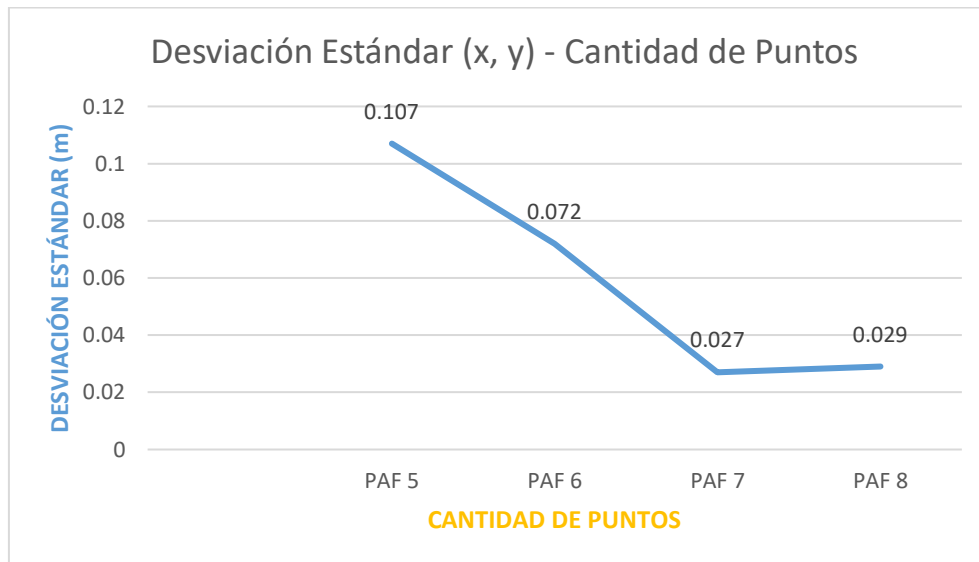
Se presentará las gráficas de este segundo análisis planimétrico que busca determinar la óptima cantidad de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la dimensión del área de estudio, en este caso de 60 hectáreas.

Gráfico N°05. Desfase promedio (x, y) vs cantidad de puntos.



Fuente: Elaboración propia.

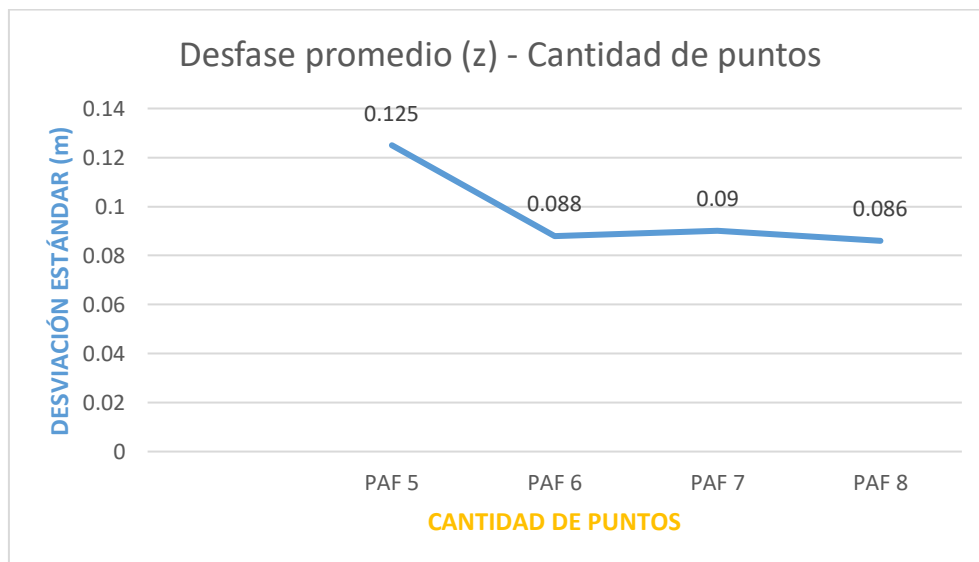
Gráfico N°06. Desviación Estándar (x, y) vs cantidad de puntos.



Fuente: Elaboración propia.

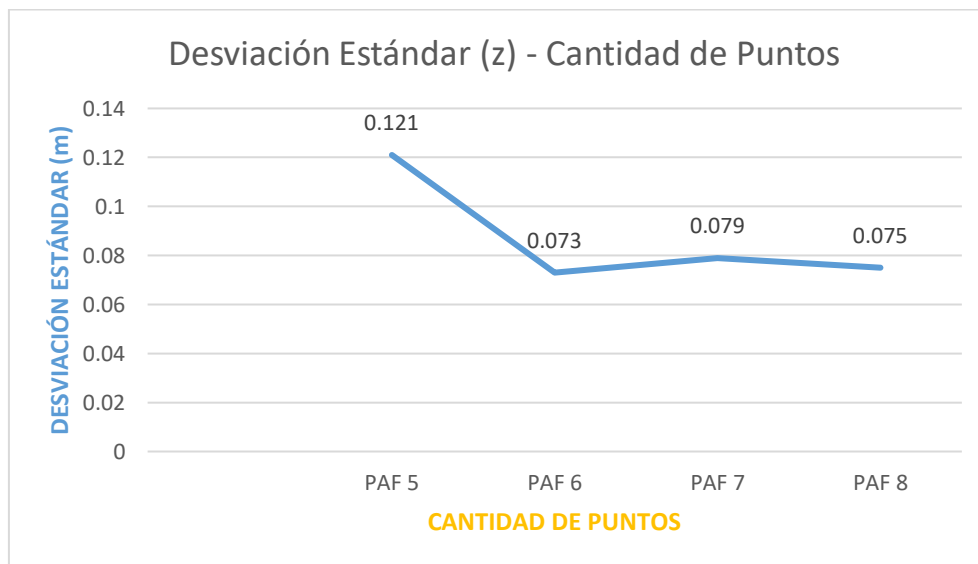
A continuación, se presentará las gráficas de este segundo análisis altimétrico que busca determinar la cantidad óptima de Puntos de Apoyo Fotogramétrico en función a la dimensión del área de estudio, en este caso 60 Hectáreas.

Gráfico N°07. Desfase promedio (z) vs cantidad de puntos.



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico N°08. Desviación Estándar (z) vs cantidad de puntos.



Fuente: Elaboración propia.

Como podemos observar en el primer gráfico (Gráfico N° 05), el rango del desfase promedio varía de 13 a 5 centímetros, notando una mejoría a partir de 6 puntos de apoyo fotogramétrico. En cuanto a la desviación estándar del modelo los mejores resultados se reflejan a partir de los 7 puntos y manteniéndose hasta los 8 puntos de apoyo fotogramétrico.

El desfase promedio y desviación estándar de la altimetría (Gráfico N°07 y N°08) presenta una gran mejoría a partir de los 6 puntos y se mantiene hasta los 8 puntos de apoyo fotogramétrico.

El Instituto Geográfico Nacional mediante el documento “Especificaciones Técnicas para la producción de mapas topográficos a escala 1:000” en el punto 6 sobre las precisiones finales en planimetría sostiene que, de todos los puntos de verificación, el 90% no debe superar el desfase de 20 centímetros y el 10% restante no diferirá de 25 centímetros. En cuanto a las precisiones en altimetría el 95% de los puntos de verificación no diferirán en más de 25 centímetros y el 5% restante nunca debe desfasar los 50 centímetros. El control de dichas precisiones se realizará mediante el levantamiento de una serie de puntos en diferentes zonas de trabajo elegidas al azar, tal y como se realizó en el presente estudio.

Este segundo análisis nos refleja que a mayores puntos de apoyo fotogramétrico, tenemos un modelo más fiable, Por los resultados obtenidos se considera valido el modelo con 8 puntos de apoyo fotogramétrico para dicha área de estudio según consideraciones del Instituto Geográfico Nacional para mapas topográficos a escala 1:1000. En el siguiente capítulo se detallará la validación de este modelo.

3.8 TERCERA EVALUACIÓN: EVALUACIÓN DE SISTEMA PPK CON EL MODELO VALIDADO.

En este apartado se analizará el modelo anteriormente validado con los productos resultantes a partir de un vuelo fotogramétrico realizado con un RPAS con tecnología PPK.

3.8.1 CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio es la misma del capítulo anterior:

ÁREA: 60 Hectáreas

PENDIENTE PROMEDIO: 40%

DISTRIBUCIÓN DE LOS PAF: No se realizará una distribución de puntos de apoyo fotogramétrico.

CANTIDAD DE PUNTOS DE APOYO FOTOGAMÉTRICO: Tratándose de un RPAS con tecnología PPK, se busca analizar la precisión de sus resultados sin el apoyo fotogramétrico en campo. Quiere decir que no se utilizará puntos de apoyo fotogramétrico para el proceso de Aerotringulación.

SOPORTE TÉCNICO:

Se utilizó un RPAS de la marca DJI Phantom 4 RTK/PPK sensor CMOS de 20 Megapíxeles de Resolución, tal y como produce el fabricante. Se utiliza los archivos nativos de la aeronave para realizar el procesamiento PPK con una estación Base externa.

Se utilizó un Receptor Base Gnss de doble frecuencia L1/L2 con captura de datos crudos cada un segundo. El procesamiento de datos crudos de la estación Base y el receptor PPK del RPAS se realizó con el software Onpoz Ezsurv GNSS versión 2.9.

3.8.2 CONTROL GEODÉSICO.

Como punto base para corregir las posiciones del RPAS en post proceso cinemático, se utilizó el mismo Punto de apoyo Topográfico denominado PC01, establecido con técnica GNSS de Posicionamiento por Punto Preciso.

Se instaló el Receptor Base minutos antes de los vuelos, se configuró la lectura de datos crudos con intervalo de un segundo y se llenó la libreta de campo con los datos más importantes como

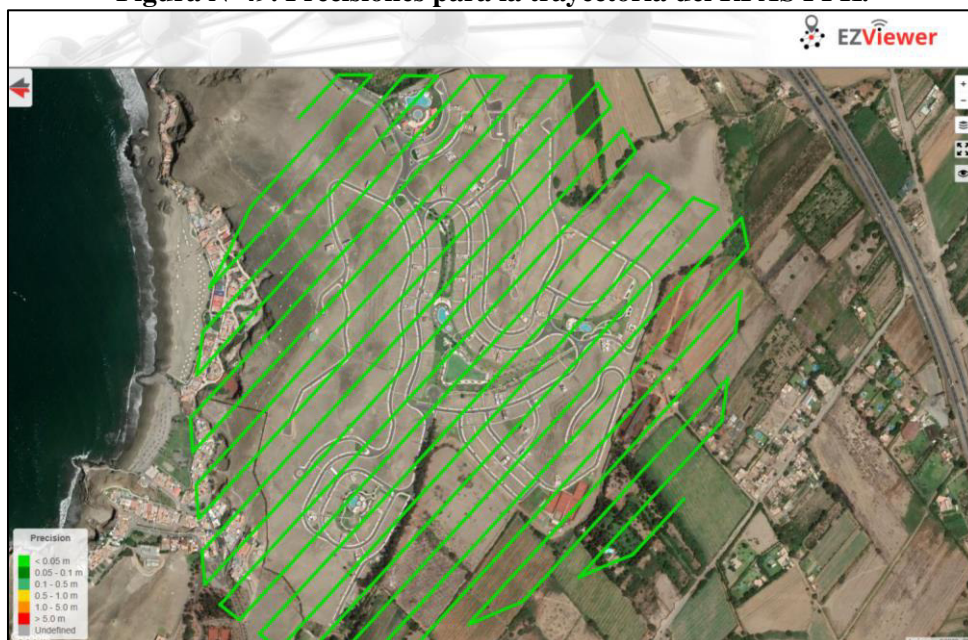
altura de instrumento, hora de inicio, hora final etc. Datos que se usarán en el posterior procesamiento de la trayectoria del RPAS PPK.

Figura N°48. Resumen de procesamiento cinemático en EZSURV, vuelo 01/04.

Móvil	Distancia (km)	Número de épocas					Fallo	Constelaciones Usadas
		Total	Fijado	Flotante	PSR			
100_0002_RIN	0.6	5068	5066	(100.0%)	0	0	2 (0.04%)	GPS

Fuente: Software comercial EZSURV

Figura N°49. Precisiones para la trayectoria del RPAS PPK.



Fuente: Elaboración propia

3.8.3 ANÁLISIS DE SISTEMA PPK CON SOFTWARE COMERCIAL.

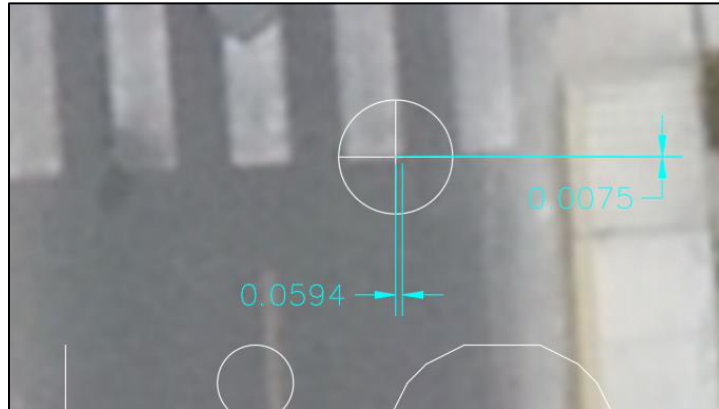
GSD Promedio: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 4 cm/Pix y finalizado el procesamiento el GSD Promedio fue de 3.6 cm/ Pix.

Traslape longitudinal y transversal: Para este vuelo se utiliza un traslape longitudinal de 70% y transversal de 70%. Como se mencionó anteriormente, no se utilizó ningún punto de apoyo fotogramétrico para el ajuste del modelo.

Para el análisis planimétrico se cuenta con el modelo validado de 8 puntos de apoyo fotogramétrico en forma perimetral con punto céntrico donde se contrastaron los puntos bien determinados en la ortofoto validada (Puntos Fotoidentificables) con su posición homóloga en la ortofoto generada a partir del vuelo PPK.

Los puntos a verificar se sacan de la ortofoto validada y en total se extienden 27 puntos de verificación muy cerca de los puntos de apoyo fotogramétrico del ajuste del modelo validado.

Figura N°50. Desfase planimétrico ortofoto validada con ortofoto PPK.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla con el desfase planimétrico del modelo PPK.

Tabla N°27. Desfase planimétrico de modelo PPK.

N° PUNTO	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA
1	0.0032	0.0612	0.061283603
2	0.0449	0.0582	0.073506802
3	0.0288	0.0069	0.02961503
4	0.0166	0.0409	0.044140344
5	0.0237	0.0175	0.029460821
6	0.0084	0.013	0.015477726
7	0.0106	0.0544	0.0554231
8	0.0057	0.0416	0.041988689
9	0.0345	0.0024	0.034583378
10	0.0262	0.001	0.026219077
11	0.0018	0.0097	0.009865597
12	0.0063	0.004	0.007462573
13	0.0181	0.0193	0.026459403
14	0.0117	0.0139	0.018168654
15	0.024	0.0078	0.025235689
16	0.0143	0.0569	0.058669413
17	0.0064	0.0067	0.009265528
18	0.006	0.0129	0.014227087
19	0.0028	0.0043	0.005131277
20	0.0052	0.0437	0.044008295
21	0.0594	0.0075	0.059871613
22	0.0192	0.0123	0.022801974
23	0.0216	0.0344	0.040619207
24	0.0135	0.0825	0.083597249
25	0.0263	0.1029	0.106207815
26	0.0192	0.0644	0.06720119
27	0.0725	0.0638	0.09657479

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.005 m hasta 0.106 m sin ningún punto de apoyo fotogramétrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.041 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (15)$$

$$d = 0.028$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.028 metros**.

Para el análisis altimétrico se va a contrastar el modelo digital de terreno del actual modelo en estudio con las cotas de los puntos de apoyo fotogramétrico del anterior análisis. En ese sentido tenemos la posición y altitud del punto de chequeo y vamos a comparar con el valor de elevación del modelo digital del terreno proveniente del vuelo PPK.

A continuación, se muestra el desfase altimétrico para los 30 puntos de verificación:

Tabla N°28. Desfase altimétrico de Vuelo PPK.

N° PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO
1	0.061283603	0.017648529
2	0.073506802	0.126306091
3	0.02961503	0.017568977
4	0.044140344	0.207875061
5	0.029460821	0.153889252
6	0.015477726	0.015265289
7	0.0554231	0.17749295
8	0.041988689	0.17556015
9	0.034583378	0.00171695
10	0.026219077	0.049098801
11	0.009865597	0.125225281
12	0.007462573	0.068546997
13	0.026459403	0.27545076
14	0.018168654	0.009873505
15	0.025235689	0.149210106
16	0.058669413	0.098887848
17	0.009265528	0.077853851
18	0.014227087	0.020048843
19	0.005131277	0.006605164
20	0.044008295	0.15337793

21	0.059871613	0.094445145
22	0.022801974	0.10234346
23	0.040619207	0.11193428
24	0.083597249	0.026497742
25	0.106207815	0.123411163
26	0.06720119	0.123319153
27	0.09657479	0.086735535
TN01		0.06164444
TN02		0.102246643
TN03		0.054972214

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.002 m hasta 0.275 m sin ningún punto de apoyo fotogramétrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.094 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (16)$$

$$d = 0.067$$

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.067** metros.

3.8.4 ANÁLISIS DEL SISTEMA PPK CON FLUJOGRAMA DE CÓDIGO ABIERTO

Para realizar el análisis del sistema PPK con flujograma de código abierto se usaron las mismas imágenes usadas en el análisis anterior; por ello, las características son las mismas.

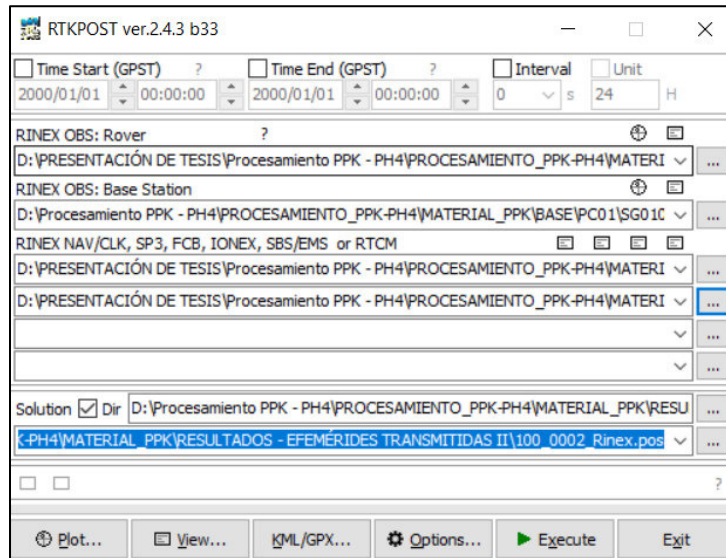
GSD Promedio: Se realizó el vuelo de la aeronave con la finalidad de obtener un GSD Promedio de 4 cm/Pix y finalizado el procesamiento el GSD Promedio fue de 3.6 cm/ Pix.

Traslape longitudinal y transversal: El traslape longitudinal fue de 70% y transversal de 70%. No se utilizó ningún punto de apoyo fotogramétrico para el ajuste del modelo.

3.8.4.1 USO DEL SOFTWARE LIBRE RTKLIB

Se procesaron los datos del receptor GNSS en el software libre RTKLIB, en donde se ingresaron los archivos RINEX de observación de cada Rover y de la Base y los archivos RINEX de navegación de la base y GLONASS, el archivo RINEX POS resultante de este proceso nos arroja coordenadas precisas de observaciones cada 0.2 segundos, así como sus desviaciones estándar; este archivo fue usado para realizar la interpolación de eventos.

Figura N°51. Resumen de procesamiento de datos del receptor GNSS, vuelo 01/04.



Fuente: Software libre RTKLIB

3.8.4.2 INTERPOLACIÓN DE EVENTOS

La interpolación de eventos se realizó mediante una plantilla Excel en el cual se ingresaron los datos del archivo RINEX POS resultante del procesamiento con el software libre RTKLIB y los datos del archivo de tiempo MRK.

Al realizar el vuelo PPK, se obtuvieron como resultados las fotos del vuelo, además algunos archivos extras, entre ellos el archivo de tiempo MRK; este archivo contiene los segundos GPS del momento en el que se tomaron las fotografías con la cámara del Phantom 4. Estos segundos GPS se buscaron en el archivo RINEX POS de manera aproximada y a partir de aquí se procedió a interpolar.

Tabla N°29. Interpolación de eventos

N°	GPST	Latitud
1°	414910.40000	-12.72875243
2°	414910.55968	X
3°	414910.60000	-12.728753

Fuente: Elaboración propia

Donde:

- El GPST N°2 es el tiempo en el que se tomó la fotografía, dentro del archivo MRK y el GPST N°1 y 3 son las observaciones cada 0.2 segundos del archivo RINEX POS.

Interpolación:

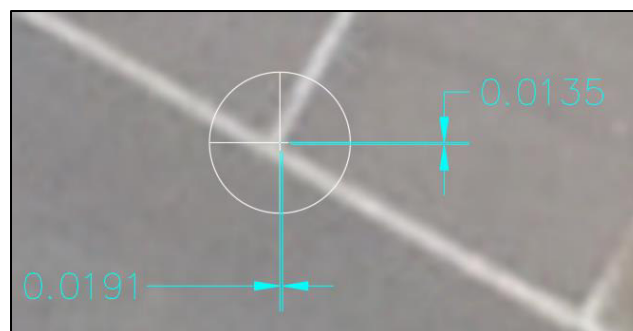
$$\frac{414910.40000 - 414910.55968}{414910.40000 - 414910.60000} = \frac{-12.72875243 - X}{-12.72875243 - (-12.728753)}$$
$$X = -12.72875289$$

Latitud del GPST en el momento que se tomó la fotografía: -12.72875289

De esta manera se interpolaron la longitud, altitud y desviaciones estándar de cada GPST del archivo MRK.

En el análisis planimétrico se contrastaron los puntos fotoidentificables en la ortofoto validada y su posición homóloga en la ortofoto generada a partir del vuelo PPK. El total de puntos de verificación fue de 27, estando estos muy cerca de los puntos de apoyo fotogramétrico del ajuste del modelo validado.

Figura N°52. Desfase planimétrico ortofoto validada con ortofoto PPK.



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se muestra la tabla con el desfase planimétrico del modelo PPK.

Tabla N°30. Desfase planimétrico de modelo PPK.

Nº PUNTO	DELTA X	DELTA Y	MEDIA CUADRÁTICA
1	0.0179	0.0634	0.065878449
2	0.1405	0.0685	0.156308989
3	0.0273	0.0066	0.028086474
4	0.0201	0.0588	0.062140566
5	0.0256	0.0441	0.050991862
6	0.0225	0.0186	0.029192636
7	0.0294	0.0761	0.081581677
8	0.0284	0.0732	0.07851624
9	0.0373	0.0282	0.046760346
10	0.0119	0.0411	0.042788082
11	0.0103	0.0059	0.011870131
12	0.0315	0.0175	0.036034705
13	0.0505	0.0189	0.053920868
14	0.0684	0.0261	0.07321045
15	0.0258	0.0300	0.039568169
16	0.0512	0.0964	0.109153103
17	0.0199	0.0243	0.031408598
18	0.0214	0.0249	0.032832453
19	0.0071	0.0073	0.01018332
20	0.0533	0.0209	0.057251201
21	0.0922	0.0263	0.095877682
22	0.0136	0.0222	0.026034592
23	0.0191	0.0135	0.023389314
24	0.0376	0.0536	0.065473048
25	0.0518	0.1076	0.119419429
26	0.0606	0.1166	0.131407458
27	0.0947	0.0701	0.117822324

Fuente: Elaboración propia

En este análisis planimétrico se aprecian resultados que van desde 0.010 m hasta 0.156 m sin ningún punto de apoyo fotogramétrico.

Desfase promedio total (Planimetría): **0.062 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase planimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (17)$$

$$d = 0.038$$

Desviación estándar de la muestra (Planimetría): **0.038 metros.**

En el análisis altimétrico se contrastaron las altitudes de los puntos de chequeo con el valor de elevación del modelo digital del terreno proveniente del vuelo PPK.

A continuación, se muestra el desfase altimétrico para los 30 puntos de verificación:

Tabla N°31. Desfase altimétrico de vuelo PPK.

Nº PAF	DESFASE PLANIMÉTRICO	DESFASE ALTIMÉTRICO
1	0.065878449	0.12234
2	0.156308989	0.23923
3	0.028086474	0.147554
4	0.062140566	0.111438
5	0.050991862	0.150657
6	0.029192636	0.078173
7	0.081581677	0.265911
8	0.07851624	0.089262
9	0.046760346	0.084863
10	0.042788082	0.169739
11	0.011870131	0.05115
12	0.036034705	0.198532
13	0.053920868	0.39577
14	0.07321045	0.128206
15	0.039568169	0.20114
16	0.109153103	0.197077
17	0.031408598	0.202405
18	0.032832453	0.071156
19	0.01018332	0.083947
20	0.057251201	0.023958
21	0.095877682	0.021743
22	0.026034592	0.193471
23	0.023389314	0.183184
24	0.065473048	0.06279
25	0.119419429	0.03293
26	0.131407458	0.06329
27	0.117822324	0.153512
28		0.06603
29		0.225385
30		0.067421

Fuente: Elaboración propia

En este análisis altimétrico se aprecian resultados que van desde 0.022 m hasta 0.396 m sin ningún punto de apoyo fotogramétrico.

Desfase promedio total (Altimetría): **0.136 m**

Se determina la desviación estándar muestral para el desfase altimétrico:

$$d = \frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1} \quad \dots (18)$$
$$d = 0.084$$

Desviación estándar de la muestra (Altimetría): **0.084** metros.

3.9 EVALUACIÓN INTEGRAL

De todos los análisis realizados hasta el momento se puede desglosar distintos resultados para las aplicaciones de cartografía a escala grande como 1:1000. Según especificaciones técnicas del Instituto Geográfico Nacional sostiene que, en la precisión planimétrica de todos los puntos de verificación, el 90% no debe superar el desfase de 20 centímetros y el 10% restante no diferirá de 25 centímetros. En cuanto a las precisiones en altimetría el 95% de los puntos de verificación no diferirán en más de 25 centímetros y el 5% restante nunca debe desfasar los 50 centímetros.

Vamos a ver los resultados obtenidos considerando como modelos óptimos los 5 PAF, 6 PAF, 7 PAF Y 8PAF; todos con forma perimetral con punto céntrico del análisis anterior.

5 Puntos de Apoyo Fotogramétrico

Para el análisis planimétrico en total se observaron 22 Puntos y de los cuales 3 puntos superan 0.25 m de desfase y el resto no supera el valor de 0.20 m.

Intervalo de confianza(planimetría): 86 %

Puntos que superan 0.25 m: 14%

En altimetría se observaron 25 Puntos, de los cuales ningún punto desfasa los 0.50 m pero 2 de ellos superan los 0.40 m

Intervalo de confianza(altimetría): 92 %

Este modelo de 5PAF queda descartado ya que no cumple con el intervalo de confianza según especificaciones técnicas del IGN.

Intervalo de confianza(planimetría): 86 % < Intervalo de confianza IGN: 90%

Intervalo de confianza(planimetría): 92 % < Intervalo de confianza IGN: 95%

6 Puntos de Apoyo Fotogramétrico

En total se observaron 21 Puntos y de los cuales 1 punto tiene 0.357 m de desfase planimétrico y el resto no supera el valor de 0.20 m.

Intervalo de confianza(planimetría): 95 %

Puntos que superan 0.25 m: 5%

En altimetría se observaron 24 Puntos, de los cuales ningún punto desfasa los 0.50 m y uno de ellos tiene 0.324 m de desfase.

Intervalo de confianza(altimetría): 96 %

Este modelo de 6PAF aparentemente puede ser considerado como óptimo ya que iguala o supera el intervalo de confianza del IGN.

Intervalo de confianza(planimetría): 95 % > Intervalo de confianza IGN: 90%

Intervalo de confianza(planimetría): 96 % > Intervalo de confianza IGN: 95%

Pero queda descartado ya que en planimetría tiene un punto con desfase de 0.357 y tomando con estricto criterio las especificaciones técnicas del IGN ningún punto debería desfasar de 0.25 m.

7 Puntos de Apoyo Fotogramétrico

En total se observaron 20 Puntos y de los cuales ninguno desfasa mas de los 0.20 m por el contrario solo un punto tiene como desfase 0.12 m y el resto por debajo de los 0.10 m.

Intervalo de confianza(planimetría): 100 %

En altimetría se observaron 23 Puntos, de los cuales un punto tiene 0.304 m de desfase y el resto no supera los 0.25 m.

Intervalo de confianza(altimetría): 95 %

Este modelo de 7 PAF es considerado óptimo ya que supera o iguala el intervalo de confianza del IGN y no incurre en observaciones:

Intervalo de confianza(planimetría): 100 % > Intervalo de confianza IGN: 90%

Intervalo de confianza(altimetría): 95 % = Intervalo de confianza IGN: 95%

8 Puntos de Apoyo Fotogramétrico

En total se observaron 19 Puntos y de los cuales ninguno desfaza más de los 0.20 m por el contrario solo un punto tiene como desfase 0.108 m y el resto por debajo de los 0.10 m.

Intervalo de confianza(planimetría): 100 %

En altimetría se observaron 22 Puntos, de los cuales un punto tiene 0.294 m de desfase y el resto no supera los 0.25 m.

Intervalo de confianza(altimetría): 95 %

Este modelo de 8 PAF es considerado óptimo ya que supera o iguala el intervalo de confianza del IGN y no incurre en observaciones:

Intervalo de confianza(planimetría): 100 % > Intervalo de confianza IGN: 90%

Intervalo de confianza(altimetría): 95 % = Intervalo de confianza IGN: 95%

Vuelo con RPAS PPK

En total se observaron 27 Puntos y de los cuales ninguno desfaza más de los 0.20 m por el contrario solo un punto tiene como desfase 0.106 m y el resto por debajo de los 0.10 m.

Intervalo de confianza(planimetría): 100 %

En altimetría se observaron 30 Puntos, de los cuales un punto tiene 0.275 m de desfase y el resto no supera los 0.25 m.

Intervalo de confianza(altimetría): 96 %

Este modelo con vuelo PPK es considerado óptimo ya que supera o iguala el intervalo de confianza del IGN y no incurre en observaciones:

Intervalo de confianza(planimetría): 100 % > Intervalo de confianza IGN: 90%

Intervalo de confianza(altimetría): 96 % > Intervalo de confianza IGN: 95%

3.9.1 CONSIDERACIONES Y RESULTADOS FINALES

De acuerdo a las evaluaciones propuestas, se puede sustentar que los puntos de apoyo fotogramétrico distribuidos en forma perimetral con punto céntrico son una base sólida para ajustar el modelo fotogramétrico al Sistema de referencia local del proyecto.

Tabla N°32. Desfase altimétrico de vuelo PPK.

MODELO	GSD (cm/pix)	PENDIENTE (%)	DESNIVEL (m)	1/1000	d (x,y)	d (z)
5 PAF - PC	3.76	35	60	NO	0.107	0.121
6 PAF - PC	3.76	35	60	NO	0.072	0.073
7 PAF - PC	3.76	35	60	SI	0.027	0.079
8 PAF - PC	3.76	35	60	SI	0.029	0.075
PPK	3.54	35	60	SI	0.028	0.067

Fuente: Elaboración propia

En la tabla N°32 observamos la efectiva aplicación en mapas topográficos 1/1000 tomando en cuenta parámetros como GSD, Pendiente y desnivel del terreno en estudio para dimensiones mínimas de 60 Hectáreas. Se puede inferir que a partir de 7 puntos de apoyo fotogramétrico de distribución perimetral con punto céntrico son necesarios para el ajuste fotogramétrico para mapas topográficos de escala grande como 1/1000 en las condiciones estudiadas.

La utilización de un sistema PPK en un RPAS optimiza notablemente la precisión del modelo logrando la misma desviación estándar (planimetría y altimetría) esperados en topografía 1/1000. Se infiere que la desviación estándar de un modelo para escalas 1/1000 debe resultar hasta 0.03 en planimetría y 0.08 en altimetría teniendo como GSD máximo los 4 cm/Pix. Sea para una metodología PPK o convencional.

Se infiere también que teniendo como distribución mínima de 7PAF – PC para 60 Hectáreas, la distribución de 8PAF – PC podría cubrir desniveles y área mayor como 100 metros y 80 Hectáreas respectivamente por los resultados satisfactorios, incluso precisar que esta última distribución de PAF cumpliría los estándares para mapas topográficos 1/500 en cuanto y exclusivamente a planimetría.

De este presente estudio y sus parámetros se puede desplegar con un alto grado de confiabilidad, las siguientes tablas:

Tabla N°33. Relación de escalas topográficas con distribución de PAF.

MODELO	GSD (cm/Pix)	1/1000	1/2000	1/5000
5 PAF - PC	4	NO	SI	SI
6 PAF - PC	4	NO	SI	SI
7 PAF - PC	4	SI	SI	SI
8 PAF - PC	4	SI	SI	SI
PPK	4	SI	SI	SI

Fuente: Elaboración propia

La tabla N°33 nos muestra la distribución de puntos de apoyo fotogramétrico y su aplicabilidad en las escalas 1000,2000 y 5000 considerando el valor de 4 cm/Pix como máximo.

Tener en consideración que la metodología PPK sin un ajuste con puntos de apoyo fotogramétrico aplica para precisiones de 1/1000 en las condiciones del presente estudio.

Tabla N°34. Relación de dimensiones del terreno con la cantidad óptima de PAF.

DIMENSIONES (Ha)	GSD MAX (cm/Pix)	TERRENO (P-D)	ESCALA	PAF
50	4	40% - 100	1/1000	7
100	4	40% - 100	1/1000	10
200	4	40% - 100	1/1000	20
1000	4	40% - 100	1/1000	100

Fuente: Elaboración propia

4 CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del presente trabajo de investigación ha permitido obtener las siguientes conclusiones y recomendaciones:

- ✓ La mejor distribución de puntos de apoyo fotogramétrico en base al área de estudio es la de forma perimetral con punto céntrico.
- ✓ El punto de apoyo fotogramétrico en el centro del área de estudio reducirá notablemente el error promedio en horizontal y vertical del modelo fotogramétrico.
- ✓ Colocar una mayor cantidad de puntos de apoyo fotogramétrico en campo reduce la desviación estándar del modelo, lo que da mayor intervalo de confianza al producto cartográfico.
- ✓ Para pendientes promedio de 40% el número mínimo de puntos de apoyo fotogramétrico es de 7 para un área promedio de 60 Hectáreas, Con ello se cumple las especificaciones técnicas del Instituto Geográfico Nacional para elaboración de Cartografía 1/1000.
- ✓ El GSD mínimo mediante técnicas de Fotogrametría con RPAS para cumplir con las especificaciones para cartografía 1/1000 con 7 PAF es de 4 cm/Pixel.
- ✓ Las aeronaves con tecnología PPK proveen geoetiquetas de precisión para la elaboración de Cartografía 1:1000 sin incluir puntos de apoyo fotogramétrico, para pendientes iguales o menores a 40%, en todo caso se recomendaría tener puntos de validación para el modelo.
- ✓ La interpolación de eventos es un procedimiento fundamental para lograr obtener coordenadas precisas de cada centro de proyección de imágenes en vuelos fotogramétricos con tecnología PPK.
- ✓ Se recomienda conocer el tipo de sensor de la cámara del RPAS, con ello aplicar ciertas correcciones durante el procesamiento de imágenes en el software de fotogrametría.
- ✓ Se recomienda tener al menos 3 Puntos Fotoidentificables que sirvan para el proceso de verificación.
- ✓ Al realizar proyectos con Aeronaves PPK tener en cuenta el ingreso de un modelo geoidal al Software de Fotogrametría, ya que las geoetiquetas tienen coordenadas globales WGS84 (Latitud, Longitud y altura elipsoidal).

- ✓ Se recomienda hacer estudios de vuelos fotogramétricos que superen el traslape de 70%.
- ✓ En vuelos fotogramétricos con Tecnología PPK se recomienda que la Base GNSS registre datos crudos cada 1 segundo.

5 CAPÍTULO V: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Anquela Julián, A. B., Berné Valero, J. L. y Garrido Villén, N. (2014). *GNSS.GPS: fundamentos y aplicaciones en Geomática*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Claros Zelaya, R., Guevara Aguilar, A., y Pacas Cruz, N. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. [Tesis de Titulación, Universidad de El Salvador]. Civil Engineer. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/1/50108282.pdf>
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2016). *Requisitos para las operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia*. Ministerio de Transporte y Comunicaciones. <https://www.gob.pe/8032-ministerio-de-transportes-y-comunicaciones-direccion-general-de-aeronautica-civil>
- Ghilani, C. D. y Wolf, P. R. (2009). *Topografía*. Alfaomega Grupo Editor.
- Instituto Geográfico Nacional. [IGN]. (2015). El Geógrafo. *Revista Técnico-Científica del Instituto Geográfico Nacional*. Edición XIII.
- International GNSS Service [IGS]. (2016). *Productos de órbitas y relojes precisos*. <http://www.igs.org/>
- Quispe Enriquez, O. (2016). *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 Titulación, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Cybertesis, Repositorio de Tesis Digitales. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/5199>
- Villareal, J. (2015). *Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control*. [Tesis de Titulación, Universidad Técnica Particular De Loja]. Repositorio Institucional UTPL. <http://dspace.utpl.edu.ec/handle/123456789/13079>
- ZCOPTERS. (2016). *Topografía con Drones*. <http://zcopters.com/home-es/>
- López De la Vega (2021). *Evaluación de sistemas PPK/RTK/NTRIP incorporados en UAV para la generación de ortomosaicos, MDT's y Cartografía a escala 1:1000 en el sector de La Vicentina*. [Tesis de Titulación, Universidad de las Fuerzas Armadas].

Análisis comparativo de productos cartográficos elaborados a escala grande, obtenidos mediante fotogrametría con RPAS y Topografía con Tecnología con GNSS – RTK.

Repositorio Institucional. <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/26031/1/T-ESPE-044796.pdf>