



Universidad Nacional
Federico Villarreal

Vicerrectorado de
INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

“ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR
MÉTODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y
VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP).”

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO GEÓGRAFO**

AUTOR

WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

ASESOR

ING. WALTER BENJAMÍN ZUÑIGA DIAZ

JURADO

DR. CESAR JORGE ARGUEDAS MADRID

DR. NOÉ SABINO ZAMORA TALAVERANO

DR. MIGUEL ALVA VELASQUEZ

G. GLADYS ROJAS LEÓN

Lima – Perú

2019

Pensamiento:

Cuando te levantes por la mañana, piensa en el privilegio de vivir: respirar, pensar, disfrutar, amar.

Marco Aurelio

Dedicatoria:

A Joaquín, Basilia y Marina

Agradecimiento:

A mis amigos y docentes de la UNFV por brindarme su apoyo
en mi investigación y de manera especial a Global Mapping
por su valioso apoyo y experiencias aprendidas.

INDICE GENERAL

RESUMEN	xii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Descripción y formulación del Problema	3
1.1.1 Descripción del Problema	3
1.1.2 Formulación del Problema.....	4
1.1.2.1 Problema Principal.....	4
1.1.2.2 Problema Secundario	4
1.2 Antecedentes	5
1.2.1 Antecedentes Nacionales.	5
1.2.2 Antecedentes Internacionales.....	8
1.3 Objetivos	10
1.3.1 Objetivo General.....	10
1.3.2 Objetivos Específicos.....	10
1.4 Justificación	11
1.5 Hipótesis	12
II. MARCO TEÓRICO	13
2.1 Bases Teóricas sobre el tema de investigación	13
2.2 LiDAR.....	13
2.2.1 Aplicaciones del LiDAR.....	16
2.2.2 Navegación	17
2.2.3 Calidad de datos.....	22
2.3 Sistema de posicionamiento Global.....	23
2.3.1 Posicionamiento relativo dinámico.....	24
2.3.1.1 Método cinemático puro	25
2.3.1.2 Método OTF.....	26
2.4 PPP (Precise Point Positioning)	28
2.4.1 Tipos de posicionamiento PPP.....	29
2.4.1.1 Posicionamiento PPP en post-proceso (PP-PPP).....	30
2.4.1.2 Método PPP Cinemático	30
2.5 Procesamiento de datos de navegación.....	31

2.5.1 Estrategias con procesamiento con PPP	31
2.5.2 Estrategias de procesamiento con Estación Base.....	36
2.6 Inertial Navigation System	38
2.6.1 Integración GPS/IMU	40
2.7 Modelo digital de terreno (DTM)	43
2.7.1 Modelos de superficies	44
2.7.2 Estructura de un DTM	45
2.7.2.1 Modelo Ráster: matrices regulares GRID.....	46
2.7.2.2 Modelo Vectorial: red de triángulos irregulares (TIN).....	49
2.8 Definición de Términos Básicos.....	50
2.8.1 Abreviaciones y Acrónimos.....	50
2.8.2 Glosario de Términos.....	51
2.9 Marco Legal y Normativo.....	52
2.9.1 Marco Legal.....	52
2.9.2 Marco Normativo.....	53
III. MÉTODO	54
3.1 Tipo de Investigación.....	54
3.1.1 Método	54
3.1.2 Diseño de Investigación.....	55
3.1.2.1 Planeamiento y ejecución de vuelo.....	56
3.1.2.2 Post Proceso de vuelo	59
3.1.2.3 Generación de DTM	61
3.2 Ámbito Temporal y espacial.....	63
3.2.1 Ámbito Temporal.....	63
3.2.2 Ámbito Espacial.....	63
3.3 Variables	64
3.3.1 Variable dependiente:	64
3.3.2 Variable Independiente:	65
3.4 Población y muestra.....	65
3.5 Instrumentos.....	66
3.5.1 Sensor LiDAR Aerotransportado (ALS 70 HA).....	66
3.5.1.1 Especificaciones Técnicas del ALS 70 HA	68
3.5.1.2 Funcionamiento de LiDAR Aerotransportado.....	68

3.5.1.3 Datos Generados	69
3.5.2 Cámara Aérea Métrica Digital (iXU-RS 1000)	70
3.5.2.1 Cámara Métrica Digital.....	70
3.5.2.2 Especificaciones técnicas del iXU-RS 1000.....	72
3.5.2.3 Datos Generados	73
3.5.3 Herramientas de procesamiento	74
3.5.3.1 Servidores de datos	74
3.5.3.2 Software de procesamiento de datos.....	75
3.6 Procedimientos.....	76
3.7 Análisis de datos	77
IV. RESULTADOS	78
4.1 Desarrollo del proceso de Levantamiento LiDAR y su Procesamiento con PPP.....	78
4.1.1 Planificación de vuelo LiDAR.....	78
4.1.1.1 Requerimientos de precisión y detalle	81
4.1.1.2 Plan de vuelo, datos y registros.....	83
4.1.1.3 Consideraciones de navegación y restricciones de vuelo	90
4.1.2 Ejecución de vuelo LiDAR.....	92
4.1.2.1 Consideraciones de calibración y alineamiento de la IMU	92
4.1.2.2 Vuelo, virajes y control de altura y velocidad	95
4.1.3 Procesamiento de datos de navegación con PPP en IPAS TC.....	97
4.1.4 Presentación de estructura y formato información.	104
4.1.5 Procesamiento de Nube de puntos y obtención de MDT.....	105
4.1.5.1 Ajuste y calibración de líneas de vuelo.....	105
4.1.5.2 Clasificación	108
4.1.5.3 Filtrado de información.....	111
4.1.5.4 Representación del MDT	112
4.1.5.5 Matriz de secuencia para procesamiento de nube de puntos y MDT	113
4.1.5.6 Procesamiento en otras plataformas.....	114
4.2 Evaluación de resultados de Procesamiento PPP.....	115
4.3 Evaluación de modelamiento	119
V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	126
VI. CONCLUSIONES	129
VII. RECOMENDACIONES	131

VIII. REFERENCIAS.....	132
IX. ANEXOS	137
9.1 Tabla de diferencias de secciones Superficie Control vs PPP-1 Ultra rápido	137
9.2 Tabla de diferencias de secciones Superficie control vs PPP-2 Final	139
9.3 Planos.....	141

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Tabla de precisión absoluta de un LiDAR ALS según el tipo de IMU	23
Tabla 2: Tabla de precisión IGS – Real Time Service RTS	29
Tabla 3: Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento	46
Tabla 4: Plantilla de información de plan de vuelo	57
Tabla 5: Procedimientos de Edición LiDAR	62
Tabla 6: Variable Dependiente	64
Tabla 7: Variable Independiente	65
Tabla 8: Información de la muestra	66
Tabla 9: Información específica de equipo LiDAR.....	67
Tabla 10: Información específica de la cámara	72
Tabla 11: Servidores de datos PPP	75
Tabla 12: Software de procesamiento de datos.....	76
Tabla 13: Determinación de Base de operación aérea	79
Tabla 14: Requerimientos de levantamiento LiDAR.....	82
Tabla 15: Especificación General del ALS70HA	86
Tabla 16: Tabla de información de plan de vuelo.....	88
Tabla 17: Ficha de planificación de vuelo	89
Tabla 18: Fases durante vuelo de alineamiento IMU-GPS.....	95
Tabla 19: Comparación entre Find Match vs Tie Lines	106
Tabla 20: Procedimientos de Edición LiDAR	113
Tabla 21: Comparación resultado PPP - Rápidas	116
Tabla 22: Comparación resultado PPP – Finales	116
Tabla 23: Comparación puntos de control y nube de punto PPP- Ultra Rápido.....	118
Tabla 24: Comparación puntos de control y nube de punto PPP-Final	119
Tabla 25: Análisis Económico	125
Tabla 26: Análisis Tiempo.....	125
Tabla 27: Análisis mejoras técnicas.....	125

INDICE DE FIGURAS

Figura 1: Resumen de red Vial Departamental.....	7
Figura 2: Sistema LiDAR	14
Figura 3: Imagen de Intensidad.....	15
Figura 4: Integración GPS – IMU.....	19
Figura 5: Marco de referencia del vehículo	20
Figura 6: Marco de Referencia Terrestre	20
Figura 7: Marco de Referencia NED (Norte Este Elevación).....	21
Figura 8: Diagrama típico de un sistema de navegación Inercial	21
Figura 9: Sistema de posicionamiento GPS.....	24
Figura 10: Levantamiento de Método Cinemático	26
Figura 11: GPS Método OTF.....	27
Figura 12: Posicionamiento por orbita y relojes precisos	31
Figura 13: Ecuaciones de corrección ionosférica usando PPP	32
Figura 14: Componentes de un sistema LiDAR	37
Figura 15: Diagrama de marcos de referencia usado en la navegación inercial.....	39
Figura 16: Ejes ortogonales de un giróscopo con errores de alineamiento típico	40
Figura 17: Integración GPS – IMU.....	41
Figura 18: Diagrama de un procesamiento típico INS/GPS en modo tightly-coupled.....	42
Figura 19: Modelo Digital de Terreno Obtenido por LiDAR.....	44
Figura 20: Modelo Digital de Superficie Obtenido por LiDAR	45
Figura 21: Estructura de un modelo regular GRID.....	47
Figura 22: Modelamiento de un Grid vs TIN	48
Figura 23: Diseño de Investigación	55
Figura 24: Control de vuelo, verificación de altitud, dirección y velocidad.....	58
Figura 25: Seguimiento de ejecución de líneas de vuelo sobre eje de carretera.....	58
Figura 26: Combinación de Sensores para determinación de trayectorias y valores XYZ	59
Figura 27: Procesamiento de Trayectoria - Resultado de exactitud	60
Figura 28: Procesamiento de Trayectoria - Resultado de precisión	61
Figura 29: Ubicación geoespacial de la muestra.....	64
Figura 30: Equipo LiDAR Aéreo ALS 70HA Leica	67
Figura 31: Especificaciones Técnicas del ALS 70 HA.....	68
Figura 32: Splash Screen de inicio de IPAS TC.....	70

Figura 33: Cámaras de barrido y matriciales.	71
Figura 34: Cámara iXU-RS 1000 RGB y NIR	71
Figura 35: Especificaciones técnicas del iXU-RS 1000	72
Figura 36: Captura de imagen en IX Capture	73
Figura 37: Determinación de Base de operación aérea.....	80
Figura 38: Área de estudio	82
Figura 39: Información de cuadro precisión de un ALS70 HP	84
Figura 40: Información de cuadro precisión de un ALS70 HA.....	84
Figura 41: Capacidad de altitud de operación ALS70	85
Figura 42: Representación gráfica del plan de vuelo.....	88
Figura 43: Vista ampliada de plan de vuelo, inicio de tramo	88
Figura 44: Distribución de sensores con sus ejes.....	92
Figura 45: Representación de avión en los ejes de coordenadas de navegación	93
Figura 46: Giros de calibración y alineamiento del GPS – IMU durante el vuelo.	95
Figura 47: Virajes ejecutados entre líneas de vuelo.....	96
Figura 48: Vista de una estructura típica de los datos crudos del LiDAR ALS70HA.....	97
Figura 49: Importación de datos de vuelo.....	98
Figura 50: Verificación de disponibilidad de datos de satélites	99
Figura 51: Correcciones de Level Arms	100
Figura 52: Procesamiento de Trayectoria	101
Figura 53: Grafico de trayectoria procesada con PPP	102
Figura 54: Resultado de procesamiento en posición.....	103
Figura 55: Resultado precisión de trayectoria XYZ	103
Figura 56: Procesamiento de LAS crudo	104
Figura 57: Líneas de vuelo sin ajuste.....	107
Figura 58: Líneas de vuelo ajustadas	107
Figura 59: Error final de ajuste de línea.....	108
Figura 60: Intensidad de retorno	110
Figura 61: Proceso de clasificación de nube de puntos.	111
Figura 62: Representación de un MDT.....	112
Figura 63: Visualización de Nube de puntos en 3D en Global Mapper	115
Figura 64: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 0+000 al 9+500	120
Figura 65: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 10+000 al 19+500	121
Figura 66: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 20+000 al 29+500	121

Figura 67: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 30+000 al 39+500	121
Figura 68: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 40+000 al 50+000	122
Figura 69: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 0+000 al 9+500	123
Figura 70: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 10+000 al 19+500	123
Figura 71: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 20+000 al 29+500	123
Figura 72: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 30+000 al 39+500	124
Figura 73: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 40+000 al 50+000	124

RESUMEN

El avance de la tecnología es cada vez más aceptado en nuestro país en el ámbito de la geomática, y es necesario conocer cómo obtener el mayor beneficio de su aplicación en los proyectos viales. Por lo tanto, el objetivo de esta investigación es evaluar la implementación del levantamiento topográfico por método LiDAR procesado con Precise Point Positioning con la finalidad de identificar sus ventajas en los levantamientos topográficos viales. Para ello se ha desarrollado el procesamiento de datos de vuelo LiDAR, el análisis de los resultados del procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) y la comparación del Modelo Digital del Terreno generado a partir del procesamiento con PPP, con la finalidad de demostrar que es posible obtener un modelamiento con las precisiones para una cartografía 1:1000, para que sea utilizado a los estudios de factibilidad y perfil de un proyecto vial de acuerdo a los resultados aceptables obtenidos.

El método empleado es el levantamiento topográfico LiDAR Aerotransportado cuyos datos han sido reprocesados con Precise Point Positioning (PPP) Rápidas y Finales con resultados de 14cm con PPP Rápidas y 7cm con PPP Finales, posteriormente el modelo de terreno obtenido ha cumplido con las precisiones y con valores de acuerdo a las referencias y normas establecidas del IGN, cuya tolerancia es de 25cm en altimetría para una topografía a escala 1:1000, en tanto los valores obtenidos del modelamiento es de ± 13.6 cm en comparación con los puntos de control.. Además, se ha presentado las ventajas que se obtiene con este método en función al tiempo y costo.

Se ha descrito el método LiDAR, desde la planificación, consideraciones de vuelo y procesamiento de los datos con PPP con el software IPAS TC, clasificación de nube de puntos y obtención de modelamiento digital, incluso yendo a detalles y conceptos que quizás sean

nuevos para quienes se inician en el uso de aplicaciones LiDAR pero que ayudaran a comprender, valorar y utilizar las nuevas tecnologías de aplicación aerotransportada.

También, se ha realizado el análisis de los resultados del procesamiento con PPP, mediante la comparación del modelamiento con los puntos de control y del análisis de las secciones cada 500m generadas de la muestra control y el modelamiento obtenido con PPP Ultra Rápido y Final.

Se ha podido demostrar con los resultados obtenidos y en comparación con los antecedentes asociados en la investigación, que las precisiones obtenidas con este sistema LiDAR, son confiables e incluso sin puntos de control y cuyas tolerancias están dentro de las precisiones de una cartografía 1/1000.

Palabra Clave: LiDAR, Sistema de Posicionamiento Global, Precise Point Positioning, Efemérides, Sistema de Navegación Inercial, Unidad de Medición Inercial, Trayectorias, Levantamiento Topográfico, Clasificación, Nube de punto, Modelamiento de superficie, Instituto Geográfico Nacional.

ABSTRACT

The advancement of technology is increasingly accepted in our country in the field of geomatics, and it is necessary to know how to obtain the greatest benefit from its application in road projects. Therefore, the objective of this research is to evaluate the implementation of the topographic survey using the LiDAR method processed with Precise Point Positioning in order to identify its advantages in road surveying. For this purpose, LiDAR flight data processing, the analysis of the results of the processing with Precise Point Positioning (PPP) and the comparison of the Digital Terrain Model generated from the PPP processing have been developed, in order to demonstrate that it is possible to obtain a modeling with the precisions for a 1: 1000 mapping, so that it can be used to the feasibility studies and profile of a road project according to the acceptable results obtained.

The method used is the LiDAR Airborne topographic survey whose data has been reprocessed with Fast and Final Precise Point Positioning (PPP) with results of 14cm with Fast PPP and 7cm with Final PPP, subsequently the terrain model obtained has complied with the accuracies and with values according to the references and established norms of the IGN, whose tolerance is 25cm in altimetry for a 1: 1000 scale topography, while the values obtained from the modeling is + 13.6cm compared to the control points. , the advantages obtained with this method in terms of time and cost have been presented.

The LiDAR method has been described, from planning, flight considerations and data processing with PPP with IPAS TC software, point cloud classification and obtaining digital modeling, even going to details and concepts that may be new to you. they begin in the use of

LiDAR applications but that will help to understand, evaluate and use the new airborne application technologies.

Also, the analysis of the results of the PPP processing has been performed, by comparing the modeling with the control points and the analysis of the sections every 500m generated from the control sample and the modeling obtained with Ultra Fast and Final PPP.

It has been possible to demonstrate with the results obtained and in comparison with the background associated in the investigation, that the accuracies obtained with this LiDAR system are reliable and even without control points and whose tolerances are within the precision of a 1/1000 cartography.

Key Word: LiDAR, Sistema de Posicionamiento Global, Precise Point Positioning, Efemérides, Sistema de Navegación Inercial, Unidad de Medición Inercial, Trayectorias, Levantamiento Topográfico, Clasificación, Nube de punto, Modelamiento de superficie, Instituto Geográfico Nacional.

I. INTRODUCCIÓN

La presente investigación desarrolla y analiza la implementación del levantamiento topográfico por método LiDAR aerotransportado, sus procedimientos, precisiones y beneficios para ser utilizados en proyectos viales. Así como la comparación de los modelamientos de una superficie del terreno control y los modelamientos obtenidos a partir de los cálculos con datos Precise Point Positioning (PPP), con la finalidad de demostrar que no se requiere puntos de control con el uso del procesamiento con PPP.

Esta investigación desarrolla un aspecto poco conocido del procesamiento LiDAR con datos PPP, pero que es de importancia porque cada vez los procesos son menos dependientes de referencias locales y más dinámicas e incluso on-line en todos los dispositivos utilizados en Geomática en el Perú y en el Mundo.

El trabajo se ha realizado a partir del reprocesamiento de los datos crudos LiDAR con datos PPP – con efemérides Rápidas y PPP- con efemérides final, posteriormente se ha seguido una secuencia de procesamiento LiDAR para obtener un modelamiento topográfico, cuyos resultados han sido comparados para su validación con puntos de control y una topografía existente, obteniendo resultados de acuerdo con la precisión de una cartografía 1:1000.

En el primer capítulo presentaremos la formulación del problema planteado en función a las nuevas tecnologías usadas en el Perú que no son adecuadamente aprovechadas, específicamente en los levantamientos topográficos viales ya que el los requerimientos se exige una cantidad de puntos de control mayor de la que se requiere, además, las referencias asociadas a la presente investigación definieron las precisiones a considerar en la elaboración del modelamiento y responder a los objetivos como la determinación de sus ventajas y la posibilidad de hacer levantamientos topográficos con buenos resultados y sin puntos de control.

En el segundo capítulo describiremos las bases teóricas de la presente investigación, principalmente la definición del LiDAR, aplicaciones y conceptos asociados a la georeferenciación, navegación y el procesamiento con Precise Point Positioning PPP y su ventaja de no requerir una estación base de referencia, así como el marco legal y normativo aplicado a la presente investigación.

El tercer capítulo describirá el método implementado para el levantamiento topográfico LiDAR, y se indicaran las pruebas de validación con los puntos de control y del modelamiento de la topografía obtenido con el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) referido a la normativa del IGN para la producción de cartografía 1:1000 emitida por el IGN aplicable al levantamiento LiDAR. Además, la investigación tiene como interés optimizar los levantamientos topográficos en los estudios viales, principalmente para los estudios de Factibilidad y Perfil, pues son estudios que pueden ser más eficientes con este tipo de levantamiento. Además de mostrar toda la teoría y procedimiento de un levantamiento aerotransportado LiDAR.

Finalmente, en el cuarto y quinto capítulo, mostraremos y haremos la discusión de las pruebas indicadas para la validación de los resultados del procesamiento con Precise Point Positioning (PPP), y en base a ello se pudo confirmar que el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) cumple con las precisiones de una cartografía 1:1000 sin la necesidad de utilizar puntos de control. por lo que queda demostrado que el levantamiento topográfico por método LiDAR Aerotransportado es confiable y aplicable en estudios viales.

1.1 Descripción y formulación del Problema

1.1.1 Descripción del Problema

En el Perú, la implementación de los nuevos métodos de levantamiento topográficos como el LiDAR requieren de un conocimiento técnico que permita poder aprovechar las ventajas de este sistema. El desconocimiento de algunas actividades asociadas al LiDAR ocasionan que no se aprovechen las alternativas que optimicen su proceso, actualmente de acuerdo con la normativa del IGN (2011) los procesamientos de los datos de vuelo son realizados con estaciones bases y limitados a 40 km de distancia a la base de procesamiento, cuando hoy en día existe otra alternativa que ofrece mejoras en tiempo y costo como el procesamiento con Precise Point Positioning.

Ante la necesidad creciente de los levantamientos topográficos por el método LiDAR, sobre todo en proyectos viales a través del MTC y la actividad privada con la necesidad de crear y mejorar las carreteras buscan invertir recursos en el desarrollo de más y mejores vías, sin embargo dada la extensión de nuestro país y agreste morfología y biodiversidad dificultan los levantamientos topográficos convencionales; y estos comprometen la vialidad de los proyecto, además la poca integración de nuevas tecnologías en los entes de regulación y control de proyectos viales también ocasionan que los proyectos tengan retrasos o se generen sobre costos en las partidas de topografía.

No obstante el desarrollo tecnológico cada vez más accesible permite en cierta medida contribuir en la vialidad y desarrollo de los proyectos viales, la topografía como la mayoría de las ciencias ha aprovechado también del desarrollo tecnológico, pero es necesario emplear la tecnología adecuada que optimice los levantamientos topográficos para estudios viales, además las normas o especificaciones técnicas no se encuentran adecuadas para los levantamientos con sensor aerotransportado LiDAR, IGN (2011).

Evidentemente toda nueva tecnología busca una mejora, pero dependerá del usuario cuando debe aplicarla y sobre todo obtener el máximo beneficio y para ello es necesario capacitarse constantemente.

Los pocos estudios realizados respecto al uso del LiDAR, afirman que es un método que ofrece ventajas en tiempo y costo, también dichos estudios han desarrollado modelos digitales de terreno realizando procesamientos con estaciones bases y puntos de control con óptimos resultados y consideran al LiDAR como método de gran precisión.

En tal sentido el desarrollo de esta tesis implementará el procedimiento de un levantamiento topográfico LiDAR y su validación del modelamiento topográfico generado con los resultados del procesamiento LiDAR con Precise Point Positioning (PPP) y un análisis de la comparación del modelamiento control y el modelamiento a evaluar para los levantamientos topográficos viales que se desarrollen en el Perú.

1.1.2 Formulación del Problema.

1.1.2.1 Problema Principal

¿Cómo la implementación del levantamiento topográfico por método LiDAR y su procesamiento con Precise Point Positioning, mejorará el levantamiento topográfico vial?

1.1.2.2 Problema Secundario

¿Como se realiza el procesamiento de los datos de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning (PPP)?

¿Cuál es el nivel de precisión del procesamiento de los datos de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning (PPP)?

¿De qué modo es posible validar el modelamiento topográfico obtenido de un procesamiento LiDAR con Precise Point Positioning (PPP)?

1.2 Antecedentes

1.2.1 Antecedentes Nacionales.

IGN (2011), el Instituto Geográfico Nacional del Peru presento en el 2011 las “Especificaciones Técnicas para la Producción de Cartografía básica, Escala 1:1000 con resolución Jefatural N° 089-2011-IGN/JEF/OGA, en donde muestra procedimiento y técnicas de producción a partir de procesos fotogramétricos analógicos – digitales, sin embargo, no presenta especificaciones respecto a los levantamientos LiDAR. Sin embargo, podemos resaltar que, para la precisión posicional relativa, la determinación de trayectorias el error no debe ser superior a 15 cm en X,Y,Z. Y para la precisión posicional absoluta, la determinación de trayectorias el error no debe ser superior a 5 cm en X,Y,Z. (RMS). En un procesamiento de trayectoria con una estación Base a una distancia no mayor a 40km. Finalmente la precisión de la representación del terreno debe ser de + 20cm en X,Y y de 25cm en Z.

Carpio (2015), presentó una tesis sobre la Generación de Modelos Digitales de Terreno mediante metodología LiDAR aplicado en la Selva del Perú en donde demuestra la eficacia del sistema LiDAR en el proceso de modelamiento del terreno aplicando procedimientos de clasificación de nube de puntos y la presentación del mejor

método de clasificación de acuerdo con su investigación. También manifiesta que la tecnología del sistema LiDAR es de carácter transcendental por la optimización de recursos, costos y precisión que se obtiene por la aplicación del LiDAR en relación con otras técnicas tradicionales como la fotogrametría que demandan un mayor tiempo y costo de campo. En el desarrollo de su investigación describe el procedimiento de obtención de la nube de puntos del cual se genera el modelo necesario para su comprobación, en donde emplea el procesamiento del vuelo LiDAR con una estación Base ubicada a 50 Km de distancia radial con resultados de -0.526m y +0.187m, ante esos resultados debió aplicar una corrección de 18cm para distribuir el error respecto a los puntos de control, logrando cumplir con sus especificaciones. Como conclusión de su investigación, valida la obtención de un modelamiento de terreno (MDT). Finalmente recomienda el empleo de filtros de procesamiento (macros o algoritmos de procesamiento) para la clasificación de puntos con y sin tratamiento manual.

Ministerio de Cultura (2016), presentó el 19 de Julio del 2016 una conferencia sobre el LiDAR y su utilidad en proyectos Arqueológicos para la obtención de un modelamiento de terreno de 5000 Hectáreas como parte de desarrollo del proyecto denominado MachuPicchu Archeology LiDAR Consortium, con la colaboración de instituciones nacionales e internacionales. El objetivo fue de facilitar el trabajo de investigación de los arqueólogos en localizar restos arqueológicos sin necesidad de dañar el patrimonio cultural y de reducir el trabajo de décadas en solo días. Esto último se debe a la rapidez de captura y procesamiento de los datos LiDAR.

MTC (2018) Cabe indicar que el Clasificador de Rutas del ministerio de transporte y comunicación (MTC) es el documento oficial del Sistema Nacional de Carreteras que compila las rutas viales existentes en el país, clasificándolas en red vial nacional, redes viales departamentales o regionales y redes viales vecinales o rurales,

según interconecten transversalmente diversas regiones del país, solo regiones o solo comunidades locales. De acuerdo con el clasificador de rutas del MTC existen 29,563.69 rutas en la red vial departamental que requerirán de estudios topográficos en los siguientes años por los siguientes motivos, mantenimiento, ampliaciones de vías, afectación por inundaciones, por movimientos de masas, fallas geológicas y sismos. (Ver Figura 1).



Resumen General de la Red Vial Departamental ó Regional Inventariada

N°	Departamentos	N° de Rutas Departamentales	Pavimentada Kms.	No Pavimentada Kms.	Carreteras Existentes Kms.	Proyectada Kms.	Longitud Total de Medición Kms.
1	AMAZONAS	12	31.28	569.79	601.07	146.47	747.54
2	ANCASH	13	490.05	998.29	1,488.34	0.00	1,488.34
3	APURIMAC	16	9.57	1,346.40	1,355.96	145.14	1,501.10
4	AREQUIPA	22	510.31	1,132.59	1,642.89	84.53	1,727.42
5	AYACUCHO	21	469.43	1,740.36	2,209.78	133.31	2,343.09
6	CAJAMARCA	13	52.50	678.97	731.48	262.98	994.46
(*) 7	CALLAO	2	24.31	1.75	26.06	0.00	26.06
8	CUSCO	36	553.75	2,094.82	2,648.57	318.30	2,966.87
9	HUANCAVELICA	23	24.03	1,537.35	1,561.38	0.00	1,561.38
10	HUANUCO	13	16.73	776.20	792.93	92.40	885.32
11	ICA	13	50.56	687.06	737.62	50.85	788.47
12	JUNIN	11	67.68	808.74	876.42	52.92	929.33
13	LA LIBERTAD	31	92.02	1,609.69	1,701.71	211.91	1,913.62
14	LAMBAYEQUE	20	212.04	311.91	523.95	111.78	635.73
15	LIMA	31	186.78	1,486.41	1,673.19	263.25	1,936.44
16	LORETO	9	108.48	163.19	271.67	1,598.36	1,870.03
17	MADRE DE DIOS	5	3.67	199.48	203.14	614.03	817.17
18	MOQUEGUA	9	68.85	816.87	885.72	15.32	901.04
19	PASCO	10	34.43	576.27	610.70	33.04	643.74
20	PIURA	13	244.66	568.42	813.08	151.30	964.37
21	PUNO	35	361.11	1,456.16	1,817.27	194.42	2,011.68
22	SAN MARTIN	13	178.65	353.94	532.60	287.31	819.91
23	TACNA	8	85.00	427.75	512.75	37.68	550.43
24	TUMBES	10	31.67	118.20	149.86	34.31	184.18
25	UCAYALI	7	0.00	214.05	214.05	141.94	355.99
TOTAL		396	3,907.54	20,674.62	24,582.16	4,981.53	29,563.69

(*) Provincia Constitucional del Callao

Figura 1: Resumen de red Vial Departamental
Fuente: Provias (2015)

MTC(2019), el ministerio de transportes y comunicaciones en una de sus recientes convocatorias llamó a concurso público con N° 005-2019-MTC/10 Contratación del servicio de consultoría en General para la Elaboración del estudio de Pre-Inversión a nivel de Perfil del Proyecto “Creación del Ferrocarril Lima-Ica”, el cual incluyó como alternativa el levantamiento topográfico por método LiDAR de al menos 03 tramos como alternativa para el diseño vial y con un ancho de levantamiento de 1km, sin embargo, pese al nivel de estudio, la escala de referencia de 1/1000 y a la precisión del sistema LiDAR se exige obligatoriamente el uso de puntos de control y puntos de apoyo.

1.2.2 Antecedentes Internacionales

Arranz (2013) realizó un estudio de diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser para aplicarlos en modelado geométrico empleando sensores láser, tanto aéreos como terrestres. En sus pruebas realizadas proyectaron puntos de control obtenidos mediante GPS-RTK sobre el modelo digital de superficie obtenido cuyo resultado fue una diferencia media de 19cm +/- 5cm, tolerable para cartografía a escala 1/1000, que requiere precisiones de 25cm de altimetría en puntos, de acuerdo con lo descrito en su investigación. También manifiesta que la eficacia en obtener un modelo digital del terreno del LiDAR frente a la restitución fotogramétrica, este empleó un 75% menos en tiempo. Respecto al procesamiento de datos con PPP muestra una comparación de procesamiento de datos en tiempo real y en Post Proceso indicando un Orden de precisión de 0.1m para un post proceso con Precise Point Positioning (PPP).

Galván (2014) realizó un estudio acerca del Sistema LiDAR aplicado a la Geomática, Generando modelos digitales de elevaciones (MDE). En su estudio describe el proceso actividades de vuelo, fases de procesamiento de nube de puntos y modelamiento. Aunque su estudio solo muestra el procedimiento de obtención de un modelo digital de terreno y de elevación las precisiones que asume como admisible son muy altas para las precisiones obtenidas actualmente. Se indica Escala 1:20000, sin embargo, también menciona las tolerancias recomendadas por EL Instituto Nacional de Estadística y Geografía de México (INEGI) respecto a la altura de vuelo, por ejemplo se indica que para una altura aproximada de 3000m sobre el Terreno la precisión horizontal es de 0.4m y en vertical es de 0.2m.

Wang y Liu (2019) realizaron una investigación para la determinación de coordenadas de puntos de control en estudios Hidrográficos mediante el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP). Donde manifiestan que la técnica del procesamiento diferencial de navegación por satélite ha sido el modo operacional dominante para la determinación precisa de la navegación y geociencia. También indica que a diferencia de los métodos clásicos RTK o Sistema de Posicionamiento Global Diferencial (DGPS), el procesamiento con PPP tienen varias ventajas, pero principalmente el procesamiento con PPP no necesita de una base de referencia o red de estaciones base. Por otro lado, se indica que el procesamiento con PPP se ha vuelto útil para el procesamiento de diversos datos ya también servicios de procesamiento con PPP en línea con soluciones de posición precisas a nivel Subcentimétrico a nivel estático y aunque no hace referencia de procesamientos de datos cinemáticos se manifiesta que el procesamiento con PPP es una alternativa viable a las soluciones DGPS.

IGM (2016), el Instituto Geográfico Militar del Ecuador elaboró para dicho País un documento de carácter normativo, las especificaciones técnicas generales de levantamiento de información mediante sensor LiDAR aerotransportado. En las especificaciones técnicas menciona conceptos relacionados con la planificación de vuelo, seguridad, ejecución de vuelo, procesamiento general de trayectorias y nube de puntos y finalmente control de calidad. Respecto al procesamiento de los datos indica que debe procesarse con una estación fija a una distancia no mayor a 40km y la precisión del post proceso de la trayectoria debe estar en \leq a 10 cm en X,Y,Z.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Evaluar la implementación del levantamiento topográfico por método LiDAR procesado con Precise Point Positioning con la finalidad de identificar sus ventajas en los levantamientos topográficos viales.

1.3.2 Objetivos Específicos

Desarrollar el proceso de datos de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning para obtener un modelamiento del terreno a partir de este procesamiento.

Analizar los resultados del procesamiento de los datos de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning para conocer el grado de precisión obtenido con este procesamiento.

Comparar el modelamiento de terreno obtenido por levantamiento topográfico LiDAR procesado con Precise Point Positioning contra un modelamiento control existente con la finalidad de determinar su validez.

1.4 Justificación

La realización de este estudio se justifica debido a contribuir en la difusión e implementación del uso del LiDAR Aerotransportado en levantamientos topográficos para proyectos viales en el Perú, mediante el procesamiento de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning y de esta manera pueda ser considerado como una alternativa válida en las organizaciones y no limitarse al uso de método clásicos de levantamiento o fotogramétricos. Además, actualmente las ejecuciones de estos vuelos son procesadas con estaciones bases y también se emplean puntos de control o puntos de apoyo en una mayor cantidad de la que es necesaria.

Por otro lado, la aplicación del levantamiento topográfico LiDAR procesado con Precise Point Positioning (PPP) es poco conocida en el Perú y no forma parte de las normas técnicas y requerimientos para el procesamiento de los datos LiDAR, sin embargo su aplicación permitirá aprovechar las múltiples ventajas de esta tecnología y su eficiencia en la reducción de costos, también mejorará del nivel de detalle obtenido del terreno, la disminución en la cantidad de puntos de control y disponibilidad de contar con mayor recubrimiento de área en los proyectos viales a nivel de factibilidad y definitivos.

Esta investigación surge de la necesidad de disponer de una alternativa de procesamiento de vuelo LiDAR, rápida y eficiente que contribuya en la minimización de trabajos de campo realizados en la obtención de modelamientos topográficos en los proyectos viales.

El desarrollo de esta investigación es de mucha importancia, pues se busca demostrar que la tecnología LiDAR y el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) es perfectamente aplicable en estudios viales, con lo cual se podrá realizar estudios viales con un menor recurso económico en comparación a métodos convencionales y fotogramétricos que son exigidos en los Términos de referencia de las instituciones como Provias Nacional.

También es importante porque el tema de estudio no cuenta con suficientes referencias en el Perú y además no existe normativa aplicable a este método de levantamiento emitida por el IGN como si lo tiene El instituto geográfico militar del Ecuador, solo por citar a un país limítrofe. En tanto esta investigación servirá de referencia y motivación para futuras investigaciones referidas al levantamiento LiDAR.

1.5 Hipótesis

La implementación del levantamiento topográfico LiDAR y su procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) mejorará la eficiencia de los levantamientos topográficos viales.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Bases Teóricas sobre el tema de investigación

El presente marco Teórico desarrollará a continuación, los conceptos básicos necesarios para la comprensión de la presente investigación. En primer lugar, explicaremos la composición de un sistema Laser aéreo, y el propio LiDAR. Posteriormente describiremos los sistemas de navegación y procesamiento con Precise Point Positioning que apoyan al sistema láser, también definición de términos importantes involucrados en el presente estudio. Al final del presente capítulo presentaremos el marco normativo y técnico de referencia para la presente investigación.

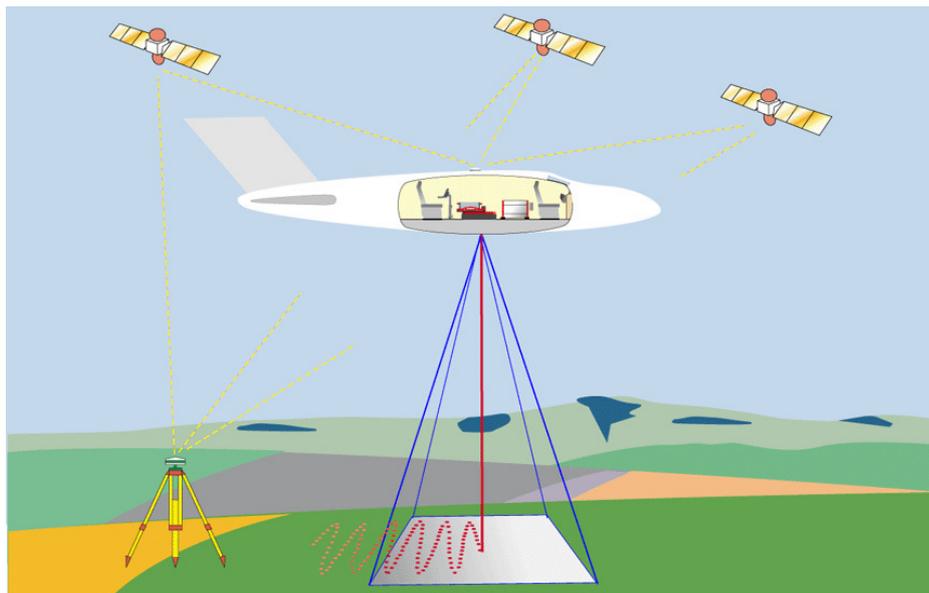
2.2 LiDAR

Debido a la gran información existente generada día a día, sería poco apropiado poder determinar o valorar una definición acerca del LiDAR, sin embargo, de acuerdo con la línea de investigación coincido que la mejor definición del LiDAR ha sido nombrada por la NOAA, y este el siguiente:

NOAA (2016) LiDAR, acrónimo de Light Detection and Ranging, es un método de detección remota que utiliza la luz en forma de un láser pulsado o pulsos de láser para medir rangos (distancias variables) a la Tierra. Estos pulsos de luz combinados con otros datos registrados por el sistema aerotransportado generan información precisa, en tres dimensiones sobre la forma de la Tierra y sus características superficiales.

También podemos indicar que un sistema LiDAR es un sensor activo que emplea un sistema de medición inercial de alto rendimiento combinado con un GPS para medir la posición y la actitud del sensor, así como también se miden los registros de la aeronave, la posición, la actitud, velocidad y la distancia sobre el terreno en un determinado momento con el apoyo de los sensores y computadoras que integran el sistema LiDAR.

Los aviones y helicópteros son las plataformas más utilizadas para la adquisición de datos LiDAR para levantamientos de grandes extensiones de terreno, esto incluye a los distintos desniveles que también presenta el terreno, en la figura 2 podemos ver gráficamente la utilización de un LiDAR en un avión.



*Figura 2: Sistema LiDAR
Fuente: Leica ALS 70 User Manual*

Los sistemas LiDAR Aerotransportados escanean el suelo con pulsos de láser, emitidos a distintas alturas de vuelo. Dependiendo del uso de las longitudes de onda, es

posible que el pulso laser no penetre las nubes o la humedad excesiva, pero a diferencia de los sistemas de fotogrametría óptica pasiva, un vuelo LiDAR pueden realizarse incluso en la noche, es decir no requiere de iluminación natural, por ser un sensor activo. La densidad del punto variará en función del instrumento, la altitud de vuelo y la velocidad de vuelo. Los sistemas LiDAR cuentan con una amplitud variable en el ancho de barrido, muy similares entre los fabricantes de equipos LiDAR de hoy, por ejemplo, en áreas planas se aprovecha mejor dicha amplitud y se puede emplear todo el ángulo disponible de barrido FOV, sin embargo en áreas irregulares a menudo utilizan anchos de escaneo estrechos a lo largo de la trayectoria, permitiendo que las mediciones se realicen en un modo casi vertical, los levantamientos en selva o con una alta densidad de vegetación requieren de estas mediciones con poco ángulo de barrido (Max 15 Grados) y mediciones casi verticales. Esto puede dar como resultado una buena penetración de cobertura vegetal y la recopilación de datos más precisos en áreas construidas.

Los sistemas LiDAR además de producir datos de elevación a partir de la nube de puntos, también pueden producir imágenes de intensidad, el cual se muestran con una imagen en blanco y negro, y que proporcionan una primera vista de la topografía del área de estudio. Ver figura3.



*Figura 3: Imagen de Intensidad
Fuente: Elaboración Propia*

ESRI (2019) La intensidad es una medida, recogida para cada punto, de la fuerza de retorno del pulso láser que genera el punto. Se basa, en parte, en la reflectividad del objeto alcanzado por el pulso láser. La reflectividad es una función de la longitud de onda utilizada, que suele estar en el infrarrojo cercano. La fuerza de los retornos varía con la composición del objeto de superficie que refleja el retorno. La intensidad sirve de ayuda en la detección y extracción de entidades, en la clasificación de puntos LIDAR y como sustituta de imágenes aéreas cuando no hay ninguna disponible. La intensidad es relativa, no cuantificable, por lo tanto, no puede esperarse el mismo valor del mismo objetivo de vuelo a vuelo o de elevación a elevación.

Según, NOAA (2016). Hay dos tipos de LIDAR y estos son topográficos y batimétricos. El LiDAR Topográfico normalmente utiliza un láser infrarrojo cercano para mapear la tierra, mientras que el LiDAR batimétrico utiliza la luz verde de penetración de agua para medir también las elevaciones del fondo marino y del lecho del río.

La presente investigación, utilizó datos de levantamiento LiDAR topográfico, es decir con láser Infrarrojo cercano.

2.2.1 Aplicaciones del LiDAR

Como hemos mencionado anteriormente el LiDAR es empleado principalmente para la obtención de elevaciones de terreno mediante una aeronave, el cual es conocido como ALS (Airborne Laser Scanner), sin embargo, su aplicación en otras actividades específicas ha originado sistemas como el TLS (Terrain Laser Scanner) que consiste en equipos estáticos, similares a una estación total, para el levantamiento de una superficie o estructura desde un punto fijo. También, existe un sistema denominado MLS (Mobile Laser Scanner) que consiste en utilizar sensores LiDAR en automóviles o dispositivos

que puedan ser transportados por una persona, siendo la aplicación del MLS, principalmente con fines de levantamiento urbano para la obtención de información tendidos eléctricos, cada vez con mayor frecuencia; reciente mente en Intergeo 2019, se han exhibido el GeoSlam ZEB Horizon que es escáner de mano capaz, de escanear con alta precisión un túnel o ambientes cerrados.

2.2.2 Navegación

Comprendamos que la ciencia de la navegación ha jugado un papel importante para la humanidad. Tal es así que las personas podían viajar de forma fiable ida y vuelta desde lugares distantes con éxito. Entre ellos las actividades de reconocimiento militar y las actividades comerciales como lo vuelos comerciales y privados.

Según Farrel (1999) durante la década de 1940, la navegación, en particular el sistema de navegación inercial (INS), se convirtieron en componentes importantes en las aplicaciones militares y científicas. Hoy en día, el INS forma parte del equipo estándar en la mayoría de los aviones, barcos y submarinos, además de los sensores no tripulados destinados a actividades no necesariamente con fines geoespaciales.

El GPS y INS tienen características complementarias; Por lo tanto, es natural considerar su aplicación dentro de un enfoque integrado. Tal como ocurre en los sistemas ALS, TLS y MLS.

También Farrel (1999). Explica que, en el sistema y la información del vehículo tripulado, la navegación por lo general tiene una de dos intenciones:

1. Para determinar con precisión la posición y velocidad con respecto a una referencia conocida.

2. Para planificar y ejecutar la maniobra necesaria para moverse entre las posiciones deseadas.

La primera capacidad es necesaria para lograr la segunda con precisión. En tanto los métodos para aplicar la primera capacidad está en relación con los problemas más grandes de orientación y la ruta de planificación de trayectorias, sea necesario para vehículos tripulados y no tripulados.

De acuerdo con la presente investigación nos referiremos a la navegación inercial, como la intención de determinar con precisión la posición y velocidad con respecto a una referencia conocida. El procesamiento de los datos de navegación de un sistema ALS tiene como inicio y fin un tiempo determinado, expresado en segundos GPS.

El propósito del procesamiento de los datos de navegación inercial consiste en determinar la trayectoria recorrida como resultado del procesamiento e integración del GPS e IMU. La combinación de los dos sistemas permite que el INS (IMU) ayude al receptor GPS al seguimiento del recorrido y permite utilizar los datos de GPS, incluso en el ocultamiento y aparición de satélites en el horizonte o en una reducción de estos de acuerdo con la latitud donde se ubique el proyecto. En la figura 4, vemos como como interactúa la combinación GPS IMU en la determinación de la trayectoria.

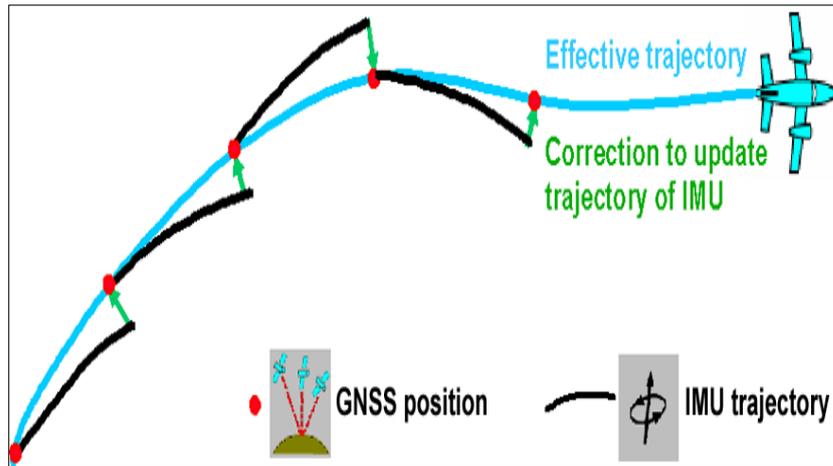


Figura 4: Integración GPS – IMU
Fuente: Leica ALS 70 User Manual

Según, Castro (2013) La navegación inercial se basa en el posicionamiento relativo a partir de la integración numérica de aceleraciones y velocidades angulares registradas por sensores inerciales, con el propósito de determinar el recorrido y orientación de un vehículo, también considera importante los diferentes marcos y ejes de referencia usados en navegación, debido a que, la información de las diversas fuentes de información y sensores usados en navegación usualmente proviene de diferentes sistemas de coordenadas; por ejemplo, los acelerómetros y giroscopios miden su movimiento con respecto a un marco inercial centrado en el vehículo, al que denomina de forma abreviado b-frame; mientras que, el sistema GPS mide la posición y velocidad con respecto a un marco terrestre, y lo denomina abreviadamente e-frame; sin embargo, para el Sistema de Navegación Integrada INS/GPS se define un marco de navegación local, al que denomina abreviadamente n-frame. Ver figura 5 y 6.

En este último también llamado marco de navegación north-east-down (NED) o north -east -up (NEU). El eje-x siempre apunta al norte geográfico, el eje-z hacia el origen del marco terrestre (e-frame) para el caso de NED y el eje-y apunta hacia al este 90°. Ver figura 7.

Por consiguiente, la navegación Inercial integra el sistema inercial constituidos por los acelerómetros y giróscopos y el sistema GPS asociado a un marco de referencia terrestre.

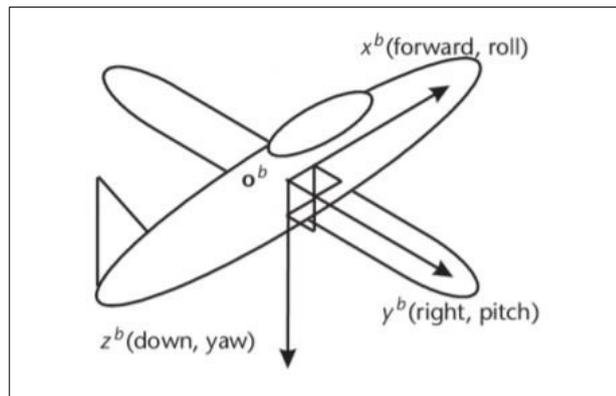


Figura 5: Marco de referencia del vehículo
Fuente: Castro 2013

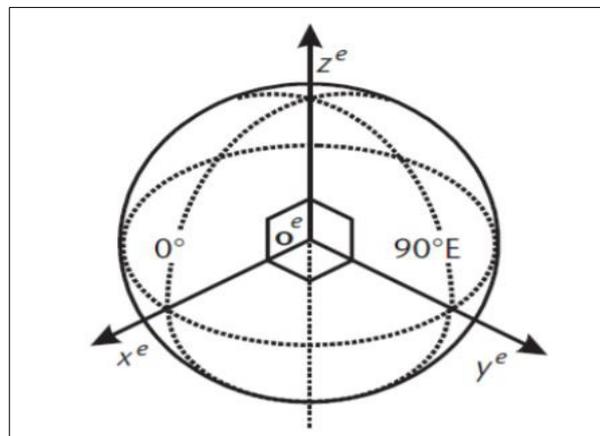


Figura 6: Marco de Referencia Terrestre
Fuente: Castro 2013

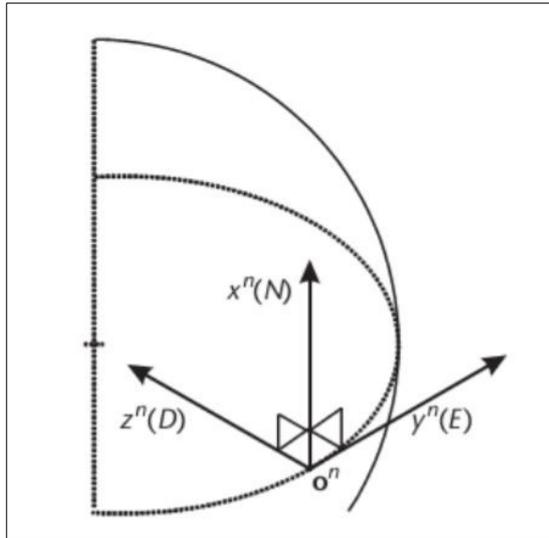


Figura 7: Marco de Referencia NED (Norte Este Elevación)
Fuente: Castro 2013

Comprendamos que el propósito de un sistema de navegación está basado en el control de la posición, velocidad, actitud mediante la planificación y los sistemas de orientación capaz de ser controlado por un equipo orientado a un sistema de control o sistema de referencia.

A continuación, la figura 8 se presenta un diagrama del funcionamiento de un equipo de navegación inercial.

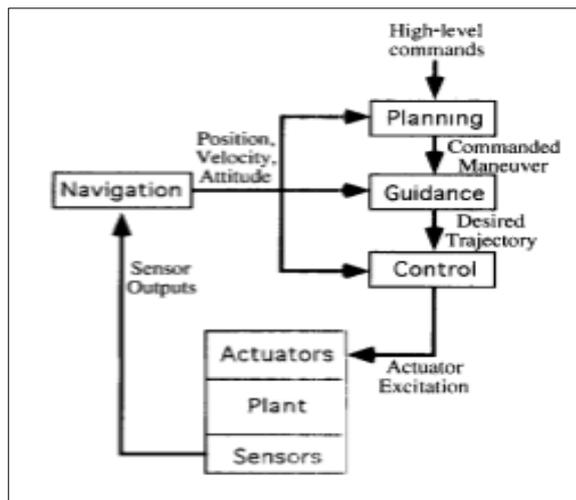


Figura 8: Diagrama típico de un sistema de navegación Inercial
Fuente: Castro 2013

2.2.3 Calidad de datos

El concepto de calidad ha evolucionado en el tiempo siendo su definición actual más aceptada, aquella que se relaciona con las exigencias de los consumidores con respecto a la satisfacción de sus necesidades.

Por ejemplo, Matthew (2010) en su tesis doctoral indica que la calidad de los datos LiDAR se cuantifica por dos atributos: densidad y precisión. Y que estos son controlados por el equipo utilizado, la habilidad del operador del equipo, y las técnicas de procesamiento de datos.

En efecto esta afirmación es válida ya que los estudios de Matthew están orientados a la evaluación geomecánica y la identificación de peligros en taludes y desprendimiento de rocas en áreas específicas. Obviamente ese tipo de estudios requiere de una alta densidad de puntos y equipos LiDAR del tipo estáticos TLS.

De acuerdo con esta investigación en donde utilizamos el LiDAR Aerotransportado, lo que se busca es procesar los datos con PPP y obtener un modelamiento de la superficie del terreno en extensiones de kilómetros lineales, por lo que la precisión debe tener una mayor valoración antes que la cantidad o densidad de puntos. En la práctica los trabajos de diseño son realizados sobre una superficie de los puntos filtrados del total de un levantamiento y no del 100% de toda la nube de puntos.

En términos de equipamiento las características de hardware durante la navegación inercial y captura de datos influirán en la calidad de los datos, y de la precisión obtenida dependerá del uso de un mayor control de campo. En tal sentido un sistema LiDAR provisto en un RPA (Drone) no tiene la misma precisión que un LiDAR de alta gama instalado de un avión, ya que la precisión exige equipos más sofisticados y de mayor consumo de energía que no pueden ser soportados en un RPA (Drone)

A continuación, se muestra en la tabla 1 las diferencias en las precisiones según el tipo de IMU. Usado en un Equipo LiDAR ALS 70 HA.

Tabla 1: Tabla de precisión absoluta de un LiDAR ALS según el tipo de IMU

Leica IMU Model			DUS5	NUS5	CUS6
IMU type			LN200	33BM61	Micro IRS
Position			0.05 - 0.3 m	0.05 - 0.3 m	0.05 - 0.3 m
Velocity			0.005 m/s	0.005 m/s	0.005 m/s
Roll & Pitch			0.005 deg	0.005 deg	0.0025 deg *
Heading			0.008 deg	0.008 deg	0.005 deg *

Fuente: Leica ALS 70 User Manual

Finalmente, esta investigación realizó un análisis y validación de datos en función a la exactitud relativa y absoluta. En donde la exactitud relativa o interna, se refiere a la posición de un elemento o conjunto de elementos respecto a la posición de los demás elementos de este conjunto. Y la exactitud absoluta o externa se obtiene de la comparación de un punto o conjunto de datos y su correspondiente posición verdadera o asumida como tal.

2.3 Sistema de posicionamiento Global

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de precisión es fundamental en los sistemas LiDAR, ver figura 9, a continuación, daremos a conocer las técnicas de posicionamiento por GPS relacionados con la presente investigación, es decir las técnicas empleadas durante los levantamientos aerotransportados. Citaremos Huerta (2005) para el desarrollo de este tema.

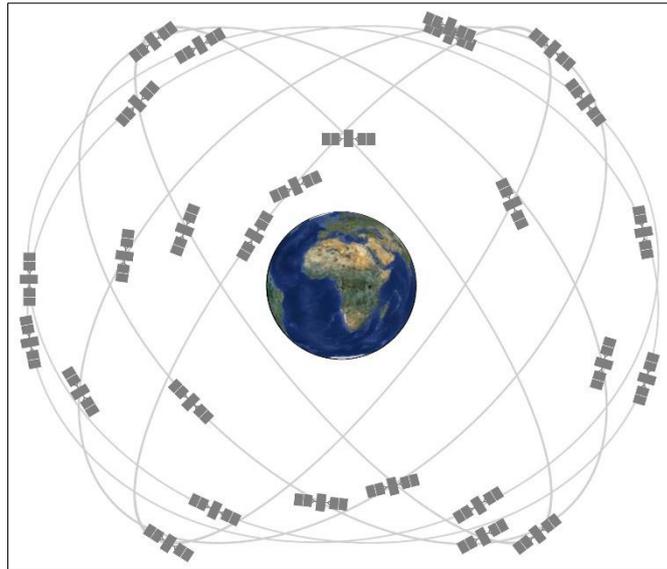


Figura 9: Sistema de posicionamiento GPS
Fuente: <https://www.gps.gov/spanish.php>

2.3.1 Posicionamiento relativo dinámico

Las técnicas de posicionamiento estáticas se utilizan frecuentemente debido a que permiten alcanzar las máximas precisiones.

Huerta (2005) En los últimos años han adquirido gran importancia los denominados métodos de medición cinemáticos o dinámicos en los cuales, mientras el receptor base se mantiene fijo, el receptor remoto se desplaza rápidamente de un punto a otro. Esta modalidad de posicionamiento se caracteriza por una productividad muy superior a la de los métodos estáticos permitiendo lograr además precisiones aceptables para la geodesia, topografía y para una gran cantidad de aplicaciones. En estos casos la resolución de ambigüedades requiere de un tratamiento especial. Los métodos para el posicionamiento relativo dinámico son los siguientes:

- Método cinemático puro
- Método Stop & Go
- Método OTF

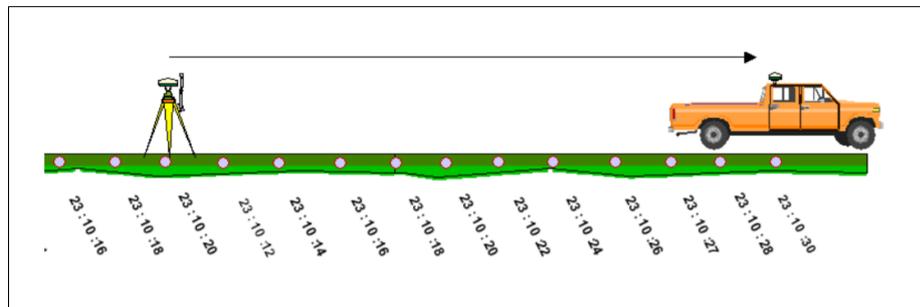
De los tres métodos citados anteriormente el Método Cinemático puro y el Método OTF son empleados en los levantamientos aerotransportados, a continuación, los daremos a conocer.

2.3.1.1 Método cinemático puro

Este método tiene como objetivo el levantamiento de una línea en forma continua, como por ejemplo el perímetro de una isla, la traza de una ruta, incluyendo numerosas aplicaciones aéreas y marítimas. Para que este método resulte exitoso se tienen que cumplir dos condiciones:

- a) Se debe realizar un proceso de inicialización, es decir, calcular las ambigüedades iniciales antes de comenzar el movimiento. El Posicionamiento inicial se puede lograr, por ejemplo, mediante una determinación estática ordinaria.
- b) Sin apagar el receptor, se efectúa el recorrido correspondiente, debiéndose mantener las señales provenientes de al menos cuatro satélites sin pérdidas de ciclos. Esto permitirá utilizar las ambigüedades iniciales previamente obtenidas, en el cálculo de los puntos sucesivos. Si durante el recorrido una o más veces, por algún tipo de obstrucción, se pierde la comunicación será necesario realizar nuevamente una inicialización. En la siguiente Imagen,

figura 10, se muestra un levantamiento con método cinemático, es decir con el receptor en movimiento.



*Figura 10: Levantamiento de Método Cinemático
Fuente: Huerta 2005*

2.3.1.2 Método OTF

La aplicabilidad de los métodos anteriormente descritos está limitada por la existencia de obstáculos como túneles, densa arboleda, puentes, etc., ya que producen cortes en las señales recibidas y por lo tanto se pierden las ambigüedades iniciales, siendo necesario en estos casos volver a determinarlas. Dentro de los métodos dinámicos el más potente en la actualidad, es sin duda, el denominado OTF (on the fly) que permite la resolución de ambigüedades en movimiento, ver figura11. Este método ha surgido como consecuencia del gran avance que en los últimos tiempos han experimentado las técnicas de procesamiento dinámico.

Esta técnica, originalmente fue aplicada exclusivamente a cálculos de alta precisión a partir de datos obtenidos de receptores de doble frecuencia y código P. La principal diferencia con los métodos de procesamiento tradicionales estriba en que el método OTF utiliza el denominado filtro de Kalman.

El filtro de Kalman permite estimar posiciones con precisión creciente, mientras el receptor está en movimiento, hasta que la precisión lograda es tal que permite calcular las ambigüedades y de esa manera poder computar las coordenadas definitivas. El tiempo necesario para lograr determinar las ambigüedades se denomina tiempo de refinamiento o de convergencia. Cuando el procesamiento se realiza con datos provenientes de receptores L1/L2/P, se obtienen los mayores rendimientos, ya que ante eventuales pérdidas de ciclos es posible recuperar las ambigüedades rápidamente. Por ejemplo, para una base corta es posible fijarlas en menos de dos minutos. El método OTF también es aplicable a datos provenientes de receptores L1. El inconveniente que tiene es que los tiempos de refinamiento deberán ser mayores, según Huerta (2005).

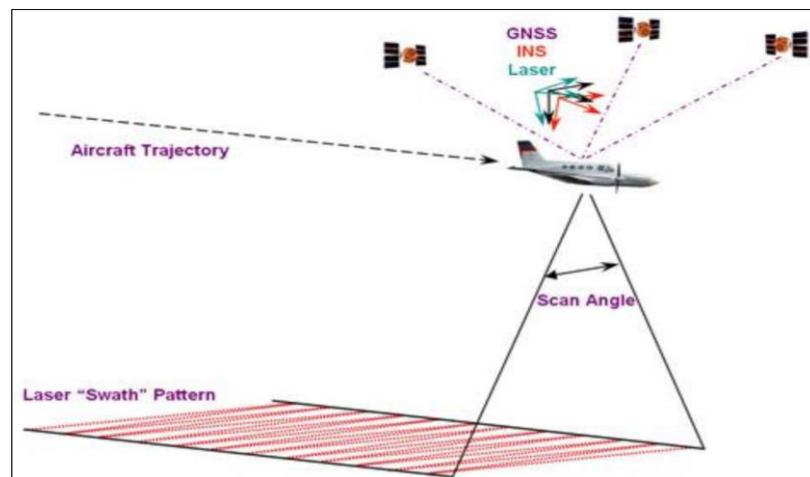


Figura 11: GPS Método OTF
Fuente: Huerta 2005

2.4 PPP (Precise Point Positioning)

De acuerdo con la Definición brindada por IGS (2019), el Posicionamiento de Punto Preciso o Precise Point Positioning (PPP) es un método de posicionamiento que determina posiciones exactas mediante un solo receptor GPS en combinación con correcciones de órbita (Efemérides) y relojes precisos. Los datos de corrección son proporcionados por el Real-Time Service (RTS) del International GNSS Service (IGS) cuya información está disponible para aplicaciones como investigaciones científicas, monitoreo geofísico, sincronización de tiempo, monitoreo de la constelación GNSS, entre otras aplicaciones como el posicionamiento geoespacial.

Un posicionamiento preciso del punto (PPP) se realiza usando los Parámetros de rotación de la tierra (ERPs), las órbitas SP3, y los relojes basados en los satélites de la combinación de IGS Final / Rapid, así como de los centros de análisis que contribuyen individualmente.

Según Paredes (2013) Como la medición no se realiza simultáneamente con otra estación en coordenadas conocidas, el servicio PPP no está limitado a una longitud de línea base, obteniendo resultados independientes de ajustes o realizaciones de redes planimétricas.

Por otra parte, Rizos (2012). Afirma que la disponibilidad, la fiabilidad y la precisión posicional del PPP dependen en gran número de satélites visibles. Actualmente, el software de procesamiento de PPP y los servicios en línea a menudo sólo procesan observaciones GPS, utilizando las órbitas de satélite de GPS precisa y las correcciones de reloj disponible por organizaciones como la IGS.

En 3.6.4 describiremos el uso del PPP para el procesamiento de los datos de navegación de la muestra de estudio con el software IPAS TC. A partir de los diferentes procesamientos con Precise Point Positioning con efemérides Rápidas y finales.

A continuación, veamos un cuadro comparativo del procesamiento con efemérides de acuerdo con sus intervalos. Tabla2.

Tabla 2: Tabla de precisión IGS – Real Time Service RTS

GPS Satellite Ephemerides / Satellite and Station Clocks	Sample Interval	Accuracy	Latency	Continuity	Availability
Broadcast (for comparison)	Orbits Sat. Clocks	1s ~100 cm ~5 ns RMS; ~2.5 ns Sdev	real time	Continuous	99.99%
Ultra-Rapid (predicted half)	Orbits Sat. Clocks	15 min ~5 cm ~3 ns RMS; ~1.5 Sdev	predicted	4x daily, at 03, 09, 15, 21 UTC	95%
Ultra-Rapid (observed half)	Orbits Sat. Clocks	15 min ~3 cm ~150 ps RMS; ~50 ps Sdev	3-9 hours	4x daily, at 03, 09, 15, 21 UTC	95%
Rapid	Orbits Sat. & Stn. Clocks	15 min 5 min ~2.5 cm ~75 ps RMS; ~25 ps Sdev	17-41 hours	daily, at 17 UTC	95%
Final	Orbits Sat. & Stn. Clocks	15 min Sat: 30 s; Stn.: 5 min ~2 cm 75 ps RMS; 20 ps Sdev	12-18 days	weekly, every Thursday	99%
Real-time	Orbits Sat. Clocks	5-60 s 5 s ~5 cm 300 ps RMS; 120 ps Sdev	25 seconds	Continuous	95%

Fuente: Gutiérrez 2016

2.4.1 Tipos de posicionamiento PPP

Existen distintos tipos de posicionamiento PPP, entre los cuales destacan, según la forma de obtención de la solución, los realizados en tiempo real y los realizados en Post-Proceso, además cada uno de estos posee un método estático y un método cinemático.

2.4.1.1 Posicionamiento PPP en post-proceso (PP-PPP)

Actualmente, PPP en post-proceso (PP-PPP) ofrece las precisiones más comparables a la técnica diferencial GPS, para esto además existen servicios gratuitos para llevar a cabo las soluciones, las cuales obtienen precisiones centimétricas. En este caso, los usuarios cargan archivos RINEX observados a estos servicios en línea o software (Como RTKLIB o BNC) y la solución es calculada de forma automática, sin embargo, este método requiere largas horas de medición para mejorar exactitudes.

2.4.1.2 Método PPP Cinemático

De acuerdo con la investigación realizada por Paredes (2013). Esta variante refiere a la aplicación del PPP para la determinación época-por-época de la posición de un receptor GPS en movimiento u operando de forma estacionaria. En el PPP cinemático, las características de la información precisa de los relojes satelitales (disponibilidad, calidad y resolución) es el factor más importante. Con la precisión actual de las órbitas precisas finales y, especialmente, de los relojes satelitales del IGS en el nivel de 0.1 ns (3 cm), el algoritmo del PPP cinemático puede aplicarse para fácilmente obtener posiciones absolutas con calidad sub-decímétrica, en los mismos tiempos para los cuales la información precisa sobre los relojes está disponible.

2.5 Procesamiento de datos de navegación

2.5.1 Estrategias con procesamiento con PPP

Huber (2010) El procesamiento con PPP (Precise Point Positioning) es una técnica mejorada de posicionamiento de un solo punto para mediciones de código o fase usando órbitas y relojes precisos en lugar de datos de emisión, ver figura 12.

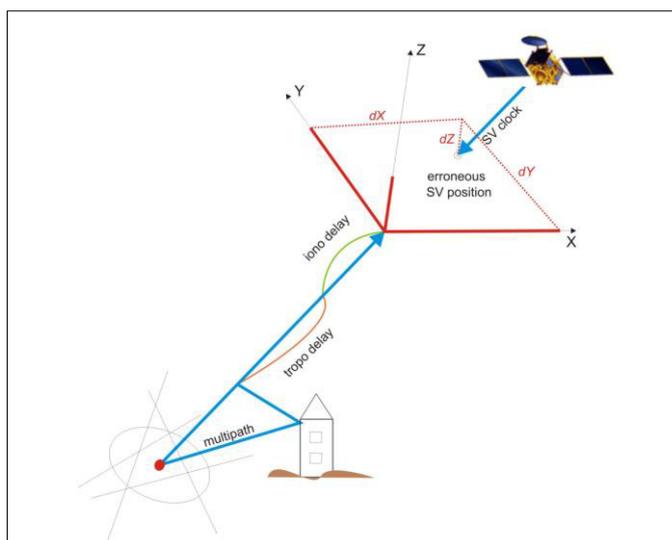


Figura 12: Posicionamiento por órbita y relojes precisos
Fuente: Hurber 2010

Para compensar los efectos ionosféricos, se utilizan mediciones de doble frecuencia para una combinación libre de ionosfera (véanse las ecuaciones (1) y (2) en la figura 13). En el caso de observaciones de frecuencia única debe aplicarse algún tipo de modelación de ionosfera. Los datos exactos y los modelos ionosféricos son proporcionados por organizaciones como el Servicio GNSS Internacional (IGS). PPP se considera como una técnica bastante rentable ya que permite un posicionamiento preciso con un solo receptor GNSS. Mediante la aplicación de PPP a las mediciones de doble frecuencia incluso puede lograrse centímetros o decímetros precisión.

$$\frac{R_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{R_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r + \Delta_{mp} \quad (1)$$

and carrier phases

$$\frac{\lambda_1 \Phi_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 \Phi_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2} = \rho + cdt_r + \Delta_{mp} + \frac{\lambda_1 N_1 f_1^2}{f_1^2 - f_2^2} - \frac{\lambda_2 N_2 f_2^2}{f_1^2 - f_2^2}. \quad (2)$$

Figura 13: Ecuaciones de corrección ionosférica usando PPP

Fuente: Huber 2010

Huber (2010) En comparación con los sistemas DGPS (GPS diferencial) y RTK (Cinemática en tiempo real), PPP tiene varias ventajas: un cliente o usuario PPP es completamente independiente, ya que no es necesaria ninguna estación base o red de estaciones base. Por lo tanto, PPP puede ahorrar mucho tiempo, recursos y volúmenes de datos que tienen que ser transferidos generalmente entre la referencia y el Rover. No hay necesidad de observaciones simultáneas y ningún límite estricto en el rango gracias a datos de corrección válidos global y regionalmente (órbitas de satélite, correcciones de reloj y retardos ionosféricos). Por lo tanto, es imaginable que en un futuro próximo el PPP será capaz de sustituir no sólo el post procesamiento de soluciones de red sino también el GPS diferencial en tiempo real o incluso el RTK en muchas aplicaciones.

Bisnath (2009) Hoy en día PPP se utiliza en la industria agrícola para la agricultura de precisión, en la hidrografía y el monitoreo de deformación. Otras aplicaciones de PPP son el posicionamiento del sensor en la cartografía de fondo marino y la construcción marina, así como la cartografía aerotransportada.

Para el procesamiento de PPP se requieren efemérides de alta precisión y datos de reloj. Estos datos se proporcionan libremente, por ejemplo, en el IGS. Una lista detallada de los productos proporcionados por IGS se puede encontrar en <http://igsb.jpl.nasa.gov/>.

En este momento se puede encontrar una variedad de motores PPP comerciales e incluso en línea. Los servicios en línea ofrecen la posibilidad de cargar archivos de observación de RINEX (Receiver Independent Exchange Format) para permitirles procesar completamente automatizados en un servidor. Los resultados se devuelven por correo electrónico o ftp en poco tiempo.

Algunas de las plataformas para el procesamiento son:

CSRS-PPP (Canadian Spatial Reference System)

Es un servicio PPP global gratuito en línea para el post procesamiento de datos GPS, disponible desde 2003

Web. <https://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/ppp.php>

GAPS by UNB

La Universidad de New Brunswick (UNB) de Canadá desarrolló un software para el procesamiento de PPP denominado GPS Analysis and Positioning Software (GAPS)

Web. <http://gaps.gge.unb.ca>

GrafNav by Waypoint

GrafNav es una herramienta de procesamiento de trayectoria cinemática para aplicaciones aerotransportadas, cuya característica es ofrecer un procesamiento para PPP. El software es capaz de procesar código de frecuencia simple y doble y observaciones de fase, así como archivos de órbita y reloj precisos. De acuerdo con Waypoint (2006), se pueden obtener precisiones de 10-20 cm para las encuestas aéreas típicas.

Web. <http://www.novatel.com/products/software/grafnav/>

Inertial Explorer by Waypoint

Novatel (2018) Inertial Explorer se ejecuta dentro del entorno de GrafNav – Waypoint y el análisis de datos se realiza con las mismas herramientas de trazado. Sin embargo, Inertial Explorer admite los dos modos de procesamientos siguientes:

Loosely Coupled (LC): La trayectoria GNSS se procesa en primer lugar y las actualizaciones de posición y velocidad de tiempo estampadas resultantes se pasan al procesador acoplado de forma holgada. En este modo de dos etapas, los usuarios pueden realizar un control extensivo de su trayectoria GNSS procesada antes del procesamiento LC.

Tightly Coupled (TC): En este modo, los datos GNSS e INS se procesan simultáneamente. Este modo es generalmente favorecido en desafiar las condiciones GNSS ya que maximiza la disponibilidad de GNSS, ya que se pueden aplicar actualizaciones de fase (que forman la distancia y la dirección recorridas entre épocas) cuando sólo hay dos satélites disponibles. Esto sirve para limitar

significativamente el crecimiento de errores inerciales en ausencia de una actualización completa de la posición GNSS. (mejorar traducción)

Web. <http://www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/>

Bernese Software v5.0 (BSW)

Aunque tradicionalmente el software de Bernese (BSW) v5.0 es una herramienta de procesamiento de doble diferenciación y utilizados por los institutos encargados de procesamiento de puntos SIRGAS, y desarrollado en el Instituto Astronómico de la Universidad de Berna (AIUB), también es capaz De analizar mediciones GNSS indiferenciadas en el modo de post procesamiento.

Web. <http://www.bernese.unibe.ch/>

IPAS TC

IPAS (2010) IPAS TC es un paquete de software que post-procesa datos IMU junto con datos GNSS en una metodología de integración fuertemente acoplada. Puede integrar datos GNSS en modo diferencial utilizando datos de receptores de referencia GNSS o en modo de posicionamiento de puntos preciso (PPP) utilizando datos GNSS de aeronave solamente junto con corrección de reloj precisa y efemérides precisas. IPAS TC proporciona interfaces para la importación y visualización de los datos brutos, la configuración de la configuración posterior al procesamiento, el procesamiento de los datos GNSS / IMU, así como la visualización y análisis de las soluciones calculadas finales.

Finalmente, existen también principalmente 3 tipos de datos PPP, los cuales son los siguientes:

- PPP Ultra Rápido
- PPP Rápido
- PPP Final

Los datos PPP, es información disponible y abierta al público, los datos se encuentran disponibles en:

https://cddis.nasa.gov/Data_and_Derived_Products/GNSS/orbit_products.html

2.5.2 Estrategias de procesamiento con Estación Base

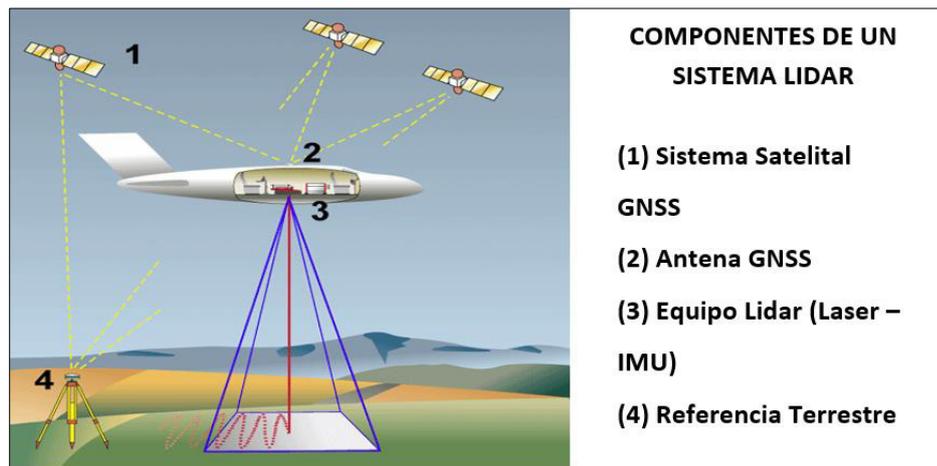
El procesamiento con estación base determina precisiones relativas ya que están referidas a un punto fijo sobre el terreno.

Este punto fijo de referencia puede ser puntos de referencias locales, puntos de la red geodésica nacional o puntos con disponibilidad de datos GNSS continuos, es decir estaciones de rastreo permanentes. En este procesamiento se presentan los siguientes casos:

Procesamiento con puntos de referencias, se debe entender que estos puntos físicamente son hitos de concreto y que deben poseer una ficha técnica de referencia sobre el cual se instala un receptor GNSS de doble frecuencia la configuración del

receptor debe tener relación con los datos del receptor GNSS del sistema LiDAR puesto en el avión, principalmente el tiempo de registro de los datos (conocidos como épocas).

Un segundo caso es disponer de información de las estaciones permanentes de rastreo, en este caso solo se requiere adquirir data de estas estaciones y su ficha técnica, el principal inconveniente es que normalmente las estaciones registran datos con época cada 5 segundos y ante esto el procesamiento del vuelo requiere de una interpolación. Como resultado de ello se reduce la precisión de la navegación.



*Figura 14: Componentes de un sistema LiDAR
Fuente: Elaboración propia*

Procesamiento LiDAR con estación Base, (figura 14, iconos 3 y 4), esto se refiere a que se emplea los datos colectados por un receptor GPS en tierra que registra datos GNSS en simultaneo con la aeronave.

2.6 Inertial Navigation System

En el capítulo 2.2.2 de Navegación hemos revisado los conceptos básicos acerca de la navegación Inercial y sus referencias. En este punto de la investigación profundizaremos el Sistema de Navegación Inercial (INS) en los sistemas aerotransportados. Recordemos que un sistema de navegación inercial (INS) comprende dos componentes principales.

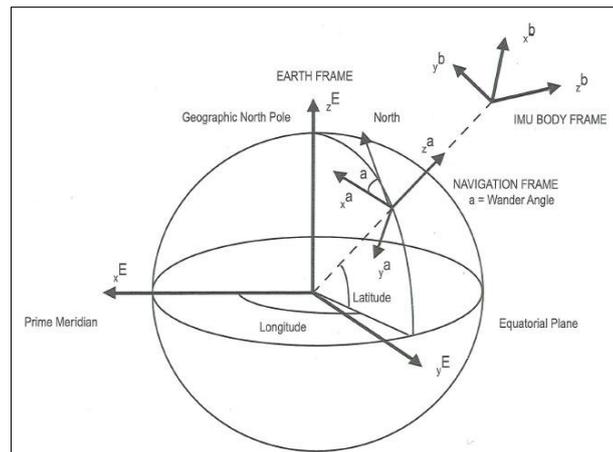
ASPRS (2010) La primera es la unidad de medición inercial (IMU), que comprende tres acelerómetros, tres giroscopios y la electrónica para proporcionar muestras codificadas digitalmente de los datos del acelerómetro y el giroscopio en una interfaz serial. Los acelerómetros se disponen como una tríada ortogonal que mide el vector de fuerza específica que es la suma vectorial del vector de gravedad local y el vector de aceleración experimentada por la IMU.

Los giroscopios son igualmente dispuestos en una tríada ortogonal que mide el vector de velocidad angular experimentada por la IMU. El vector de velocidad angular es la suma del vector de rotación de la Tierra, más el vector de velocidad angular experimentado por el IMU con respecto a la Tierra.

Una muestra típica digitalizada de la IMU es, a una frecuencia de muestreo de 50 a 1000 Hz, de la fuerza específica total y de velocidad angular de la IMU con respecto a una referencia inercial estacionaria típicamente referido como los principales. Las altas tasas de datos son necesarias para probar adecuadamente la dinámica de vibración a corto plazo, así como la dinámica del vehículo aéreo a largo plazo.

El segundo componente es el procesador de navegación (NP). Esto resuelve ecuaciones de movimiento de Newton de la IMU sobre la rotación en la Tierra basado en

las aceleraciones medidas y velocidades angulares. Con el fin de hacerlo, el NP debe establecer las direcciones locales Norte, Este y hacia abajo del sistema de coordenadas de navegación (ver figura 15) mediante un procedimiento llamado alineación.



*Figura 15: Diagrama de marcos de referencia usado en la navegación inercial
Fuente: ASPRS 2010*

ASPRS (2010) La determinación de la dirección hacia abajo se llama nivelación, y se basa en el supuesto de que el vector de gravedad local es la referencia vertical. Una vez que se completó la nivelación, los ejes horizontales del sistema referencia de navegación (ver figura 16) definen un plano que es tangente a la superficie del geoide local, y por lo tanto dice que se está en el nivel local. La alineación de un sistema de referencia de navegación de nivel local a la verdadera dirección norte se llama alineación de heading. Un mecanismo llamado gyrocompassing utiliza el componente horizontal del vector de velocidad angular de la Tierra como referencia de rumbo.

Un INS típica de una aeronave debe someterse a una alineación estacionaria que dura 10 a 30 minutos para alinear con precisión su sistema de referencia de navegación. A partir de entonces se desplaza libre de inercia, lo que implica que calcula su solución de

navegación usando solamente la aceleración y los datos de velocidad angular de la IMU sin correcciones posteriores a su solución alineación o posición.

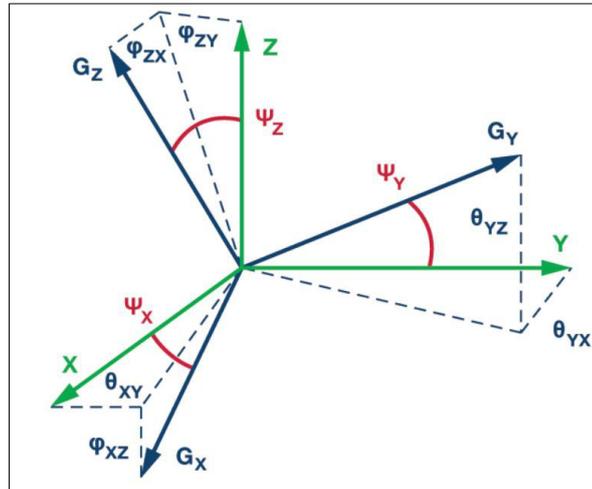


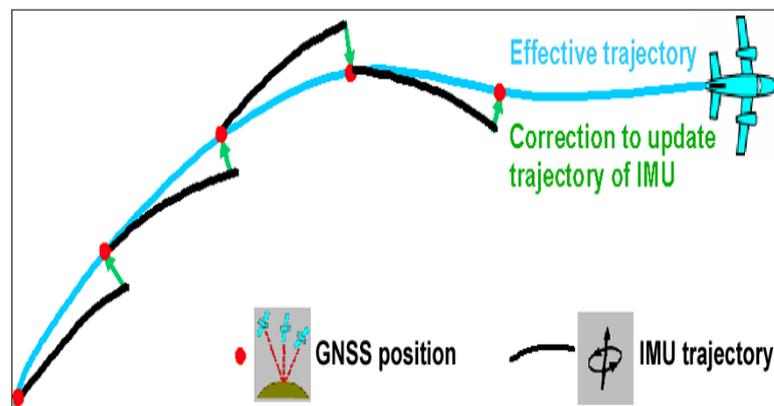
Figura 16: Ejes ortogonales de un giróscopo con errores de alineamiento típico
Fuente: ASPRS 2010

2.6.1 Integración GPS/IMU

Mediante la combinación de un receptor GPS con un INS utilizando un filtro de Kalman (Kalman Filter), se puede obtener la más precisa solución de navegación GPS, mientras se mantiene de manera sólida la capacidad de un INS, que proporciona la funcionalidad del sistema y las mediciones de actitud en presencia de cortes de la señal de satélite. Otro de los beneficios de la combinación de los dos sistemas es que cada sistema complementa las debilidades del otro muy bien.

De acuerdo con lo descrito por Neu (2004). El sistema GPS tiene un excelente rendimiento de baja frecuencia, pero pobre rendimiento de alta frecuencia; de un

segundo a otro, el error en la posición indicada puede cambiar por hasta varios metros, pero durante períodos más largos de tiempo el error de posición permanece relativamente constante. El INS tiene muy buen rendimiento de alta frecuencia, pero pobre rendimiento de baja frecuencia; durante un período muy corto de tiempo (segundos), el error en la posición indicada cambia muy poco, pero en cuestión de minutos u horas la posición se desplaza de manera significativa, del orden de kilómetros. Recordemos la figura de la Integración GPS IMU, figura 17.



*Figura 17: Integración GPS – IMU
Fuente: Leica ALS 70 User Manual*

Por su parte Gutiérrez (2003). Indica que un INS / GPS combinado tiene las ventajas de ambos sistemas y muestra un rendimiento muy bueno de baja y alta frecuencia. El filtro de Kalman es una forma común de implementar esta integración, existiendo también varios niveles diferentes de integración.

Un sistema de acoplamiento flexible (loosely-coupled) es uno que integra la solución de la posición tanto del INS y el receptor GPS. Este es el acoplamiento más fácil de implementar, pero sacrifica algunas de las ventajas de una mayor integración.

Un sistema fuertemente acoplado (tightly-coupled) utiliza los datos de pseudodistancia crudos desde el receptor GPS, la aceleración, las mediciones de velocidad angular de la unidad de medición inercial (IMU), la tríada giroscopio acelerómetro en el corazón de un INS.

La combinación de los dos sistemas de manera fuertemente acoplado (tightly-coupled) proporciona un rendimiento mejorado, permitiendo que el INS ayude al receptor GPS al seguimiento del recorrido, y permitiendo que las soluciones generales para utilizar los datos de GPS estén disponibles, incluso cuando estén disponibles menos de cuatro satélites.

Un diagrama de bloques de una integración fuertemente acoplado (tightly-coupled) se puede ver en la figura 18.

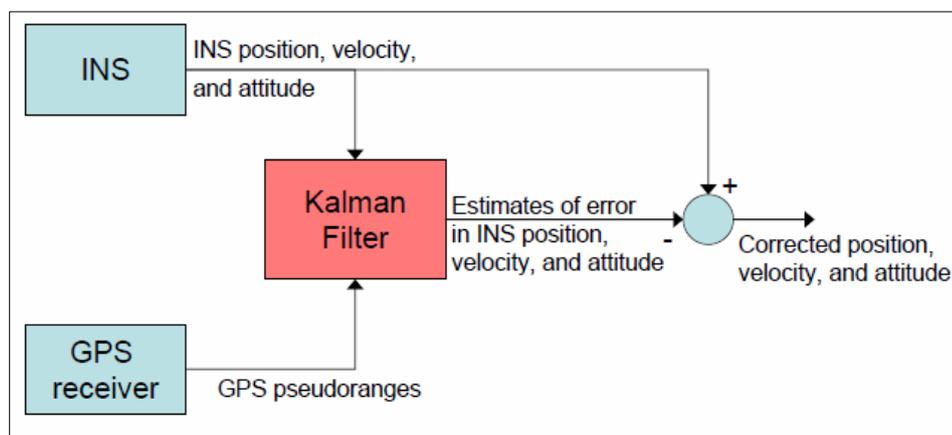


Figura 18: Diagrama de un procesamiento típico INS/GPS en modo tightly-coupled
Fuente: Gutiérrez, 2003

Esta figura muestra una implementación realimentada, lo que significa que al INS se le permite operar libremente una vez que se ha inicializado. Una implementación realimentada haría proporcionar periódicamente el INS con correcciones de filtro.

2.7 Modelo digital de terreno (DTM)

El desarrollo tecnológico permanente de nuestra época, nos ha llevado a obtener representaciones de la superficie terrestre con un mejor nivel de detalle, mayor precisión y en menor tiempo. Esta condición nos ha permitido utilizar los modelos de superficie en diversas aplicaciones como por ejemplo su uso en modelamientos hidráulicos, modelamientos viales, diseños de arquitecturas, cálculos de volúmenes, aplicaciones en software de navegación e incluso en aplicaciones de video juegos, siendo estos cada vez más utilizados. Sin embargo, la obtención y el nivel de precisión de un determinado modelo de superficie dependerá estrictamente del uso que sea asignado.

Kasser (2002) manifiesta que un modelo de elevación digital (DEM) es una representación digital y matemática de un objeto existente o virtual y su entorno, por ejemplo, ondulaciones del terreno dentro de un área seleccionada. DEM es un concepto genérico que puede referirse a la elevación del terreno, pero también a cualquier capa por encima del suelo, tales como toldos o edificios.

En general y en concordancia con la presente investigación, un DTM puede ser visto como una representación digital del terreno, dada por una cantidad mayor o menor de puntos referido a un sistema coordinado en 3 dimensiones (XYZ).

Sobre la extracción del DTM manifiesta que existen diversos métodos para obtener estos datos. A partir de los datos de entrada (primaria), que pueden ser distribuidos regularmente o no y a partir de un conjunto de datos que cubren un área (datos secundarios) este último crea un DTM por interpolación.

2.7.1 Modelos de superficies

Dependiendo del uso de la tierra este puede no solo ser directamente sobre el terreno, sino también en la parte superior de una casa o un árbol. Por ejemplo, partes de imagen que muestran un bosque denso dará lugar a una superficie en la parte superior de los árboles. Por lo tanto, sabemos dos definiciones diferentes de modelos de elevación

Citaremos a Linder (2009) para las definiciones de modelos de elevación. Modelo Digital de Terreno (DTM) y Modelo Digital de Superficie (DSM).

Modelo Digital de terreno (DTM) o a veces llamado Modelo Digital de Elevación (DEM): contiene valores de altura situados en la superficie verdadera del terreno (tierra). Tal modelo puede ser usado para generar curvas de nivel. Ver Figura 19.

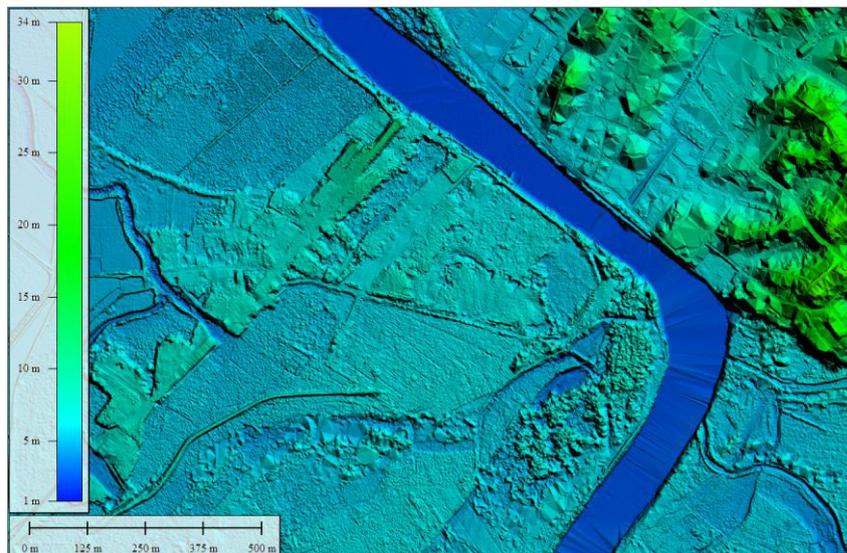


Figura 19: Modelo Digital de Terreno Obtenido por LiDAR
Fuente: Elaboración Propia

Modelo Digital de Superficie (DSM). Contiene valores de altura sobre la superficie de los objetos situados en el terreno. Tal modelo es necesario cuando debería crearse las orto-imágenes. Ver figura 20.



Figura 20: Modelo Digital de Superficie Obtenido por LiDAR
Fuente: Elaboración Propia

2.7.2 Estructura de un DTM

Históricamente, los modelos digitales de elevaciones se han dividido básicamente en dos grupos y en función de la concepción básica de la representación de los datos: vectorial y ráster, ver Tabla 3.

Los modelos vectoriales están basados en entidades (básicamente puntos y líneas) definidas por sus coordenadas. En los modelos ráster, los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan (referido a los pixeles que se unen en forma de mosaico) el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada.

Tabla 3: Resumen de las estructuras más usuales utilizadas para el almacenamiento de los modelos digitales de elevaciones

VECTORIALES	CONTORNOS	<p><i>SECUENCIAL</i>: las líneas se almacenan como cadenas de cotas.</p> <p><i>ANALÍTICA</i>: las líneas se almacenan como segmentos de Bézier, polinómicos, etc.</p>
	PERFILES	Cadenas paralelas de cotas en línea con altitud variable.
	TRIÁNGULOS	Red de triángulos irregulares (<i>TIN</i>).
RASTER	MATRICES	<p><i>REGULARES</i>: cotas sobre una malla cuadrada de filas y columnas equidistantes.</p> <p><i>ESCALABLES</i>: cotas sobre submatrices jerárquicas y de resolución variable.</p>
	POLÍGONOS	Cotas asignadas a teselas poligonales regulares (triángulos o hexágonos).

Fuente: Felicísimo 1994

A continuación, haremos una descripción de los modelos digitales más usados.

2.7.2.1 Modelo Ráster: matrices regulares GRID

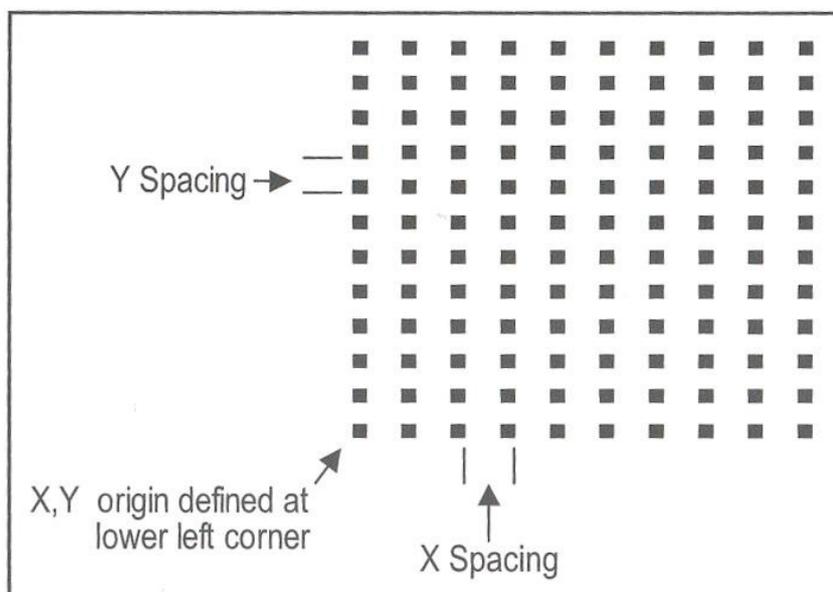
La estructura matricial tiene antecedentes relativamente remotos:

Chapman (1952) Propuso métodos de análisis topográficos basados en matrices regulares. Esta estructura es el resultado de superponer una retícula sobre el terreno y extraer la altitud media de cada celda (aunque habitualmente se utiliza

un valor puntual, asociado a cada nudo de la retícula o punto medio de la celda, con lo que esencialmente se construye un modelo vectorial de puntos).

La retícula puede adoptar formas variadas pero la más utilizada es una red regular de malla cuadrada con filas y columnas equiespaciadas. En esta estructura, la localización espacial de cada dato está implícitamente determinada por su situación en la matriz, una vez definidos su origen y el intervalo entre filas y columnas.

De lo anteriormente descrito, entendemos que una estructura de cuadrícula GRID o trama de distribución regular de puntos de altura en una cuadrícula igualmente espaciada en cada dirección de coordenadas (dx , dy) conduce a una estructura comparable a una imagen digital, ver figura 21.



*Figura 21: Estructura de un modelo regular GRID
Fuente: ASPRS 2010 Manual de Fotogrametría*

Una representación en cuadrícula evita la necesidad de almacenar puntos, espacios X e Y, y el tamaño de la cuadrícula. Estos valores se utilizan para calcular la ubicación de los valores Z almacenados en este formato. Esto es fácil de interpretar y ahorra espacio. Además, los formatos de cuadrícula a menudo son compatibles con los algoritmos de procesamiento de imágenes ráster. Como PCI, Erdas, PhotoScan, entre otros.

Las cuadrículas son fáciles de representar o mostrar como una imagen ráster. Los archivos de cuadrícula se pueden visualizar como imágenes de relieve sombreado o imágenes de contornos codificados por color.

Sin embargo, la debilidad inherente al modelar una superficie mediante el uso de rejillas de elevación es que no hay forma de colocar una elevación en una ubicación X, Y específica, como el pico de una colina o la cima de la cordillera, como se muestra en la figura 22.

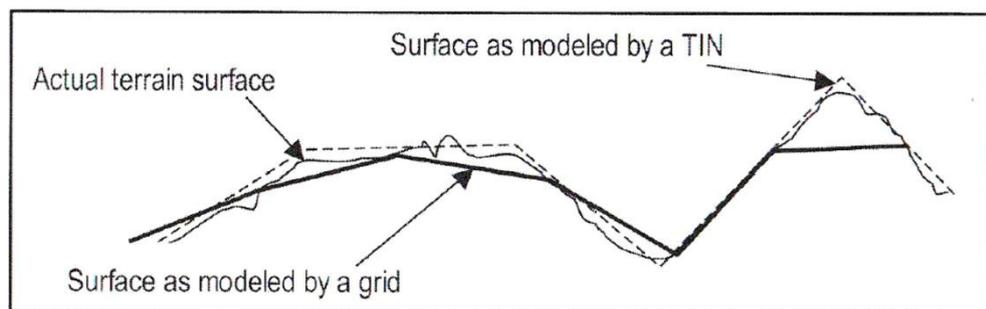


Figura 22: Modelamiento de un Grid vs TIN
Fuente: ASPRS 2010 Manual de Fotogrametría

2.7.2.2 Modelo Vectorial: red de triángulos irregulares (TIN)

La red de triángulos irregulares o red irregular triangulada es otro método muy común para modelar la superficie del terreno que utiliza puntos y líneas espaciados irregularmente. Este es un método útil porque puede modelar con mayor precisión la superficie del terreno y utiliza menos puntos que el método de la cuadrícula. Las crestas y los drenajes pueden estar bien definidos por interpretación, particularmente cuando el ser humano está involucrado en la extracción de datos.

Además, los datos lineales tridimensionales de líneas y de características como líneas de ruptura o más conocidos como breaklines y bordes de vías pueden agregar mejores detalles a la superficie final.

Estos puntos y líneas irregularmente espaciados típicamente se triangulan en una Red Irregular Triangulada (TIN) para modelar la superficie. Muchos métodos se utilizan para generar triángulos. Por lo general, los métodos intentan crear triángulos equiláteros, ya que son geoméricamente más fuertes (más precisos) para modelar la superficie. Dado que los métodos difieren, pueden producirse ligeras diferencias en la superficie generada.

En su mayor parte, no hay un estándar para la salida TIN. En cambio, este producto generalmente se genera como una distribución irregular de puntos y líneas. Por lo tanto, salidas como ASCII o como formato binario es la más común, y la formación de TIN ocurre sobre la marcha durante la generación de productos secundarios para elementos tales como contornos y secciones transversales.

Una superficie TIN a menudo modelará el terreno real con mayor precisión. Ver figura 22.

2.8 Definición de Términos Básicos

2.8.1 Abreviaciones y Acrónimos

ALS: Airborne Laser Scanning o Escáner Láser Aerotransportado

EGM2008: Earth Gravitational Model de 2008.

FOV: Field Of View (ángulo de escaneo)

GCP: Ground Control Points

GPS: Global Position System.

IGN: Instituto Geográfico Nacional – Perú

IGM: Instituto Geográfico Militar – Ecuador

IMU: Inertial Measurement Unit (Unidad de Medición Inercial).

INS: Inertial Navigation System (Sistema de Navegación Inercial).

Láser: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

LIDAR: Light Detection and Ranging

MPiA: Multiple Pulses in Air, según notación de los sensores LiDAR de Leica.

MDT: Modelo Digital del Terreno.

MDS: Modelo Digital de Superficies.

MDE: Modelo Digital de Elevaciones.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

PPP: Precise Point Positioning

SIG: Sistema de Información Geográfica.

SLR: Satellite Laser Ranging, sistema geodésico de medida de distancias a satélites reflectores mediante láser.

SNR: Signal Noise Ratio, relativo a la relación entre el ruido y la señal recibida por un sensor activo.

SPiA: Acrónimo de Single Pulse in Air según notación de los sensores LiDAR de Leica.

TIN: Acrónimo de Triangulated Irregular Network.

WGS84: Acrónimo de World Geodetic System de 1984.

2.8.2 Glosario de Términos

Loosely-Coupled: El método de acoplamiento débil (LC) es un método de procesamiento de dos etapas donde una trayectoria inercial se procesa con actualizaciones de una trayectoria GNSS previamente calculada. En la mayoría de los casos, se sugiere obtener actualizaciones de GNSS a partir de la solución combinada; sin embargo, se puede seleccionar un archivo GNSS alternativo (trayectoria externa).

Tightly-Coupled: El método estrechamente acoplado (TC) procesa datos GNSS e INS simultáneamente. Este suele ser el método preferido para calcular datos GNSS y conjuntos de datos inerciales.

Kalman Filter: Welch (2001) El filtro de Kalman es esencialmente un conjunto de ecuaciones matemáticas que implementan un estimador predictor-corrector que es óptimo en el sentido de que minimiza la covarianza estimada de error (análisis estadísticos), cuando se cumplen algunas condiciones presuntas.

2.9 Marco Legal y Normativo

2.9.1 Marco Legal

En cumplimiento del marco legal que regula la producción cartográfica, se mencionan los siguientes:

RJ N° 086-2011-IGN/OAJ/DGC “Se establece oficialmente el uso del Sistema de Referencia Geodésico 1980 – Geodetic Reference System 1980 (GRS80). Para efectos prácticos como elipsoide puede ser utilizado además el World Geodetic System 1984 (WGS84)” 03 Mayo 2011

RJ RESOLUCIÓN JEFATURAL N° 0066-2016 /IGN/OAJ “Actualización de los cuarenta y cinco (45) Formularios de Información de las Estaciones GNSS Permanente que se procesaron en el presente año (2016), para su empleo en las actividades geodésicas y topográficas”. 30 Mayo 2016

2.9.2 Marco Normativo

El desarrollo de esta investigación ha empleado normas técnicas nacionales e internacionales, para las diversas etapas de estudio que van desde la obtención de los datos, procesos, análisis y precisiones. Los documentos normativos se enumeran a continuación:

La Resolución Jefatural 089-2011 – IGN/JEF/OGA del Instituto Geográfico Nacional del Perú, aprueba las “Especificaciones Técnicas para la Producción de Cartografía. Escala 1:1000” que tiene como fin establecer Lineamientos técnicos para definir los estándares y las actividades mínimas que se debe cumplir en todo levantamiento cartográfico permitiendo a las entidades productoras conformar un sistema estructurado.

Manual de Carreteras “Especificaciones técnicas generales para construcción EG-2013” del MTC Dirección general de caminos y Ferrocarriles. Perú

Especiaciones Técnicas Generales de levantamiento de información mediante SENSOR LIDAR aerotransportado. Version1. 2016. Instituto Geográfico Militar. Ecuador.

III. MÉTODO

3.1 Tipo de Investigación

3.1.1 Método

La metodología que se aplicara para la realización de la presente investigación será el método topográfico por levantamiento LiDAR Aerotransportado, en esta investigación daremos a conocer la implementación de este tipo de levantamientos aplicados a un proyecto vial, así mismo se indicara los procedimientos para la preparación de un plan de vuelo, procesamiento de vuelo, obtención, análisis y validación de superficies desde una nube de puntos LAS, obtenidas del procesamiento con PPP de la muestra de estudio.

Esta investigación es de carácter descriptivo y será apoyado por métodos, y estrategias para el cálculo del procesamiento GPS-IMU procesamiento de datos y aplicación de estrategias para la clasificación de la nube de punto, con la finalidad de obtener el DTM de nuestra muestra de estudio. En atención a los objetivos planteados, la validación de los resultados consistirá en dos pruebas:

Primera prueba, consiste en evaluar las discrepancias de los puntos de control con los valores de la nube de punto LiDAR obtenidos con PPP Ultra rápido y con PPP final. Y contrastarlo con las precisiones exigidas por el IGN para la obtención de cartografía a escala 1:1000.

La segunda prueba, consiste en analizar y evaluar las discrepancias mediante la comparación del DTM a través de perfiles transversales obtenidos de una superficie validada ajustada con puntos de control y las superficies obtenidas con PPP Ultra rápido y final.

3.1.2 Diseño de Investigación

A continuación, en la figura 23, se muestra el flujo de trabajo utilizado en la presente investigación y como aporte para un levantamiento topográfico LiDAR en proyecto Vial.

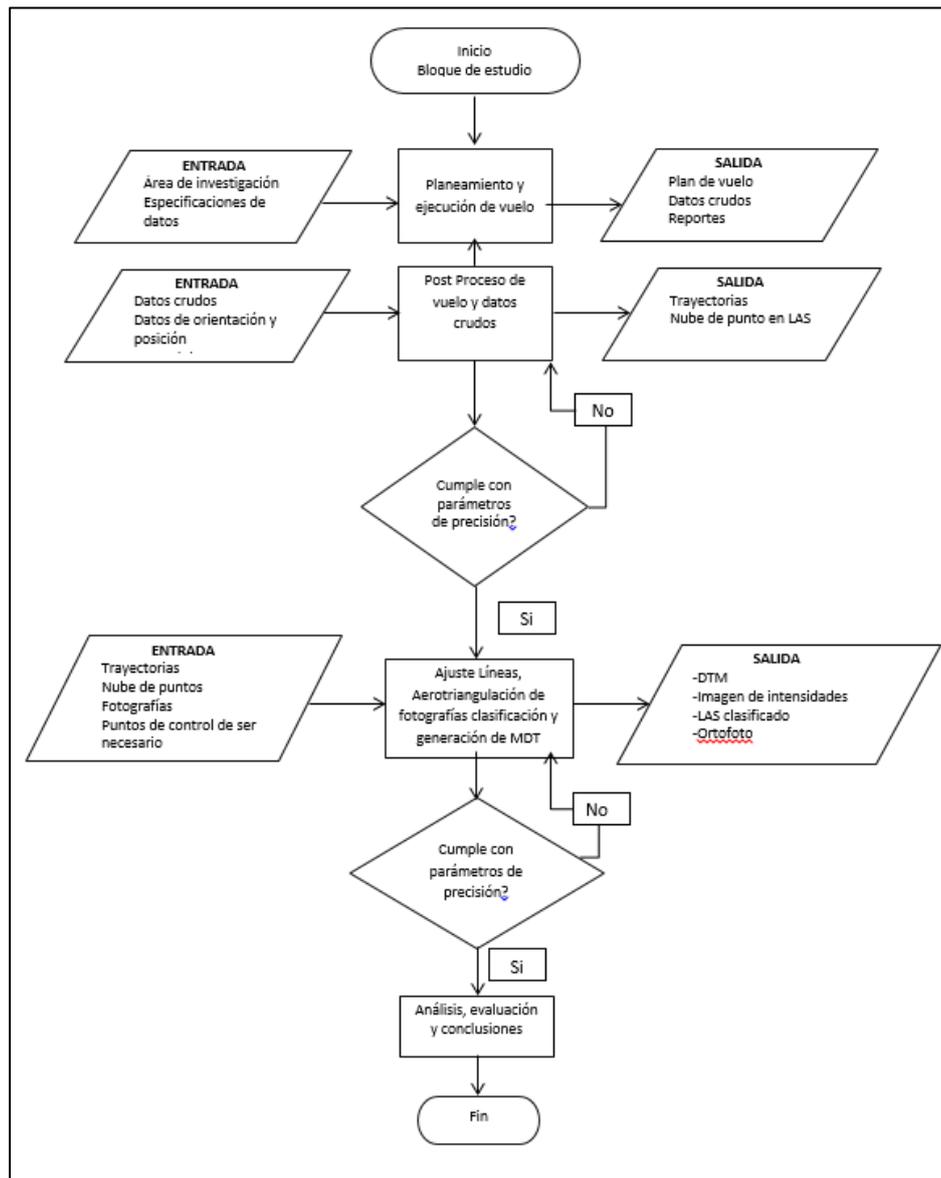


Figura 23: Diseño de Investigación
Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.1 Planeamiento y ejecución de vuelo

En este punto de la investigación haremos una descripción general del plan de vuelo ejecutado por la empresa Global Mapping, a fin de establecer la idea base de la misma.

Debemos tener en cuenta que la velocidad de vuelo, altitud y ancho de cobertura por cada línea de vuelo está en función a la densidad de puntos x m² que se requiera. También debemos considerar los desniveles propios del terreno mayores a 500m, ya que en los puntos bajos del terreno se obtendrá una menor densidad de puntos o carencia de información por pérdida de retorno en los pulsos del láser. Para ello se deberá reducir el Angulo de barrido del LiDAR, para tener una cobertura sobre terrenos con menor desnivel. Otra opción también es aumentar la potencia del láser y reducir la frecuencia de barrido lo que conllevara a una reducción de la velocidad a fin de mantener la densidad de puntos indicada.

En áreas con un nivel de elevación uniforme como en la costa, se puede aprovechar todo el potencial del sensor LiDAR, pudiendo elevar la altitud de vuelo para tener un mayor ancho de recubrimiento.

A continuación, la tabla 4 muestra un esquema del planeamiento de vuelo desarrollado por la empresa Global Mapping en la captura de información del presente estudio.

Tabla 4: Plantilla de información de plan de vuelo

Global Mapping		PLANTILLA DE INFORMACIÓN DE PLAN DE VUELO				GP-F-19 V01/ Vigente desde : 10.01.2018	
01 - Especificaciones del Proyecto							
Cliente		Nombre Del Proyecto			Escala	Puntos/m ²	
Global Mapping		LiDAR-PPP			1/1000	6	
Avion	Autonomia	LiDAR	Camara	Proyección	Datum		
OB1967	4	ALS70-HA	IXU-1000	UTM17 S	Sirgas2000		
02 - Movilización de la Aeronave							
Base Avión	Pisco		Base Operaciones		Trujillo		
	Distancia (km)	Distancia (nm)	Velocidad (knots)	Velocidad (km/h)	Ferry ida y vuelta (horas)		
Base Avión - Base Operaciones	868.000	468.683	170	314.84			
Base Operaciones - Área Trabajo	151.000	81.533	170	314.84	0.959		
03 - Información LiDAR							
# líneas	# Fotos	Tiempo total de vuelo (min)			Misiones	Puntos / m ²	GSD (cm)
		Area (min)	Vueltas (min)	Llegar al área			
14	400	16	56	57.6	1	6	7-10
		72					
		129.55					
Form. Camara	Angulo Escan	Freq. Scan	Freq. Pulso	Min Alt MSL	Max Alt MSL	Max Sidelap	Min. Sidelap
LANDSCAPE	27	61.8	248.00	1646.00	4921	30%	20%
Area/Eje	Pot. Laser	Sigma xy	Sigma z	Velocidad	Mpia / Spia		
60 Km	68%	11	7.00	120 knots	Spia		
04 - Información de las Líneas de Vuelo							
Flight Line Label	Flight Line #	# Fotos por Línea	Min Alt AGL [ft]	Max Alt AGL [ft]	Alt MSL [ft]	Length [nm]	Tiempo [Seg]
A02	1	8	3549	3608	3874	0.94	16.9
A03	2	16	3490	3608	3900	2	36.1
A04	3	29	3290	3608	3917	3.68	66.3
A05	4	18	3307	3615	3933	2.22	39.9
A06	5	19	3323	3608	3930	2.36	42.6
A08	6	55	2756	3612	4035	6.81	128.1
A09	7	56	3162	3615	3966	7.07	127.3
A11	8	31	3162	3608	4176	3.85	69.4
A13	9	32	2129	3608	4303	3.2	70.3
A14	10	59	1646	3608	4747	5.3	161.9
A15	11	17	3314	4921	6414	2.2	39.5
A19	12	27	2543	4265	5735	3.03	59.9
A20	13	19	3244	4271	5452	2.37	42.6
A21	14	14	3202	4265	6394	1.58	28.5

Fuente: Global Mapping

Durante el vuelo es necesario tener un control de las líneas a volar, y revisar los indicadores de velocidad, altitud, GPS-IMU, almacenamiento de información y asignación o cambio de línea de vuelo ante la necesidad de hacerlo, sea por condición meteorológica adversa o por maniobra de vuelo.

A continuación, en las figuras 24 y 25 se muestra una vista del monitoreo de vuelo.

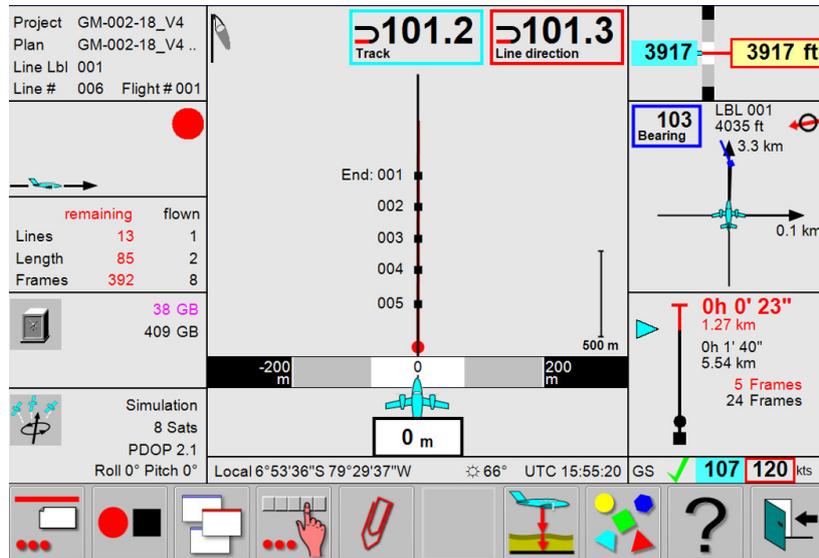


Figura 24: Control de vuelo, verificación de altitud, dirección y velocidad
Fuente: Elaboración Propia

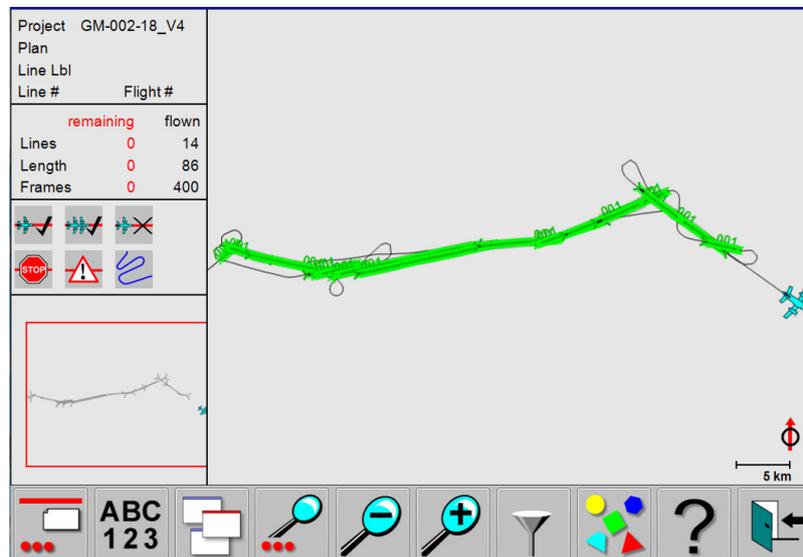


Figura 25: Seguimiento de ejecución de líneas de vuelo sobre eje de carretera.
Fuente: Elaboración Propia

3.1.2.2 Post Proceso de vuelo

En el post proceso de vuelo se realizaron los cálculos para la determinación de trayectorias de vuelo mediante la combinación de datos GPS – IMU, tal como se indica en el punto 2.5.1. En donde he explicado que los datos IMU-GPS se combinan a determinadas frecuencias, utilizando el programa de post procesamiento que para este caso es el IPAS TC. Así, en lugar de tener posiciones conocidas a cada medio segundo se obtienen posiciones a cada 0.005 segundos o 200 posiciones por segundo. Las trayectorias determinadas se encuentran en una extensión *.trj, propias del software de procesamiento IPAS TC, sin embargo, también es capaz de generar un archivo de trayectoria en formato SBET (Smooth Best Estimated Trajectory). El objetivo final del post proceso de vuelo es determinar la posición del sensor láser en cada momento de la trayectoria de vuelo, para posteriormente obtener los valores de X, Y, Z de cada posición y el valor de intensidad en cada punto determinado por el retorno o eco del Laser. Ver figura 26.

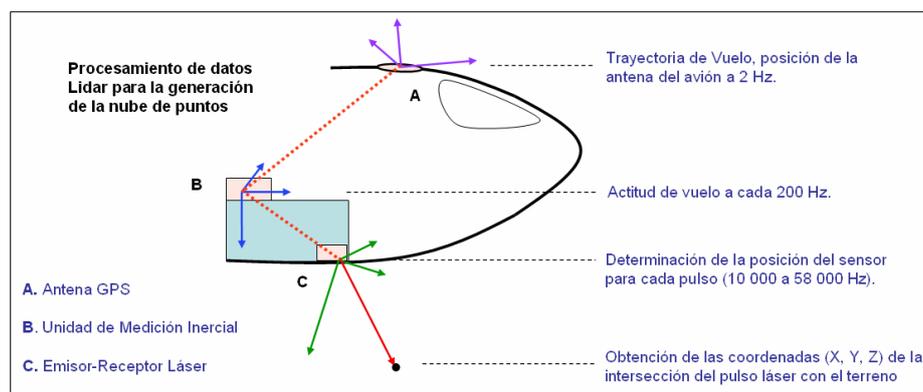
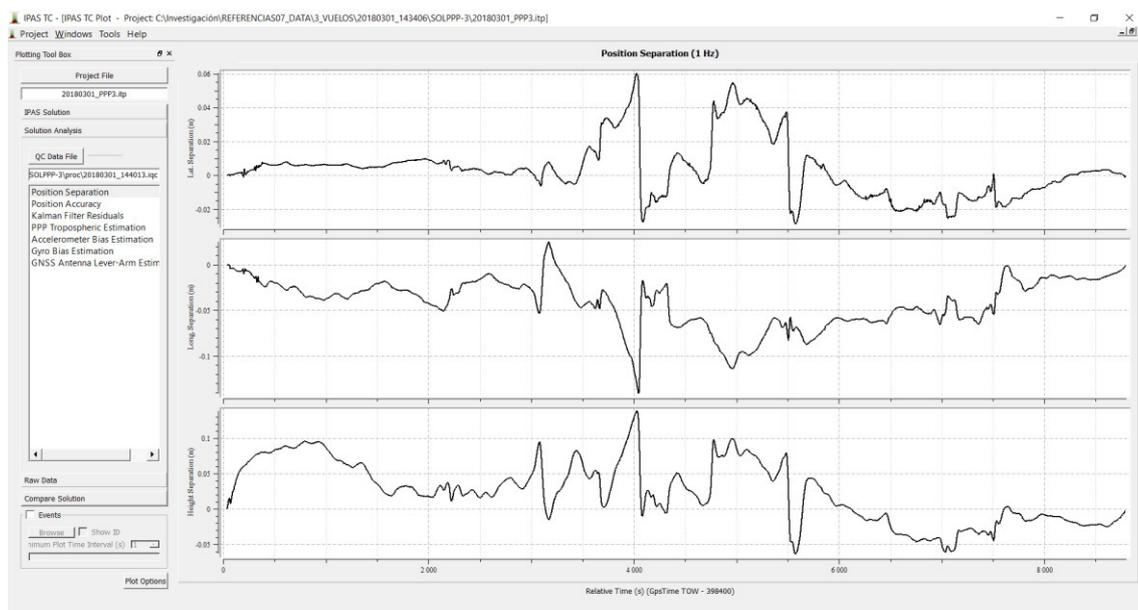


Figura 26: Combinación de Sensores para determinación de trayectorias y valores XYZ
Fuente: IPAS TC

El punto de referencia para los valores finales puede ser una estación en terreno, es decir datos de un GPS sobre un punto con coordenada conocida o los valores PPP, estas dos referencias entre las más conocidas.

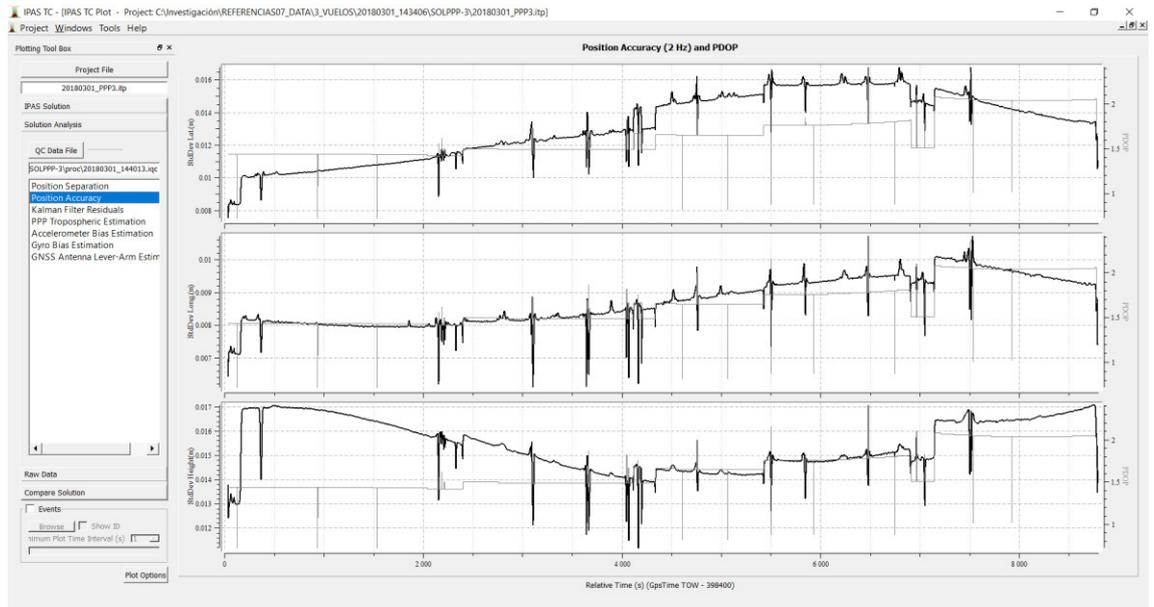
Para efectos de la presente investigación y como se indica en los objetivos realizaremos el procesamiento con PPP a fin de demostrar que los resultados obtenidos con este procesamiento son confiables.

A continuación, se muestra en la figura 27 el resultado de la exactitud de la trayectoria procesado con PPP, con residuales en trayectoria < a 15cm



*Figura 27: Procesamiento de Trayectoria - Resultado de exactitud
Fuente: Elaboración Propia*

También, se muestra la figura 28 el resultado de la precisión de la trayectoria procesado con PPP, con residuales < a 5cm.



*Figura 28: Procesamiento de Trayectoria - Resultado de precisión
Fuente: Elaboración Propia*

3.1.2.3 Generación de DTM

Durante esta etapa se realizará el procesamiento de la nube de puntos obtenidas con las trayectorias procesadas, en un inicio esta nube de puntos dispuestas en bandas de barrido requiere de un ajuste de líneas de vuelo y posteriormente un proceso clasificación, con el fin de obtener el modelo digital del terreno (DTM), modelo digital de elevaciones (DEM) y las curvas de nivel. Los datos ya ajustados posteriormente se anexarán en un único proyecto, para ejecutar sobre ellos rutinas de clasificación de tipo automática, en base a dos clases o categorías:

- Puntos que constituyen el Terreno
- Puntos que No pertenecen al Terreno, por ejemplo, vegetación o infraestructuras.

Para llevar a cabo la clasificación automática, se emplearán herramientas de clasificación y algoritmos o macros que contienen instrucciones de clasificación de acuerdo con el tipo de terreno.

El software que se ha empleado para esta actividad es el Terrascan, en combinación con TerraMatch y TerraModeler. A continuación, se describen los procedimientos para realizados en el ajuste de líneas, clasificación de nube de puntos y obtención de DTM.

Tabla 5: Procedimientos de Edición LiDAR

PROCEDIMIENTO	MODULO	DESCRIPCION
CARGAR ARCHIVOS *.LAS DENTRO DEL PROYECTO	TerraScan	Importación de los archivos *.LAS del proyecto, transformación al sistema de coordenadas del proyecto
IMPORTACION DE TRAYECTORIAS	TerraScan y TerraPhoto	Importación de trayectorias, transformación al sistema de coordenadas del proyecto
CRACION DE PROYECTO Y DISEÑO TILES	TerraScan	Creación de proyecto en TerraScan y subdivisión del área de trabajo en bloques para la distribución de los trabajos de edición en diferentes Workstation.
EJECUCION DE 1RA MACRO "GROUND PER LINE"	TerraScan	Macro para diferenciar los puntos de terreno en cada línea de vuelo
EJECUCION DE 2DA MACRO "DEFAULT"	TerraScan	Macro para diferenciar los puntos de terreno en cada dos puntos en default
EJECUCION DE 3RA MACRO "DEDUCE LINES"	TerraScan	Macro para relacionar los puntos con las trayectorias de vuelo
DIFERENCIACION DE TRAYECTORIAS	TerraMatch	Emplear el módulo TerraMatch para la diferenciación de trayectorias, este proceso prepara los datos para el ajuste de líneas.
AJUSTE DE LINEAS	TerraMatch	Realizar el ajuste de líneas mediante el proceso "Find Fluctuation" de líneas, donde se determinará los errores en las líneas y posterior ajuste.
EJECUCION MACRO "CUT OVERLAP"	TerraMatch	Realizar un corte de los bordes de las líneas de vuelo con sobre posición.
GENERACION DE MODELO DIGITAL	TerraModeler	Creación del modelo digital del terreno posterior al ajuste de líneas, en este proceso se integrarán los puntos de control y el levantamiento topográfico.
GENERACION DEL MODEL KEY POINT	TerraScan y TerraModeler	Clasificación de los puntos clave para el modelamiento final del terreno.
EJECUCION DE MACRO "CONTOUR KEY POINT"	TerraScan y TerraModeler	Generar los puntos clave para triangulación de las curvas de nivel.
GENERACION DE CURVAS DE NIVEL	TerraModeler	Finalmente en este proceso se obtienen las curvas de nivel, en donde se realizará un filtrado para exportar a diferentes formatos.

Fuente: Elaboración Propia

3.2 Ámbito Temporal y espacial

3.2.1 Ámbito Temporal

Los datos utilizados en la presente investigación corresponden al periodo 2017 y 2019, siendo el primer año el periodo de captura de información y procesamiento cartográfico definitivo realizado por la empresa Global Mapping, A partir del 2018 se realizó el procesamiento de los datos con PPP Rápidas y PPP Precisa para su utilización en la presente investigación, así mismo durante ese mismo se recopiló la información bibliográfica de apoyo y la elaboración de la metodología. Durante el 2019 se ha realizado el análisis de los resultados y la culminación de la presente investigación.

3.2.2 Ámbito Espacial

La presente investigación se ha realizado en las oficinas del área de Geomática de la empresa Global Mapping con datos del levantamiento topográfico LiDAR sobre un eje de 50 km próximos a los límites del Departamento de Lambayeque, provincia Chiclayo, distritos de Oyotun, Nueva Arica y Cayalti y un tramo ubicado en el Departamento de Cajamarca, provincia de San Miguel, distrito de La Florida,

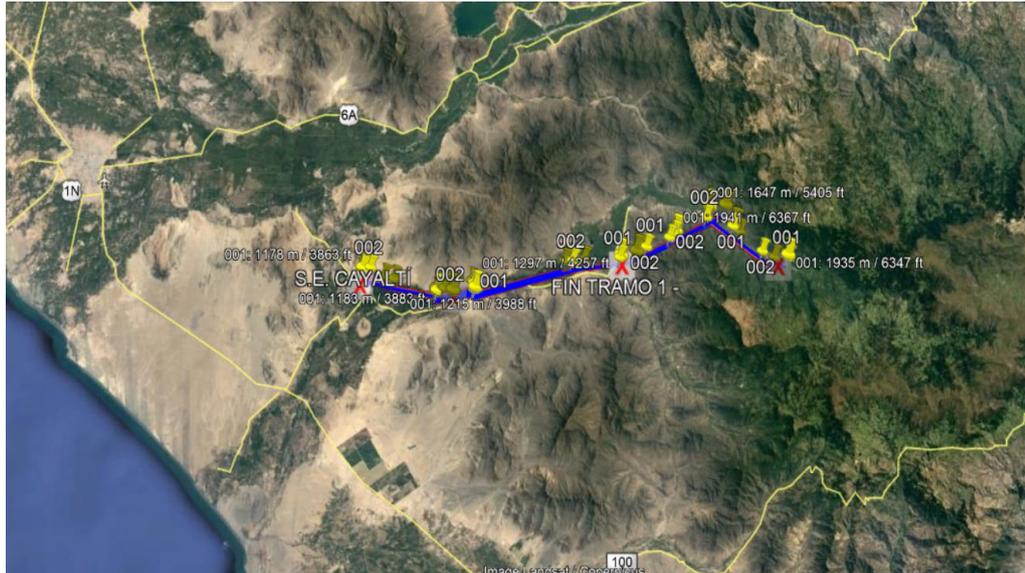


Figura 29: Ubicación geoespacial de la muestra
Fuente: Elaboración Propia

3.3 Variables

Las variables por considerar en la presente investigación son las siguientes:

3.3.1 Variable dependiente:

Tabla 6: Variable Dependiente

VARIABLE DEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	TECNICAS	INSTRUMENTOS
Modelamiento de superficie- Topografía LiDAR	Evaluación de precisión	Línea de dispersión	Comparación	Estación de trabajo y software de edición LiDAR.
	Validación de resultados	Tolerancia, según escala de referencia 1/1000	Extracción de modelamiento MDT	

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Variable Independiente:

Tabla 7: Variable Independiente

VARIABLE INDEPENDIENTE	DIMENSIONES	INDICADORES	TECNICAS	INSTRUMENTOS
Procesamiento de Datos PPP	PPP-Efemérides Rápidas. Disponibilidad posterior de 3 a 9 horas.	Residuales de procesamiento	Transferencia electrónica	Internet
	PPP-efemérides Precisas. Disponibilidad posterior de 12 a 18 días.	Residuales de procesamiento	Transferencia electrónica	Internet
Nube de puntos	Área	Nro. de puntos x m2 (Densidad)	Captura según patrón de escaneo	LiDAR Aerotransportado
Clasificación de nube de puntos	Operación de edición LiDAR	Etapas de procesamiento de nube de puntos	Clasificación Manual / Automática	Estación de trabajo y software de edición LiDAR.

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Población y muestra

La población de estudio corresponde a un levantamiento con LIDAR aerotransportado realizado en el Departamento de Lambayeque, provincia Chiclayo, distritos de Oyotun, Nueva Arica y Cayalti y un tramo ubicado en el Departamento de Cajamarca, provincia de San Miguel, distrito de La Florida, el vuelo ha recubierto 50 km lineales y con un ancho de faja de 700m. La muestra que emplearemos en la presente investigación es sobre los 50 Km lineales del eje y un ancho de 30m, las características de los datos se describen a continuación:

Tabla 8: Información de la muestra

INFORMACION DE DATOS	Vuelo
Ubicación	Chiclayo - Cajamarca
Tipo de datos	Ficheros LAS
Longitud de levantamiento	50 Km
Ancho de levantamiento	0.6 Km
Ancho procesado (muestra)	30m
Altura de vuelo MSL	100m - 1500m
Fecha de datos	Febrero 2017
Sensor LiDAR	ALS 70 HA Leica
Densidad de Puntos	6 punto x m ²
FOV (Field Of View)	27 Grados
Tipo de imagen	RGB 10 cm
Tamaño de píxel	10 cm

Fuente: Elaboración Propia

3.5 Instrumentos

3.5.1 Sensor LiDAR Aerotransportado (ALS 70 HA)

El LIDAR aerotransportado, es un sensor activo que consiste principalmente de un telémetro emisor de luz láser, de un espejo para el desvío del haz de luz, un sistema INS y GPS. El sensor empleado en esta investigación es el ALS 70 HA Leica, de propiedad de la empresa Global Mapping. Ver figura 30.



*Figura 30: Equipo LiDAR Aéreo ALS 70HA Leica
Fuente: Especificaciones técnicas ALS 70HA Leica*

Tabla 9: Información específica de equipo LiDAR

INFORMACION ESPEFICICA DE ALS 70 HA	
Marca	Leica
Modelo	ALS 70 HA
N° Serie	7171
Campo de barrido (FOV)	75 grados
IMU	CUS6-Micro IRS
Precisión Horizontal	5 cm-54 cm
Precisión Vertical	7 cm-21 cm

Fuente: Elaboración Propia

3.5.1.1 Especificaciones Técnicas del ALS 70 HA

Overview of Leica ALS70 specifications					
LS70 and LS70-LP Laser Scanner (no handles)					
Dimensions	602mm (flight direction) x 369mm W x 273mm H (255mm on LS60-LP)				
Weight	42.3 kg with CUS6 IMU				
Laser	See Chapter 6, Table 1				
Max Pulse Rate	250 kHz (500 kHz effective on LS70-LP)				
Max Scan Rate	100 Hz (200 kHz effective on LS70-LP)				
Scan Pattern	Sinusoidal, via closed-loop galvanometer actuation				
Orientation Measurement	IPAS IMU triangle or raster				
Real-time view					
Type	WebCam				
FoV	54 Degrees along-track, 65 Degrees cross-track				
Resolution	1280 x 1024 pixels				
GNSS/IMU system					
General	Leica IPAS20 embedded in System Controller				
GNSS receiver	Internal 54 - channel dual frequency GNSS (GPS and GLONASS) receiver L1/L2, low noise, 20 Hz raw data, DGPS ready GPS and GLONASS				
IMU	Integrated and rigidly mounted in Laser Scanner Different IMU types are available. See Table 1 See IMU specifications. (Not part of Leica ALS70 Documentation)				
Real-time solution	Deeply coupled GNSS/IMU solution				
GNSS/IMU data storage	On MM70 removable solid state disk mass memory				
Table 1. IMU supported by Leica ALS70					
Leica IMU Model	IMU manufacturer	IMU type	High performance gyros	Weight kg	Dimension W x L x H mm
NUS4	iMAR	iIMU-FSAS	200 Hz Fiber Optic Gyro	1.9	128 x 116x 98
DUS5	Northrop Grumman	LN200	200 Hz Fiber Optic Gyro	0.75	89 x 89 x 85
NUS5	SAGEM	33BM61	500 Hz Dry-tuned Gyro	2.0	120 x 150 x100
CUS6	Honeywell	Micro IRS	200 Hz Ring Laser Gyro	4.45	165x 163x 163

Figura 31: Especificaciones Técnicas del ALS 70 HA
Fuente: Leica ALS 70 User Manual Vol1 Chapter 7 Technical data

3.5.1.2 Funcionamiento de LiDAR Aerotransportado

El funcionamiento del LiDAR Aerotransportado es una secuencia larga de procesos, electrónicos, mecánicos, computacionales y supervisión, detallar cada proceso sería un tema interesante sin embargo desarrollarlos nos alejaría del objetivo del presente estudio.

Por consiguiente, esencialmente el funcionamiento de un LiDAR Aéreo y en congruencia con la definición brindada por Inegi (2016), consiste en la emisión de

un haz de luz que se desvía a través del espejo perpendicularmente a la trayectoria del avión, generando una serie de pulsos de luz que al entrar en contacto con los objetos o el terreno refleja al sensor parte de la energía del pulso emitido. Una característica distintiva de los retornos en zonas de vegetación es que éstos se pueden producir a diferentes niveles, siendo posible que el último retorno se produzca al nivel del terreno.

3.5.1.3 Datos Generados

Los datos que se obtienen principalmente del LiDAR Aerotransportado son principalmente la nube de puntos.

Las nubes de punto inicial son grandes colecciones de puntos de elevación 3D, que incluyen x, y, z, junto con atributos adicionales como marcas de tiempo GPS. Las entidades de superficie específicas que el láser encuentra se clasifican después de que la nube de punto LIDAR inicial es post procesada. Las elevaciones de la tierra, los edificios, canopy forestal, pasos elevados de autopista, y todo lo demás que el rayo láser encuentra durante la encuesta constituye los datos de nube de punto.

Recordemos que también se generan datos de navegación GPS – IMU. En el capítulo 2.2.2. mencionamos que su procesamiento combinado GPS-IMU define la trayectoria de la aeronave durante su misión de vuelo.

La trayectoria de vuelo como resultado del post proceso GPS-IMU se realizará en el software IPAS TC, ver figura 32. Y la nube de puntos en el ALS PP.



*Figura 32: Splash Screen de inicio de IPAS TC
Fuente: Ipas TC*

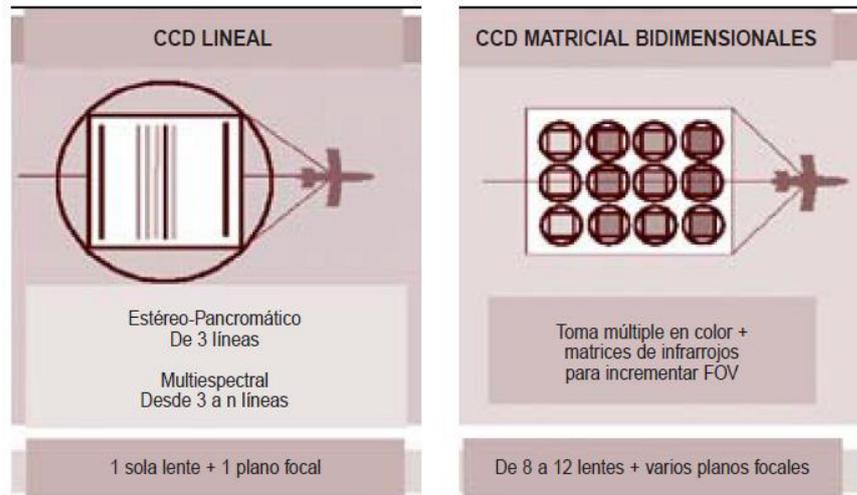
3.5.2 Cámara Aérea Métrica Digital (iXU-RS 1000)

3.5.2.1 Cámara Métrica Digital

Las cámaras aéreas digitales, actualmente ya han reemplazado a las cámaras aéreas analógicas, debido fundamentalmente a las mejoras en calidad geométrica y radiométrica, así como por la posibilidad de tener en un solo sensor y de forma simultánea el espectro pancromático, RGB e IR.

Actualmente existen dos tipos de cámaras digitales:

- Cámara digital Matricial
- Cámara digital lineal o de barrido.



*Figura 33: Cámaras de barrido y matriciales.
Fuente: Santos (2006)*

En la presente investigación se contó con información proporcionada por una Cámara Métrica Digital matricial de formato Medio, esta cámara es iXU RS 1000 de PhaseOne Industrial. La cámara se muestra en la figura 34.



*Figura 34: Cámara iXU-RS 1000 RGB y NIR
Fuente: Phase One Aerial*

Tabla 10: Información específica de la cámara

INFORMACION ESPECIFICA DE iXU – RS 1000	
Marca	Phase One Industrial - Aerial
Modelo	iXU-RS 1000
N° Serie	YC030156
Sensor Resolution	11608 x 8708 (100 MP) (X Axis; Y Axis)
Píxel Size	4.6 µm
Focal length	70mm
Capture rate-full resolution	0.6 s

Fuente: Elaboración Propia

3.5.2.2 Especificaciones técnicas del iXU-RS 1000

iXU-RS Technical Specifications

	iXU-RS 1000	iXU-RS 180	iXU-RS 160	iXU-RS 160 Achromatic
Resolution	100 MP 11608 x 8708	80 MP 10328 x 7760	60.5 MP 8984 x 6732	60 MP 8964 x 6716
Dynamic range	>84 db	>72 db		
Aspect ratio	4:3			
Pixel size	4.6 micron	6.2 micron	6.0 micron	
Sensor size effective	53.4 x 40.0 mm	53.7 x 40.4 mm	53.9 x 40.4 mm	53.8 x 40.3 mm
Lens factor	1.0			
Light sensitivity (ISO)	50-6400	55-800	50-800	200-3200
Camera type	Medium format camera for aerial photography			
Lens mount	Phase One RS dedicated mount			
Shutter speed	Leaf shutter: up to 1/2500 second			
Shutter control	1/3 f-stop increments			
Interfaces	USB 3.0; Secured power input (LEMO); Camera trigger; Mid-exposure pulse; Camera status; iX Link			
Live View/HDMI	<ul style="list-style-type: none"> 1920 x 1080 25p/30p 1280 x 720 50p/60p 			
GPS/IMU support	Applanix, NovAtel, IGI, GGS, NMEA Devices			
Forward Motion Compensation	N/A	TDI controlled		
Data storage	<ul style="list-style-type: none"> 1 TB SSD storage (optional iX Controller) CompactFlash card Type I/II including UDMA 6 and 7 			
Synchronization speed in multiple camera configuration	100 microseconds			
Capture rate – full resolution frame	0.6 s	1.25 sec	1.1 sec	1.1 sec
RAW File compression	IIQ large: 100 MB IIQ small: 65 MB	IIQ large: 80 MB IIQ small: 54 MB	IIQ large: 60 MB IIQ small: 40 MB	
Lens + technology optimizes	Color cast; Light falloff; Chromatic aberration; Fringing; Sharpness falloff; Lens distortion			
Output formats	Phase One RAW, TIF, JPG, CIR and NDVI			
Post processing	<ul style="list-style-type: none"> iX Capture Capture One Pro Capture One Processing Engine 			
IR cut-off filter	Available either with or without IR filter			
Connection to pod	Four M4 bolts			
Power input	12 – 30 V DC			
Maximum power consumption	10 W	12 W		
Weight iXU-RS (excluding lens)	930 kg/2.05 lb			
Weight iXU-RS 50 mm	1.700 kg/3.7 lb			
Approvals	FCC (Class A), CE, RoHS			
Operating Conditions				
Temperature	-10° to 40°C (14° to 104°F)			
Humidity	15 to 80% (non-condensing)			

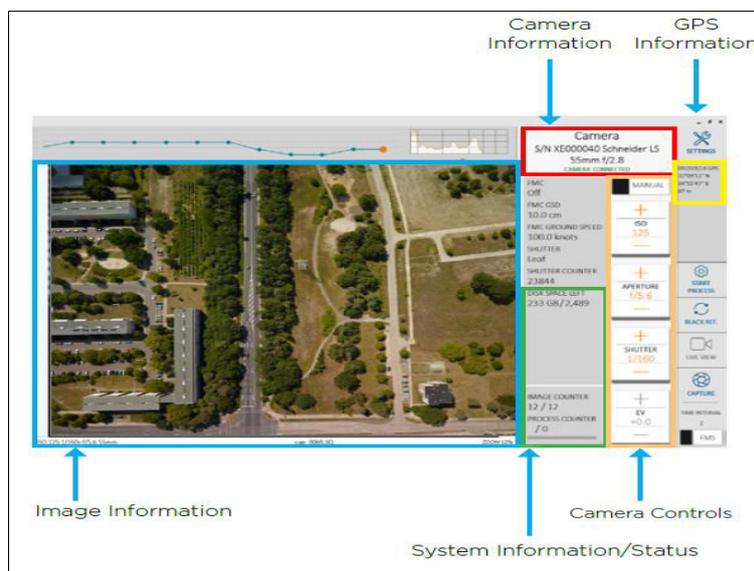
Figura 35: Especificaciones técnicas del iXU-RS 1000

Fuente: Brochure Phase One Aerial Camera <http://industrial.phaseone.com>

3.5.2.3 Datos Generados

Las imágenes que se obtienen de estos sensores generalmente se encuentran en formato RAW ya que permite almacenar la mayor cantidad de información en un menor volumen de almacenamiento. Posteriormente y de acuerdo con el fabricante del sensor este formato RAW podrá ser descomprimido para generar imágenes en formatos múltiples como TIFF, ECW, JPG, BMP, entre otros de aplicación en fotogrametría.

El formato específico de imagen es el formato Raw IIQ. Los datos de orientación en este caso provienen del sistema de navegación del sensor LiDAR ALS 70. El procesamiento de las imágenes se realizó con el software iX Capture y Capture One, ver figura 36.



*Figura 36: Captura de imagen en iX Capture
Fuente: iX Capture Data Sheet*

3.5.3 Herramientas de procesamiento

Un proyecto LiDAR requiere un tratamiento especializado de la información digital directa y complementaria, desde la planificación, obtención de datos y procesamiento de datos. En tal sentido el avance tecnológico permite contar con un soporte adecuado para una óptima gestión de los datos y mantener el flujo de trabajo operativo.

En la actualidad las aplicaciones para LiDAR han mejorado considerablemente como es el caso de la integración de módulos de trabajo para LiDAR en software como ArcMap, Qgis, Global Mapper, por citar algunos, que ofrecen opciones de visualización, clasificación y cálculos para estos datos, además de este importante avance los servidores de datos en tiempo real han contribuido enormemente en la orientación y georreferenciación de los datos LiDAR entre otras aplicaciones.

3.5.3.1 Servidores de datos

El procesamiento con PPP requiere de información de efemérides y correcciones de tiempo, el cual el IGS es el principal proveedor de las efemérides, ya que el IGS es una institución que recibe la contribución de información y procesamiento a nivel mundial estas también ofrecen datos libres a través de los servidores indicados en la tabla 11.

Tabla 11: Servidores de datos PPP

Servidores
Central Bureau, Jet Propulsion Laboratory, USA IGS CB
CDDIS Global Data Center, Godard Space Flight Center, USA CDDIS
SOPAC Global Data Center, Scripps Institute of Oceanography, USA SOPAC
IGN Global Data Center, Institut Geographique National, France IGN
KASI Global Data Center, Korean Astronomy and Space Center, S. Korea KASI

Fuente: Elaboración Propia

3.5.3.2 Software de procesamiento de datos

La presente investigación exige el conocimiento de programas especializados, que permitan gestionar los procesos de un proyecto LiDAR, así como también los programas necesarios para la aplicación del LiDAR en levantamientos viales. Los programas o softwares empleados en la presente investigación están indicados en la tabla 12:

Tabla 12: Software de procesamiento de datos.

Nro	Software	Versión	Función
1	Leica GeoOffice	7	Post Proceso de puntos y Redes Geodésicas
2	Mission Pro 11	11	Planeamiento de vuelo
3	FMCS	3.34	Control de Vuelo para LiDAR ALS
4	IPAS TC	3.2	Proceso GPS - IMU y trayectoria de Vuelo
5	ALS Post Processor	2.76	Proceso de datos Raw Laser a Nube de Puntos
6	Terrasolid Suite	15	Procesamiento de Nube de puntos, ajuste, modelamiento y ortofoto
7	Global Mapper	18	Visualización de Nube de puntos y MDT
8	Mars	7	Visualización de Nube de puntos y MDT
9	Civil 3D	2016	Generación de secciones y perfiles

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Procedimientos

El desarrollo de mi estudio tuvo los siguientes procesos que serán desarrollados en el capítulo de resultados:

- Planificación de vuelo LiDAR
- Ejecución de vuelo LiDAR
- Procesamiento de datos de navegación con PPP en IPAS TC
- Presentación de estructura y formato de información
- Procesamiento de nube de puntos y obtención de MDT
- Evaluación de resultados de Procesamiento PPP
- Evaluación de modelamiento

3.7 Análisis de datos

El análisis e interpretación de los resultados dará como solución la aceptación de la muestra, por consiguiente, la validación de la obtención de topografía por método LiDAR y su procesamiento con PPP para su aplicación en proyectos viales. Con el procesamiento de los resultados, estos serán evaluados a través de las dos pruebas indicadas en el punto 3.1.1 el cual indica como primera prueba la determinación de discrepancias entre los puntos de control y las superficie obtenida con PPP, posteriormente la segunda prueba indica la determinación de discrepancias entre la superficie obtenida con PPP Ultra Rápido y PPP Final comparándolas con la superficie control. El análisis se realizó a través de cuadros comparativos y secciones de perfiles de la carretera el cual indica las discrepancias entre las superficies que serán mostradas en tablas con las discrepancias en tramos a cada 500m.

IV. RESULTADOS

Durante el desarrollo de esta tesis se ha realizado la descripción detallada de un levantamiento topográfico por método LiDAR, además del respaldo teórico que este método requiere.

También la propuesta particular para el tratamiento de la nube de puntos LiDAR en donde se ha descrito los procedimientos a fin de este proceso sea fácilmente entendible para quienes requieren conocer a detalle el desarrollo de un levantamiento LiDAR.

A continuación, presentaremos los resultados obtenidos y comparaciones con la muestra en estudio.

4.1 Desarrollo del proceso de Levantamiento LiDAR y su Procesamiento con PPP

4.1.1 Planificación de vuelo LiDAR

De acuerdo con la información obtenida concerniente a los datos del levantamiento LiDAR empleado en el presente estudio, mostraremos y describiremos el planeamiento empleado y sus consideraciones para su elaboración.

Es preciso mencionar que, en la planificación de un vuelo fotográfico, LiDAR o la combinación de ambos, debe considerar los siguientes aspectos esenciales:

- a) **Ubicación del área de estudio:** Empieza con la ubicación del área de estudio, así como la ubicación del centro de operaciones (aeropuerto) de la aeronave. Es importante conocer ya que nos permitirá planificar el recorrido hacia la zona de trabajo.

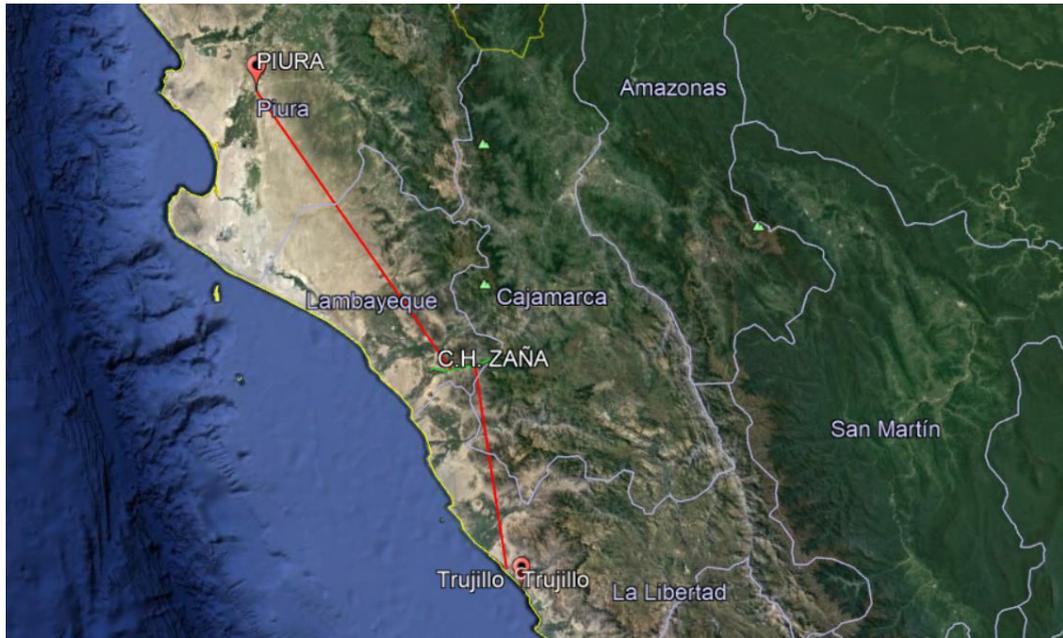
La información que disponemos para esta investigación fue levantada en Zaña, en el siguiente cuadro, indicaremos la distancia del aeropuerto empleado como base y uno alternativo a fin de comprender la importancia la ubicación.

Tabla 13: Determinación de Base de operación aérea

Aeropuerto	Distancia hacia el área de trabajo (Millas Náuticas / Kilómetros)	Tiempo estimado	Tiempo estimado ida y vuelta
SPRU - Aeropuerto internacional Capitán FAP Carlos Martínez de Pinillos	75.3 Mn / 139.5 Km	26 min	52 min
SPUR - Aeropuerto Internacional Capitán FAP Guillermo Concha Iberico	123.0 Mn / 227.8 km	43 min	1h 26 Min

Fuente: Elaboración Propia

Como conclusión un mayor tiempo en recorrido de la base operaciones al área de estudio nos da un menor tiempo u horas de vuelo en la zona de trabajo, sea cual sea la autonomía del avión.



*Figura 37: Determinación de Base de operación aérea
Fuente: Elaboración Propia*

- b) **Geometría del área de levantamiento:** Particularmente la geometría del área de estudio definirá la forma en que se programaran la disposición de las líneas de vuelo pudiendo ser paralelas en donde cubren un polígono o lineal en el caso que el área de estudio sea un eje.

Para nuestro caso, ya que se trata de un levantamiento para un estudio vial, el área de interés está definida por un eje, por lo tanto, el planeamiento de vuelo es una distribución lineal, también conocido como modo River.

- c) **Morfología del terreno:** La morfología del terreno también es un factor muy importante que considerar pues independientemente del sensor que se emplee, la morfología influenciará en las alturas de vuelo sea por polígono o lineales, también afectara el ancho de barrido y los desniveles afectaran la frecuencia de repetición del pulso FRP, el ángulo de barrido FOV, la altura de vuelo, la orientación y nivel de vuelo de las líneas. También se verá afectado la resolución de imágenes GSD.

La morfología también deberá ser tomado en cuenta para la navegación de la aeronave, dentro esta navegación nos referimos a los giros de la aeronave o también llamadas gota de agua que se forma del recorrido al salir e ingresar a una línea de vuelo, pues al existir obstáculos como montañas dificultará el desarrollo del vuelo pudiendo maniobras que extiendan la prolongación del tiempo de vuelo y/o cancelar la misión por seguridad aeronáutica.

- d) **Condiciones meteorológicas:** Quizás sea el factor más determinante al momento de realizar un plan de vuelo, sobre todo si las condiciones meteorológicas del área de estudio son bien definidas durante el año. Ya que en temporadas en que las condiciones meteorológicas sean poco favorables, la planificación debe asumir riesgos en demoras de ejecución, repeticiones o postergaciones hasta disponer de condiciones meteorológicas óptimas.

4.1.1.1 Requerimientos de precisión y detalle

A continuación, en la siguiente tabla 14 se describe los requerimientos sobre las cuales se diseñó el plan de vuelo LiDAR, y del que se obtuvieron los datos que procesaremos en los siguientes subcapítulos.

Tabla 14: Requerimientos de levantamiento LiDAR

Nro.	Concepto	Unidad	Cantidad
1	Densidad de puntos	m ²	6
2	Precisión XY	mm	20
3	precisión Z	mm	25
4	Resolución de Imagen	cm	10
5	Ancho requerido	m	60
6	Traslape	m	30%

Fuente: Elaboración Propia

El área del proyecto tuvo el requerimiento de 50km Lineales x 60m de ancho, para generación de la cartografía y MDT, sin embargo, el ancho de barrido se extiende hasta en >600 m.



Figura 38: Área de estudio
Fuente: Elaboración Propia

4.1.1.2 Plan de vuelo, datos y registros

De acuerdo con las consideraciones de las especificaciones del vuelo y los aspectos esenciales para la navegación del vuelo, presentadas en el subcapítulo anterior, a continuación, presentaré y haré una descripción de los datos más resaltantes del plan de vuelo que ha sido desarrollado en el software Mission Pro.

Primero quiero indicar que Mission Pro es un software de la compañía Leica Geosystems destinado a la elaboración de planes de vuelo de sensores Aerotransportados esto incluye sensores pasivos para captura de imágenes matriciales y de barrido, también para sensores Activos como el LiDAR. El sensor empleado para este estudio es el LiDAR ALS 70 HA.

Las diferentes especificaciones técnicas de los sensores sean pasivos o activos permitirá optimizar o limitar la captura de información y también influenciaran en la elección de la aeronave para optimizar la captura de información, la elección de sensores y aeronaves son importantes en la planificación, la velocidad de captura de información de un sensor permitirá que la aeronave pueda realizar las misiones con mayor velocidad, en tanto la posibilidad de operar un equipo con mayor capacidad de altitud, deberá estar asociado también a la capacidad de la aeronave en poder volar a dicha altitud.

A modo de ejemplo, en la figura 39 se muestra los siguientes diagramas entre los sensores ALS70 HP y ALS70HA.

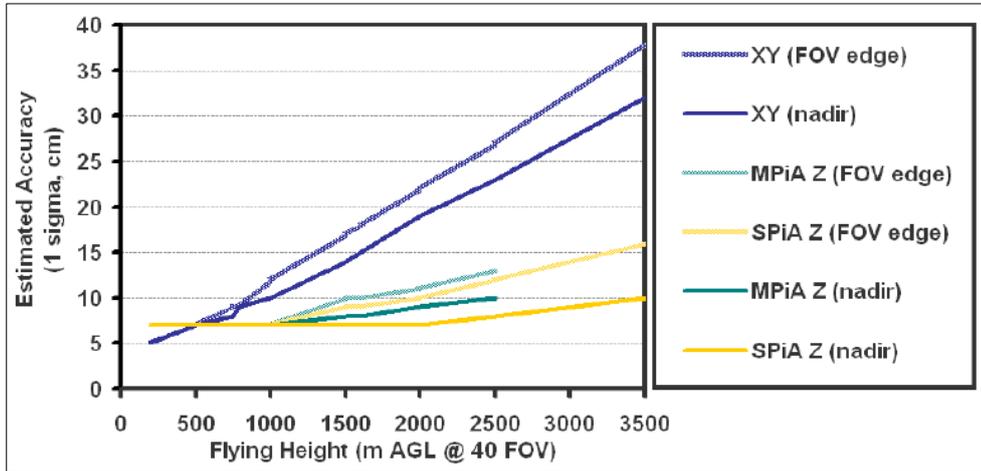


Figura 39: Información de cuadro precisión de un ALS70 HP
Fuente: Product_Spec_ALS70_HP

Información de cuadro precisión de un ALS70 HP y su límite de altitud hasta 3500m, Precisión en XY de 5 a 38cm y en Z 7-16 cm. Ver figura 40.

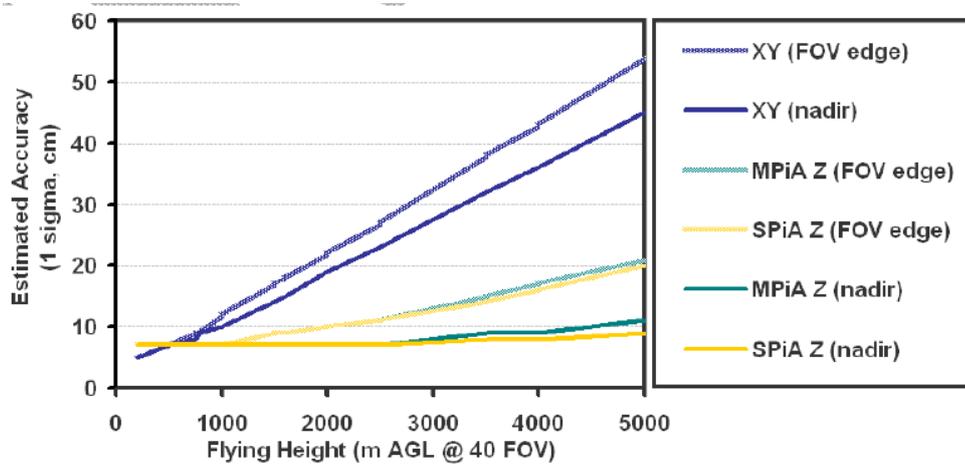
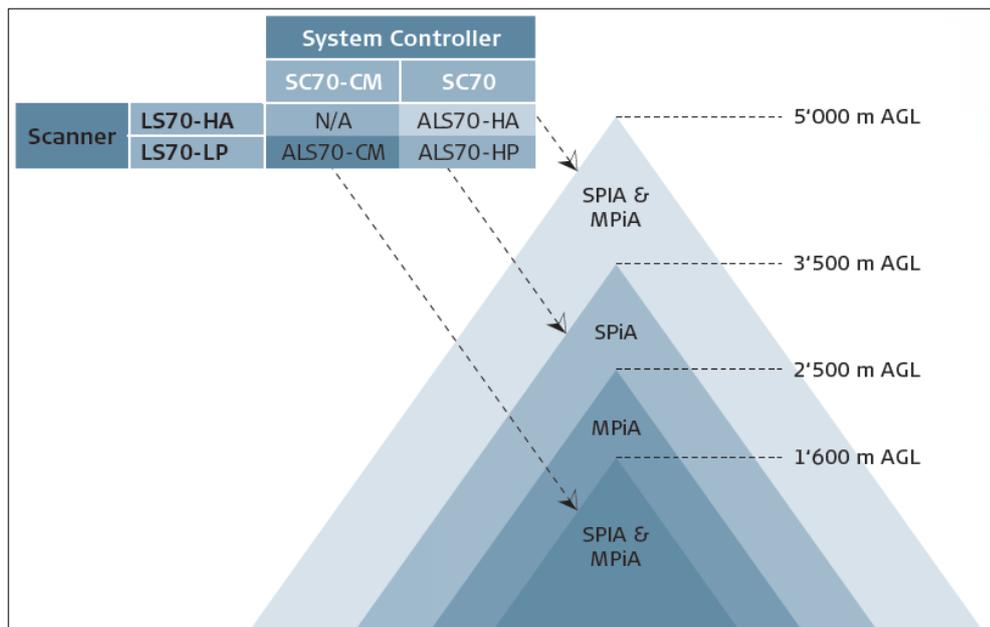


Figura 40: Información de cuadro precisión de un ALS70 HA
Product_Spec_ALS70_HA

Información de cuadro precisión de un ALS70 HA y su límite de altitud hasta 5000m, Precisión en XY de 5 a 54cm y en Z 7-21 cm. Ver figura 41.



*Figura 41: Capacidad de altitud de operación ALS70
Fuente: Información de 785440_Leica_ALS70*

Información de capacidad de operación y disponibilidad de pulso de acuerdo con la altitud de vuelo.

De la descripción anterior, queda claro que debemos tener muy en cuenta el sensor y aeronave para elaborar un plan de vuelo, para efectos de generar el plan de vuelo de la muestra de estudio se ha empleado el sensor LiDAR ALS 70 HA y la Aeronave PiPER Chieftain, cuyas especificaciones generales se mencionan en la tabla 15.

Tabla 15: Especificación General del ALS70HA

Especificaciones generales ALS 70 HA	
Descripción	Unidad
Pulse repetition frequency, PRF	20 kHz - 300 kHz
Max Pulse Rate	250 kHz
Max Scan Rate	100 Hz
Max Flight Height	5000m AGL
Max FOV	75 deg
Scan Pattern	Sinusoidal, Triangle y Ráster
Weight	80 Kg

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con el requerimiento del vuelo y a las especificaciones del sensor y la aeronave, se realizó la elaboración del plan de vuelo en Mission Pro en donde se siguen los siguientes pasos:

Paso1. Creación del proyecto, indicando sistema de referencia, tipo de sensor a utilizar y aeronave.

Paso2. Importación de área de estudio e ingreso de datos del requerimiento inicialmente densidad de puntos y traslape y resolución de imagen para el sensor secundario (en el caso de un vuelo combinado con toma de fotografías aéreas)

Paso3. Determinación de la altitud de vuelo para recubrimiento solicitado

Paso4. Determinación ángulo de escaneo, velocidad y orientación de líneas de vuelo.

Paso5. Vectorización automática de líneas de vuelo.

Paso6. Revisión de resultados incluye la revisión de frecuencia de pulso y escaneo, velocidad de aeronave, GSD de imagen, recubrimiento de área y determinación de tolerancias.

Paso7. Exportación de datos y registros para el vuelo.

Los datos que se obtiene del planeamiento de vuelo relacionan las especificaciones del equipo, la especificación de la aeronave y los requerimientos del servicio. Esta informacion puede ser presentada en ficheros de metadatos con formato *.fpd para el sistema y software del equipo de navegación del LiDAR, sin embargo, también es representado gráficamente en formatos como kml, kmz, shapefile o dxf, estos formatos permiten visualizar al plan de vuelo y su recubrimiento, así como las distancias, el número de líneas, altitud, % de traslape y sentido de las líneas de vuelo en software como Google Earth, Global Mapper, QGis, AutoCad entre otros.

También la informacion detallada del plan describe el tipo de plan, el recubrimiento el número de líneas, numero de fotos dirección, GSD, tiempo, altitud y longitud de líneas.

Tabla 16: Tabla de información de plan de vuelo

TABLA DE INFORMACION DE PLAN DE VUELO													
Name	Type	AOI Area [km ²]	# Active Lines	# Active Events	Line Direction [deg]	Min GSD [cm]	Max GSD [cm]	Estimated flight time [s]	Min Alt AGL [m]	Max Alt AGL [m]	Total Line Length [m]	ALS Sensor ID	Sensor
A02	Corridor	0.2	1	8	90	7	7	16.9	1082	1100	1739	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A03	Corridor	0.5	1	16	90	7	7	36.1	1064	1100	3711	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A04	Corridor	1	1	29	90	7	7	66.3	1003	1100	6816	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A05	Corridor	0.6	1	18	90	7	7	39.9	1008	1102	4104	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A06	Corridor	0.6	1	19	90	7	7	42.6	1013	1100	4379	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A08	Corridor	1.9	1	55	76	6	7	128.1	840	1101	12616	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A09	Corridor	1.9	1	56	90	6	7	127.3	964	1102	13092	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A11	Corridor	1	1	31	90	6	7	69.4	964	1100	7139	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A13	Corridor	0.8	1	32	69.9	4	7	70.3	649	1100	5930	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A14	Corridor	1.4	1	59	65.2	3	7	161.9	502	1100	9813	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A15	Corridor	0.5	1	17	90	7	10	39.5	1010	1500	4068	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A19	Corridor	0.8	1	27	90	5	9	59.9	775	1300	5603	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A20	Corridor	0.6	1	19	90	6	9	42.6	989	1302	4380	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape
A21	Corridor	0.4	1	14	90	6	9	28.5	976	1300	2929	ALS70 SN7171	04 IXU-1000 70mm LandScape

Fuente: Elaboración Propia

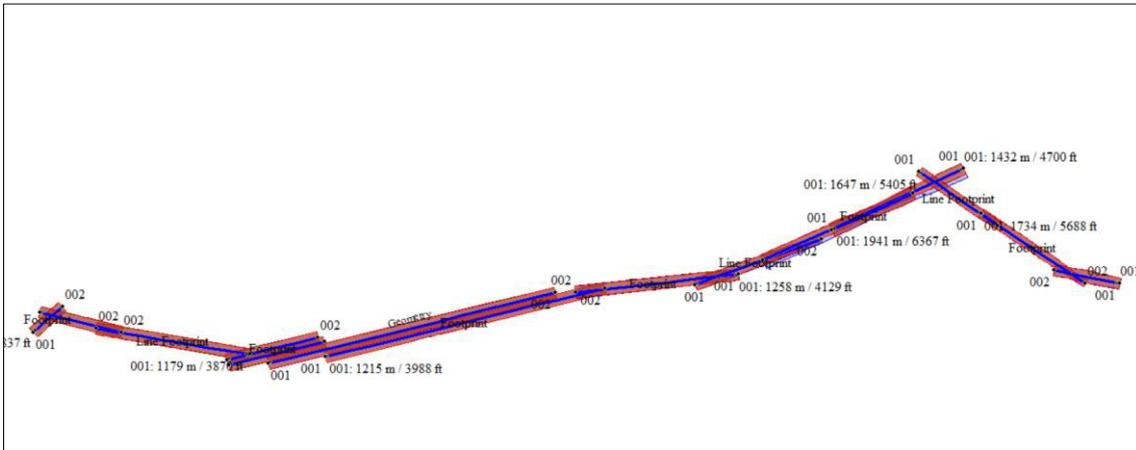


Figura 42: Representación gráfica del plan de vuelo

Fuente: Elaboración Propia



Figura 43: Vista ampliada de plan de vuelo, inicio de tramo

Fuente: Elaboración Propia

Finalmente, el plan de vuelo debe presentarse en una ficha técnica donde se resume el planeamiento y se registren las bases de operaciones.

A continuación, en la tabla 17 se presenta la ficha de planificación de vuelo elaborada para la presentación del plan de vuelo.

Tabla 17: Ficha de planificación de vuelo

Global Mapping		PLANTILLA DE INFORMACIÓN DE PLAN DE VUELO				GP-F-19 V01/ Vigente desde : 10.01.2018	
01 - Especificaciones del Proyecto							
Cliente		Nombre Del Proyecto			Escala	Puntos/m ²	
Global Mapping		LIDAR-PPP			1/1000	6	
Avion	Autonomia	LIDAR	Camara	Proyección	Datum		
OB1967	4	ALS70-HA	IXU-1000	UTM17 S	Sirgas2000		
02 - Movilización de la Aeronave							
Base Avión	Pisco	Base Operaciones			Trujillo		
		Distancia (km)	Distancia (nm)	Velocidad (knots)	Velocidad (km/h)	Ferry ida y vuelta (horas)	
Base Avión - Base Operaciones		868.000	468.683	170	314.84	5.514	
Base Operaciones - Área Trabajo		151.000	81.533	170	314.84	0.959	
03 - Información LiDAR							
# líneas	# Fotos	Tiempo total de vuelo (min)			Misiones	Puntos / m ²	GSD (cm)
14	400	Area (min)	Vueltas (min)	Llegar al área	1	6	7-10
		16	56	57.6			
		72					
		129.55					
Form. Camara	Angulo Escan	Freq. Scan	Freq. Pulso	Min Alt MSL	Max Alt MSL	Max Sidelap	Min. Sidelap
LANDSCAPE	27	61.8	248.00	1646.00	4921	30%	20%
Area/Eje	Pot. Laser	Sigma xy	Sigma z	Velocidad	Mpia / Spia		
60 Km	68%	11	7.00	120 knots	Spia		
04 - Información de las Líneas de Vuelo							
Flight Line Label	Flight Line #	# Fotos por Línea	Min Alt AGL [ft]	Max Alt AGL [ft]	Alt MSL [ft]	Length [nm]	Tiempo [Seg]
A02	1	8	3549	3608	3874	0.94	16.9
A03	2	16	3490	3608	3900	2	36.1
A04	3	29	3290	3608	3917	3.68	66.3
A05	4	18	3307	3615	3933	2.22	39.9
A06	5	19	3323	3608	3930	2.36	42.6
A08	6	55	2756	3612	4035	6.81	128.1
A09	7	56	3162	3615	3966	7.07	127.3
A11	8	31	3162	3608	4176	3.85	69.4
A13	9	32	2129	3608	4303	3.2	70.3
A14	10	59	1646	3608	4747	5.3	161.9
A15	11	17	3314	4921	6414	2.2	39.5
A19	12	27	2543	4265	5735	3.03	59.9
A20	13	19	3244	4271	5452	2.37	42.6
A21	14	14	3202	4265	6394	1.58	28.5

Fuente: Elaboración Propia

4.1.1.3 Consideraciones de navegación y restricciones de vuelo

Durante la navegación y ejecución de vuelo, es necesario contar de manera obligatoria con dos planes de operación necesarios.

El primero consiste en tener un plan de vuelo operacional de navegación cuya información contiene las características de la aeronave, autonomía, tripulación, equipos de navegación y comunicación, tipo de navegación, aeródromos, aerovías y punto de operación. Esta información es indispensable para todo vuelo tripulado y aplica también a los vuelos fotográficos de acuerdo con la RAP 91 de la aviación civil del Perú. En esencia este plan es un plan estrictamente aeronáutico.

El segundo plan obligatorio se trata del plan que contiene la misión de vuelo fotográfico, este es el plan de vuelo fotográfico o misión fotográfica, este plan debe contener información de ubicación, operador, equipo, ficheros de programación de vuelo, número de líneas, altitud, distancia de líneas, eventos de pulsaciones, velocidad requerida, patrón de escaneo y densidad de punto, información que es registrada en el fichero *.fpd que proporciona el Software Mission pro y el que es ejecutado durante la misión de vuelo.

Ambos planes descritos anteriormente son complementos necesarios para una correcta ejecución de un vuelo fotográfico y su fiel cumplimiento contribuirá con el éxito de la misión.

Otro aspecto importante por considerar son las restricciones de vuelo que en algunos casos hasta podría cancelar toda operación de vuelo.

Estas restricciones son las siguientes:

- Condiciones meteorológicas adversas, normalmente los vuelos fotográficos requieren de condiciones óptimas principalmente de viento y nubosidad.
- Notam, (Notice to air man) son avisos emitidos por los aeródromos que contiene información para la tripulación, estos avisos normalmente son emitidos para restringir operaciones aéreas o dar aviso de alguna actividad dentro del aeródromo o su espacio aéreo, como por ejemplo cierre de pista por mantenimiento, operaciones especiales, control de tráfico aéreo, entre otros.
- Áreas restringidas y/o prohibidas, en el espacio aéreo peruano existen algunas restricciones de acuerdo con AIP Perú, están limitados según su ubicación, extensión y altitud de operación. Las áreas prohibidas como su nombre lo indica, están prohibidas de sobre volar bajo cualquier circunstancia, algunas de estas áreas son bases militares, centros históricos, centros arqueológicos, centros penitenciarios y otros de interés nacional. Las áreas restringidas, por el contrario, requieren de un permiso especial debidamente sustentado para obtener la autorización de vuelo correspondiente. El control de estas áreas está bajo la tutela de fuerza aérea del Perú.

4.1.2 Ejecución de vuelo LiDAR

4.1.2.1 Consideraciones de calibración y alineamiento de la IMU

La alineación en vuelo es una forma efectiva de mejorar la precisión y la velocidad de la alineación inicial para el sistema de navegación inercial (INS). En una operación de vuelo con un equipo LiDAR el alineamiento es necesario para iniciar y estabilizar la IMU del sistema de navegación integrado GPS-IMU.

¿Pero que es un alineamiento en términos de un vuelo LiDAR?

Es el resultado de sincronizar los giros del giróscopo y la posición de los sistemas de referencias de los sensores del sistema con la finalidad de calcular con precisión (Filtro de Kalman) la posición, velocidad y actitud del sistema y aeronave.



*Figura 44: Distribución de sensores con sus ejes
Fuente: Ferrer 2009*

EL cálculo preciso de la posición, velocidad y actitud permitirá obtener las coordenadas de los puntos también con buena precisión. Entendemos que la posición está referida a su ubicación respecto a la trayectoria del vuelo y su sistema de referencia, la velocidad está referida al tiempo en que tarda trasladarse de un punto a otro.

Con respecto a la actitud es la posición en la que se encuentra el avión en un tiempo determinado y está referido a los ejes del avión, que son roll, pitch y ya, este último también llamado heading.

Los signos de estos ángulos estarán definidos tal que el ángulo de roll (ϕ) es positivo cuando el ala derecha se mueve por debajo del plano de horizonte, el ángulo de pitch (θ) es positivo cuando el morro del avión se eleva por encima de la línea de horizonte y el ángulo de yaw (ψ) se define positivo cuando el morro está rotando desde el norte hacia el este. Ver figura 45.

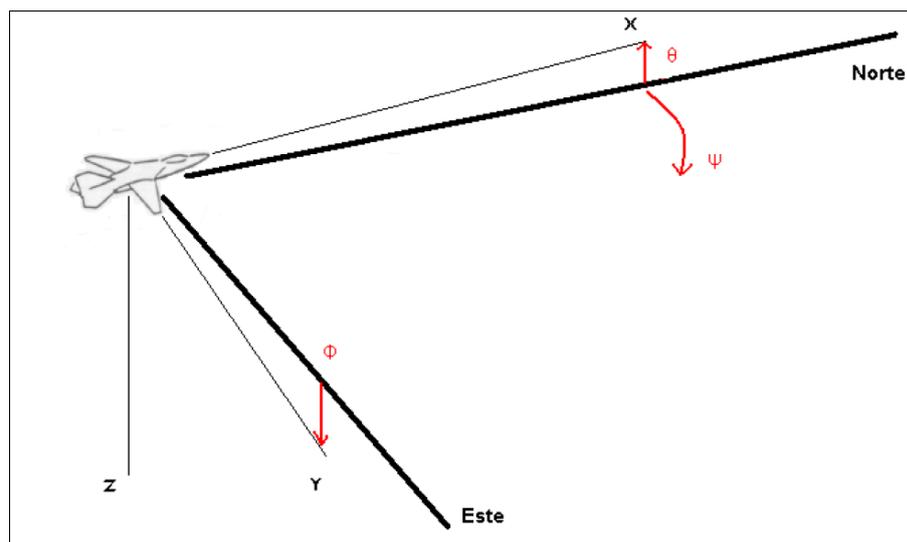


Figura 45: Representación de avión en los ejes de coordenadas de navegación
Fuente: Ferrer 2009

EL gráfico anterior muestra la representación en los ejes de coordenadas de navegación (Negrita) y los ejes del cuerpo de la aeronave XYZ. En donde Todos los giros representan ángulos positivos.

Entrado un poco más a detalle, según Ferrer (2009), Mediante la integración Kalman de todas las medidas de los sensores, se pretende obtener una estimación precisa de la actitud y posición del móvil. Se cuenta con dos tipos de dispositivos, los sensores inerciales (acelerómetro y giroscopio) que dan información muy precisa a corto plazo, pero después de un periodo largo de medida, tienden a ser poco fiables y los dispositivos que dan información absoluta independiente del tiempo, como son el GPS y el magnetómetro. Así pues, se espera que la combinación de estas dos fuentes de información, aunque sean redundantes, mejoren la precisión que cada una de ellas tiene por separado. Todas las medidas de los sensores se guardarán en un dataloger y se realizará el procesado offline.

Nota: DataLogger o registrador de datos, es un dispositivo que registra datos en el tiempo o en relación con la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente. Tiene capacidad de recopilar información automática. En misiones de vuelos LiDAR los datos en el tiempo proviene de los sensores inerciales y de los datos de ubicación provienen del GPS.

Finalmente, el alineamiento se da en 3 fases, tal como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18: Fases durante vuelo de alineamiento IMU-GPS

Air-Start	Project execution	Interrupted flight execution
After Start-up	Before each survey area	Before interruption
	After each survey area	After interruption

Fuente: ALS 70 Ha Data Sheet

4.1.2.2 Vuelo, virajes y control de altura y velocidad

Durante el vuelo y sobre el área de levantamiento existen recomendaciones y procedimientos mandatorios en las vueltas del avión durante la salida y entrada a una línea y durante la pasada sobre la línea planificada, ver figura 46.

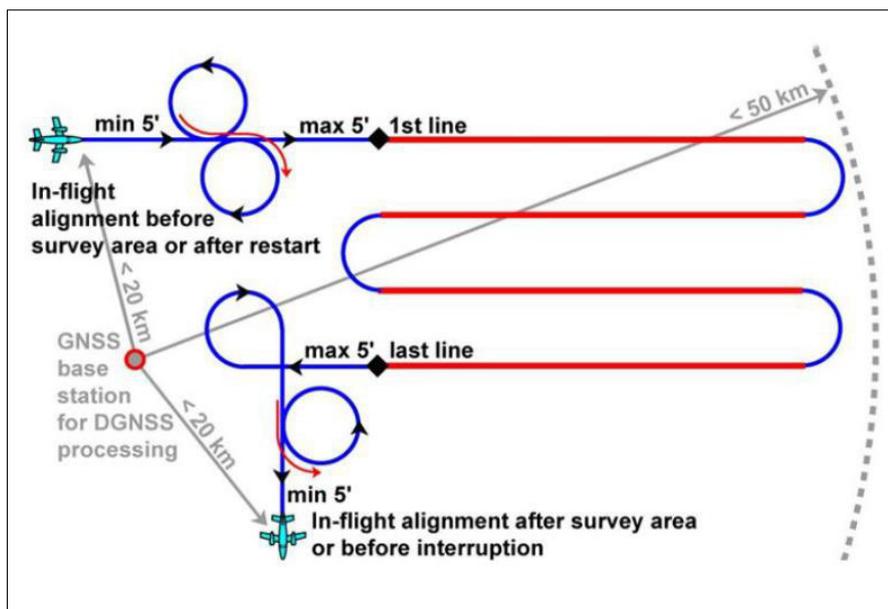


Figura 46: Giros de calibración y alineamiento del GPS – IMU durante el vuelo.
Fuente: ALS 70 Ha Data Sheet

La razón es porque, en un giro muy pronunciado existe la posibilidad de que se pierdan las señales de satélites ya que en viraje pronunciado la antena perdería su posición horizontal perdiendo señales de satélites del horizonte, en tanto durante

la ejecución de una línea de vuelo los virajes en Roll Pitch y heading pueden disminuir la precisión de los datos ya que afectaría la proyección de la Nadir.

También el mantener la velocidad y la altura son importantes para el cumplimiento del plan de vuelo ya que la resolución de imagen y la densidad de puntos están asociados a la velocidad de desplazamiento del avión y a la velocidad de captura de información. Por ejemplo: Si el vuelo está programado a 120 Knots para obtener 5puntos x m2. Y el vuelo resulta a una mayor velocidad se obtendría una densidad menor a 5puntos x m2. Esto se debe a que el long track tendrá mayor distancia.

Para efectos del control de vuelo cuyos datos son utilizados en la presente investigación, además de respetar los parámetros y configuraciones durante la misión de vuelo, se ha realizado el monitoreo del sistema de navegación del equipo, coordinando con el piloto el aumento o disminución de velocidad, así como el descenso o ascenso de la altitud.

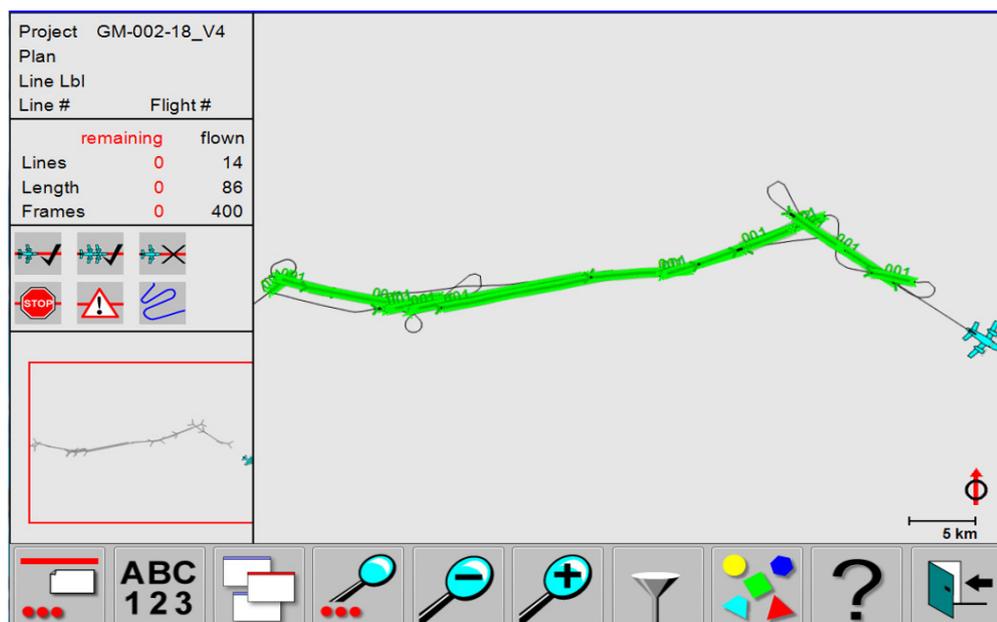


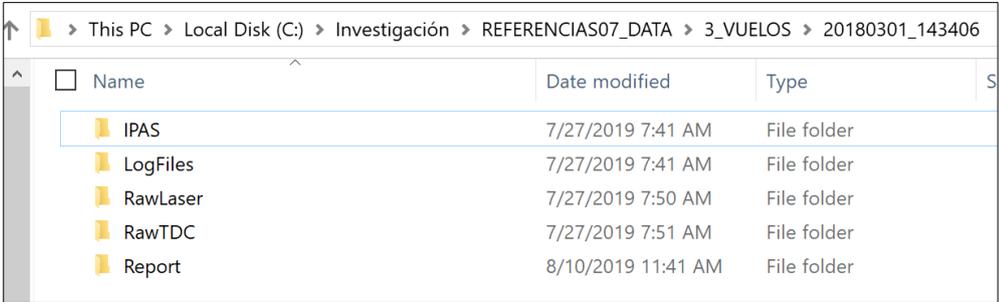
Figura 47: Virajes ejecutados entre líneas de vuelo.
Fuente: Elaboración Propia

Los virajes en cada misión ya están predefinidos por el control de vuelo del sistema LiDAR, y en este se define las líneas a ejecutar y los giros al terminar e iniciar el vuelo de las líneas programadas, ver figura 47.

4.1.3 Procesamiento de datos de navegación con PPP en IPAS TC

A continuación, se describe este procesamiento aplicado a la muestra de estudio, la teoría de este procesamiento ya la hemos revisado en los capítulos 2.4 y 2.5.

Primero debemos asegurarnos de disponer adecuadamente la importación de los datos crudos del vuelo LiDAR.



Name	Date modified	Type
IPAS	7/27/2019 7:41 AM	File folder
LogFiles	7/27/2019 7:41 AM	File folder
RawLaser	7/27/2019 7:50 AM	File folder
RawTDC	7/27/2019 7:51 AM	File folder
Report	8/10/2019 11:41 AM	File folder

Figura 48: Vista de una estructura típica de los datos crudos del LiDAR ALS70HA
Fuente: Elaboración Propia

- IPAS: Se registran los datos de navegación
- LogFiles: Se registran las actividades del sensor LiDAR
- RawLaser: Se almacena los datos crudos de la nube de puntos
- RawTDC: Se registran datos de tiempo de las pulsaciones del láser (TDC: time-to-digital converter)

Leica IPAS (2010) Indica que el procesamiento con IPAS TC puede realizarse en 5 pasos principales. Procedimiento que aplicamos a continuación.

Paso Nro 1; Importación de datos

Aquí se puede observar el nombre del proyecto, los directorios de extracción de los datos GNSS e IMU y tiempo GPS

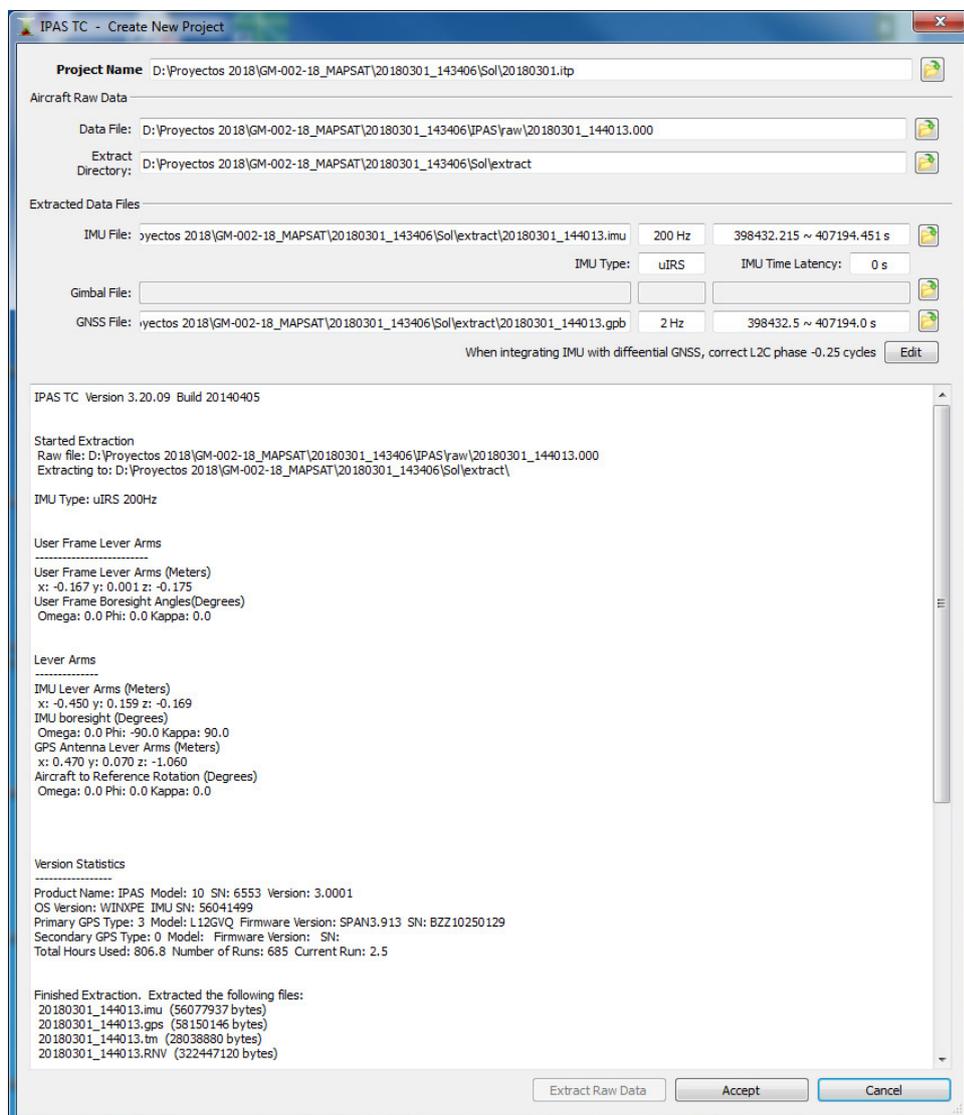


Figura 49: Importación de datos de vuelo
Fuente: Elaboración Propia

Paso Nro 2: Activación de opciones de procesamiento Estación Base o GNSS PPP

En este proceso se optó por realizar el procesamiento con PPP cuyos resultados serán comparados con la topografía resultante de un proceso con estación Base y Controles de campo. En este paso se procede a verificar la disponibilidad de datos de las efemérides de los satélites (Orbit File) y sus correcciones de tiempo (Clock File).

Es importante indicar que la opción de procesamiento con PPP no debe ser usado para proyecto con una duración de tiempo menor a los 90 minutos.

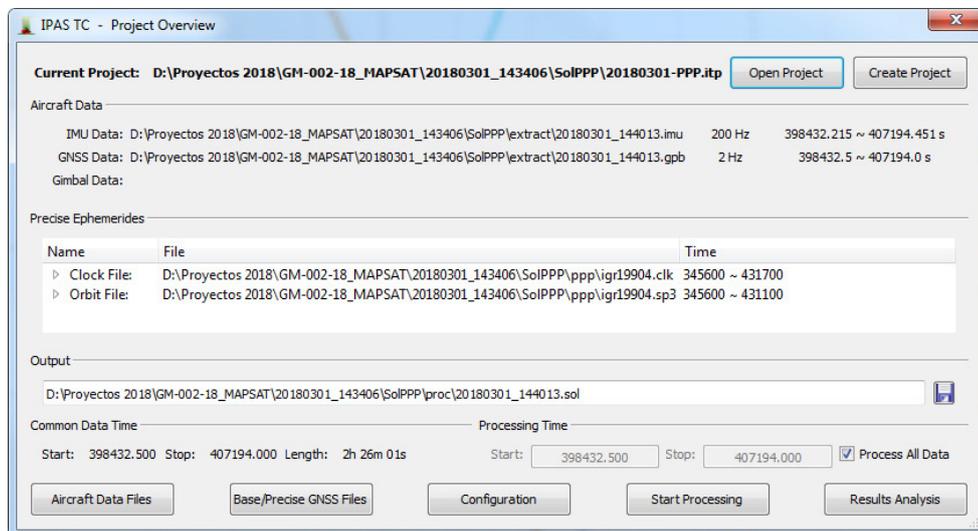
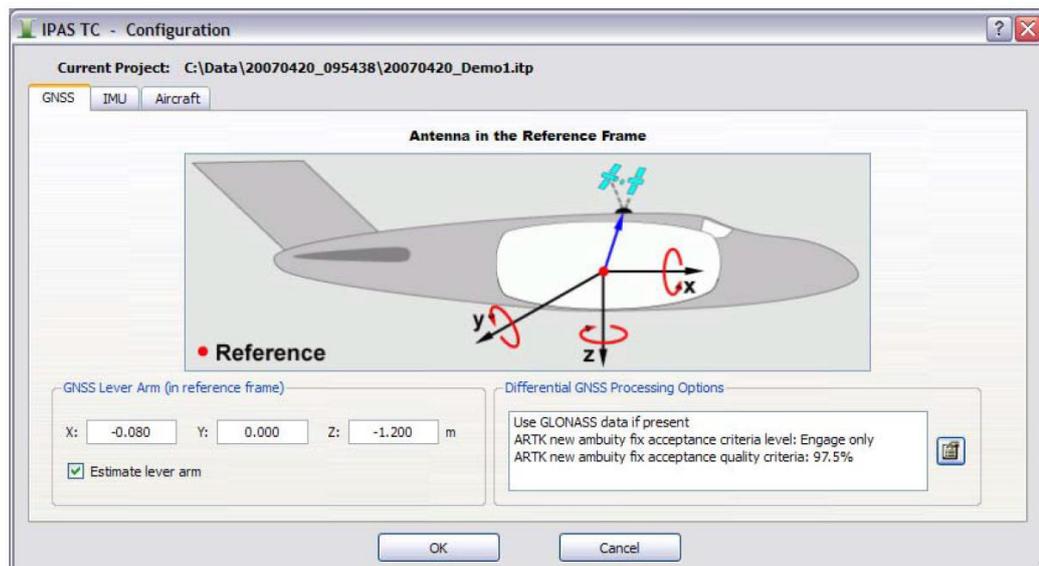


Figura 50: Verificación de disponibilidad de datos de satélites
Fuente: Elaboración Propia

Paso Nro 3: Configuración de procesamiento

En este paso se debe indicar las correcciones de level arms si las hubiera y estas no han sido configurados en el equipo previamente, también, se podrá configurar el uso de satélites GLONASS.



*Figura 51: Correcciones de Level Arms
Fuente: Elaboración Propia*

Leica IPAS TC (2010) al respecto de este paso indica que, en el uso del procesamiento con PPP, las estimaciones del Lever Arm y el uso de GLONASS no deben ser utilizados. Por lo que es necesario disponer las medidas del Lever Arm directamente en el avión o hacer una estimación con procesamiento con un punto Base.

Paso Nro 4: Procesamiento.

En este paso se da ejecución al procesamiento de la trayectoria de vuelo considerando el modo de procesamiento y configuración indicados anteriormente. En procesamiento como se indica en el punto 2.4 y 2.5 consiste en procesamiento ida y vuelta del procesamiento de la trayectoria, ver figura 52, y consiste en combinar soluciones de posicionamiento del GPS y Correcciones de la IMU. En este proceso se puede realizarse sobre toda la navegación o parte de ella según criterio del especialista en este procesamiento en donde deberá definir el tiempo de inicio y final en términos de tiempo GPS.

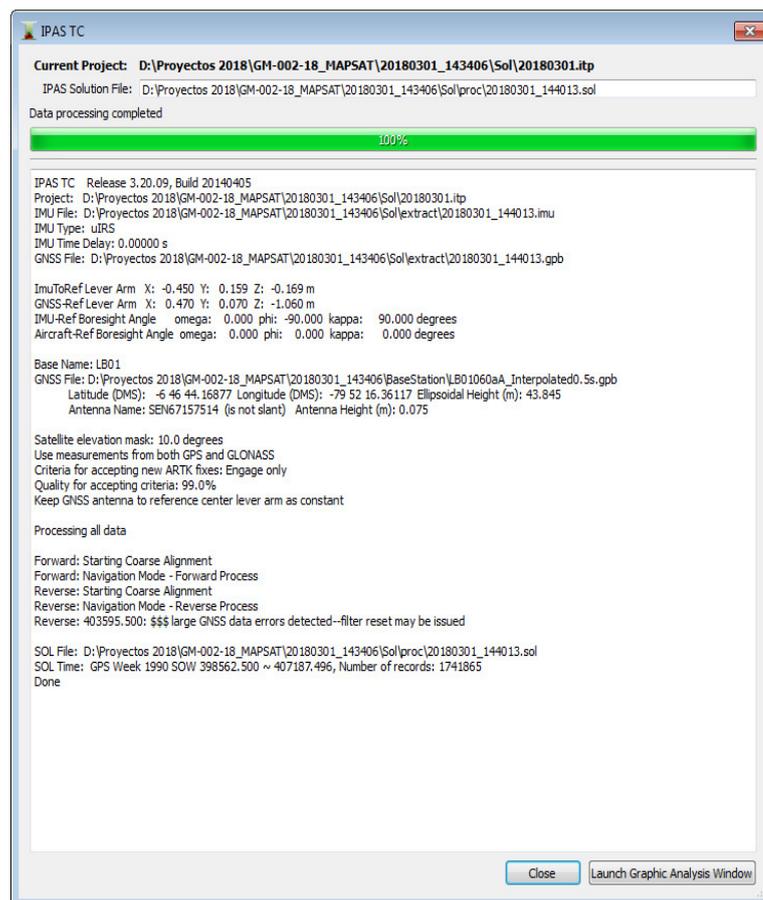
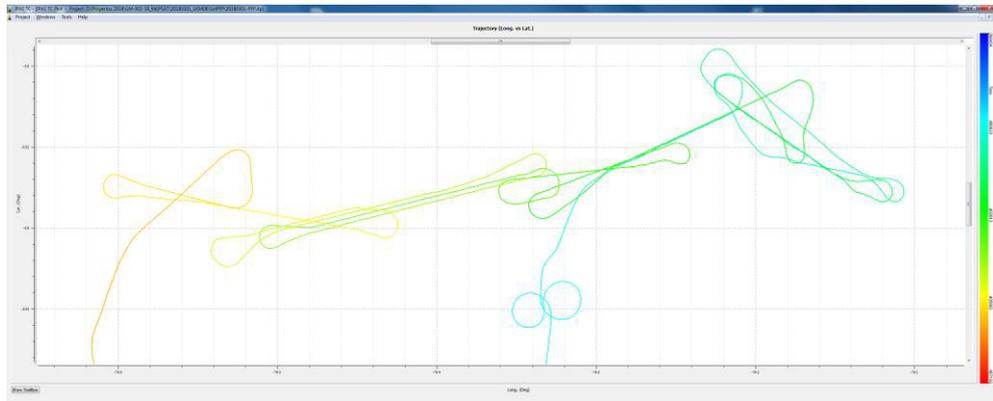


Figura 52: Procesamiento de Trayectoria
Fuente: Elaboración Propia

Paso Nro 5: Análisis de resultados.

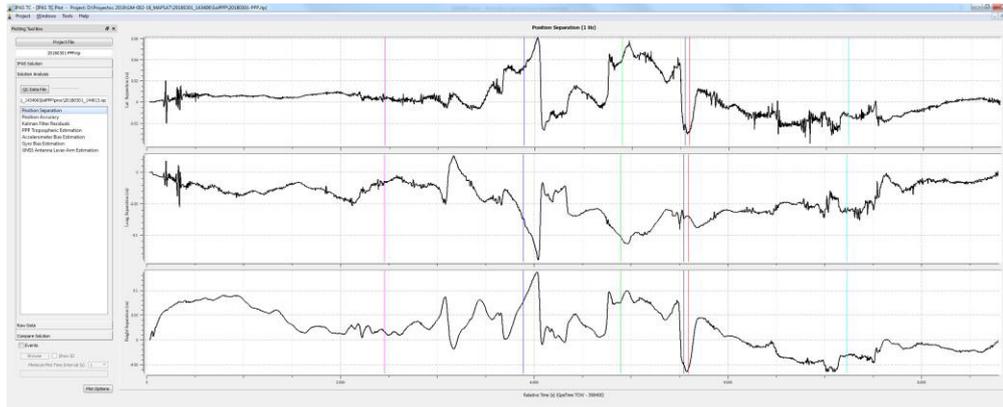
En este paso se hace revisión de los resultados obtenidos del procesamiento, lo que se muestra es la precisión de la trayectoria y por consiguiente la precisión de la nube de puntos.

A continuación, en la figura 53 se muestra la trayectoria procesada del plan de vuelo, también se puede observar el cumplimiento del giro de alineamiento y calibración en forma de 8 antes de iniciar con el barrido de las líneas de vuelo.



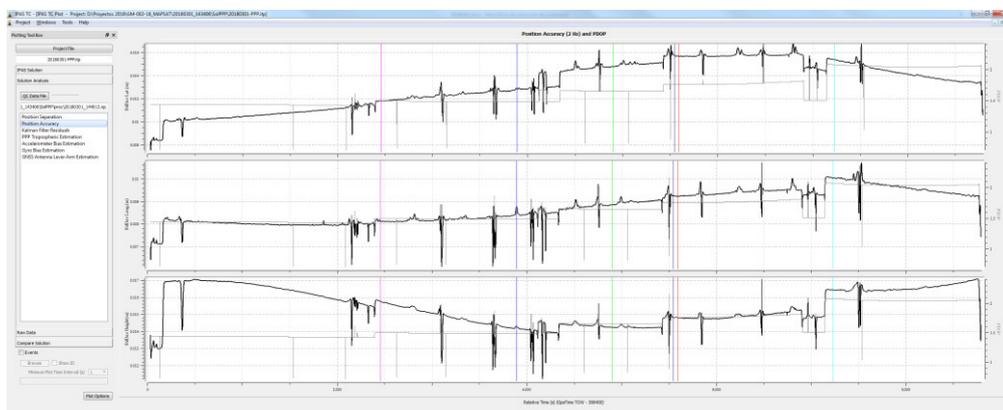
*Figura 53: Grafico de trayectoria procesada con PPP
Fuente: Elaboración Propia*

En el siguiente grafico **Position separation**, se muestra los resultados de precisión del procesamiento, <15cm en las soluciones del procesamiento de ida y vuelta.



*Figura 54: Resultado de procesamiento en posición.
Fuente: Elaboración Propia*

En el siguiente gráfico **Position Accuracy**, se muestra la precisión absoluta geométrica de la solución que se ha podido obtener del procesamiento. El resultado de la precisión es $< 2\text{cm}$ en Latitud, Longitud y Altura, además se muestra el intervalo del PDOP en el que se obtuvieron los resultados.



*Figura 55: Resultado precisión de trayectoria XYZ
Fuente: Elaboración Propia*

Finalmente, con las trayectorias obtenidas, se procede al procesar la nube de puntos cruda ingresando en el software ALSPP los resultados obtenidos en el IPAS TC.

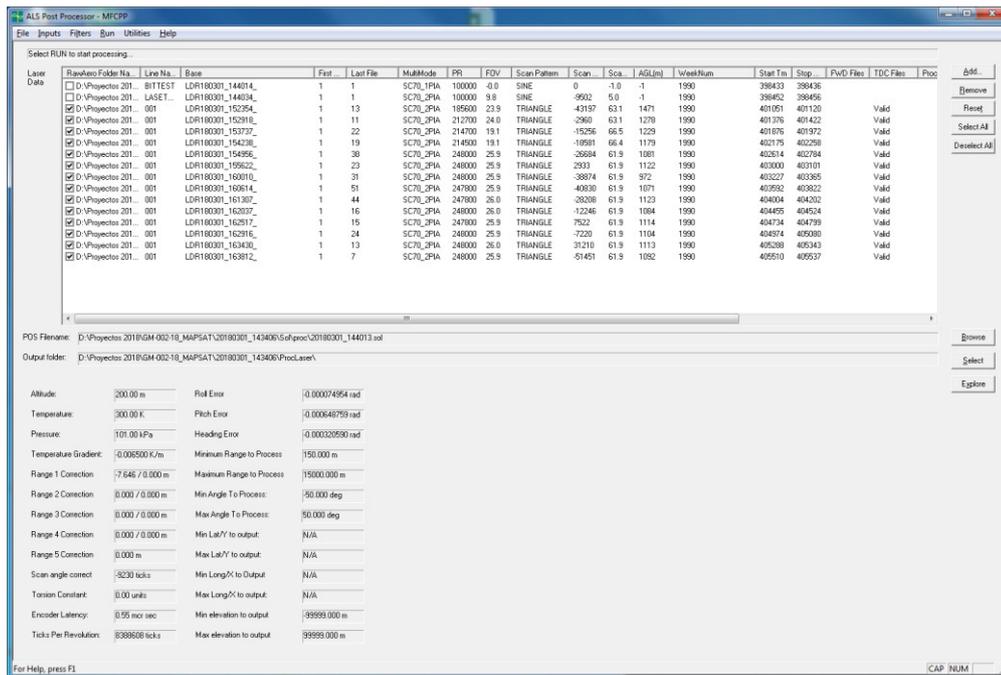


Figura 56: Procesamiento de LAS crudo
Fuente: Elaboración Propia

4.1.4 Presentación de estructura y formato información.

Como producto del procesamiento de la información base que provee la captura de datos Raw y el data logger del sistema de navegación, se generan principalmente las siguientes estructuras de datos, básico para el ajuste de líneas de vuelo.

- Datos de nube de puntos: LAS
- Datos de trayectoria: SBET, trj.

La primera estructura corresponde a la información de nube de puntos y está contenida en un formato de archivo denominado LAS, este formato permite e intercambio de información 3D entre los distintos fabricantes de equipos y software. La

ASPRS es la institución a nivel mundial en estandarizar el uso de estos datos y adaptarla a las nuevas necesidades requeridas sea por hardware o software.

Es preciso indicar que un formato LAS obtenida por Laser, contiene información que combina datos de GPS, IMU, rangos del pulso Laser, número de puntos por retorno. En tanto un formato Las obtenida por correlación de los pixeles de una imagen solo contendrá como información datos de posicionamiento XYZ.

La segunda estructura de información lo constituyen los archivos de trayectoria de vuelo que registran información de posición y tiempo que sirven para ajustar las líneas de vuelo, los archivos más utilizados para el registro de trayectorias son:

- SBET (Smoothed Best Estimate of Trajectory), para Sensores Aplanix
- SOL Y TRJ, para procesar trayectorias en sensores Leica

En la presente investigación los formatos empleados para la nube de puntos es el formato LAS 1.2 y para las trayectorias es empleado en *.trj.

4.1.5 Procesamiento de Nube de puntos y obtención de MDT

4.1.5.1 Ajuste y calibración de líneas de vuelo

Disponer de un certificado de calibración del equipo no excluye que un levantamiento realice una calibración y ajuste de líneas ya que son conceptos distintos.

Un certificado de calibración garantiza por el fabricante o por una institución la operatividad del equipo de acuerdo con parámetros estándar de funcionamiento, calidad y en algunos casos emite las correcciones que deben considerarse como es el caso de las correcciones de boresight.

Un ajuste de líneas de vuelo busca realizar el correcto empalme entre cada línea de vuelo, reduciendo los errores de navegación y mejorando los empalmes con discrepancias menores a 10 cm entre todas las líneas de vuelo de una misión.

Existe dos formas de realizar una calibración de líneas de vuelo la primera es Find Match y la segunda es Tie Lines. A continuación, se presenta en la tabla 19 la comparativa de estas técnicas de calibración y ajuste de líneas.

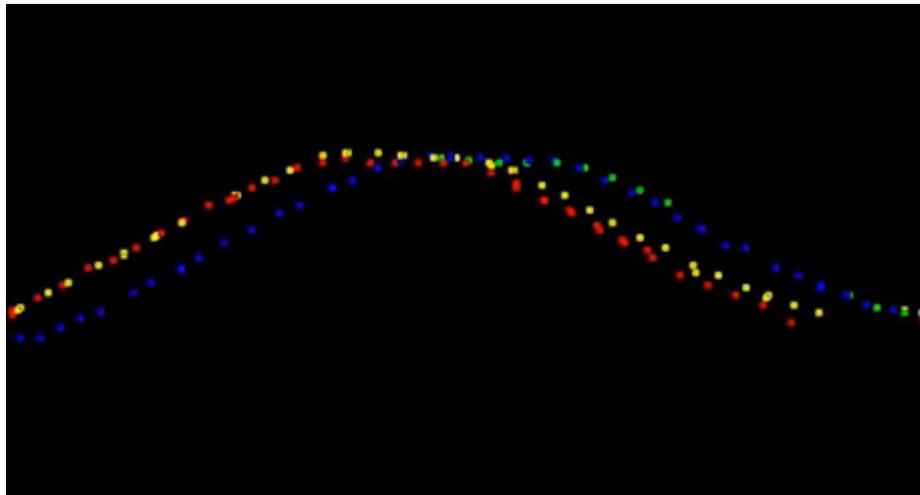
Tabla 19: Comparación entre Find Match vs Tie Lines

Find Match	Tie Lines
Coincidencia de superficie a Superficie	Coincidencia de características a características
Solo un tipo de observación	varios tipos de observaciones
Mayor tiempo de ajuste	Menor tiempo de ajuste
No considera resultados por cada iteración	Considera resultados por cada iteración
Sin posibilidad de observaciones manuales	Posibilidad de Observaciones manuales

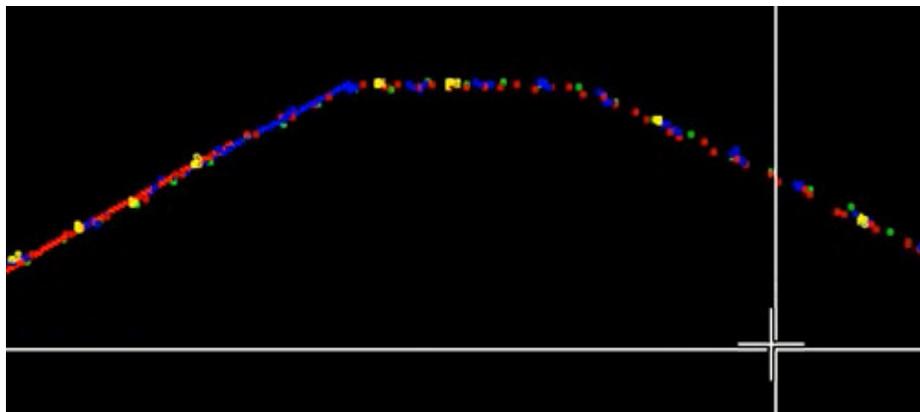
Fuente: Terramach Training- Tie Lines for Airborne Applications by Helén Rost

De acuerdo con el cuadro anterior y por experiencia propia podemos afirmar que el ajuste de líneas por Tie Lines ofrece mejor resultado, principalmente por su análisis de búsqueda de coincidencia de elementos “características” entre los traslapes de las líneas de vuelo.

Para el ajuste de líneas por Tie lines se requiere la nube de puntos por bandas de barrido y sus respectivas trayectorias sea formato SBET o trj.



*Figura 57: Líneas de vuelo sin ajuste
Fuente: Elaboración Propia*



*Figura 58: Líneas de vuelo ajustadas
Fuente: Elaboración Propia*

Line	Position	View
2 *	295496.7	--0.022
Section line		
1 *	295820.8	--0.343
3 *	295624.9	++0.343
Section line		
3 *	295624.7	++0.009
4 *	295736.0	--0.009
Section line		
1 *	295820.8	++0.003
3 *	295624.8	--0.003
Section line		
3 *	295624.9	++0.018
4 *	295736.0	--0.018
Section line		
1 *	295820.8	--0.004
2 *	295496.6	++0.002
3 *	295625.1	++0.002
Section line		
1 *	295820.1	++0.393
2 *	295496.6	++0.413
4 *	295736.5	--0.807
Section line		
3 *	295625.1	++0.178
4 *	295736.0	--0.178
Section line		

*Figura 59: Error final de ajuste de línea
Fuente: Elaboración Propia*

4.1.5.2 Clasificación

En los capítulos anteriores hemos explicado cómo se realiza el procesamiento de la nube de puntos en crudo que combina los datos del GPS e IMU para la obtención de una nube de puntos en formato LAS. Luego, posterior al ajuste y calibración de líneas de vuelo se procede a realizar la clasificación de puntos.

El proceso de clasificación tiene como misión la identificación de entidades que se registran en la nube de puntos producto del barrido Laser y es la parte del proceso de levantamiento LiDAR que requiere mayor cantidad de horas/hombre en un proyecto

topográfico LiDAR ya que la clasificación de puntos requiere de la interpretación de un operador.

Para asistir esta labor que puede llegar a consumir el 80% del tiempo total del proyecto Sithole & Vosselman (2004) se emplean algoritmos de clasificación que facilitan la labor del operador.

El uso por sí mismo de uno o varios algoritmos no significa una clasificación de puntos óptima, por lo que es necesario considerar su aplicación en función a sus configuraciones, al reconocimiento del terreno y la densidad de puntos como los aspectos a considerar en la clasificación.

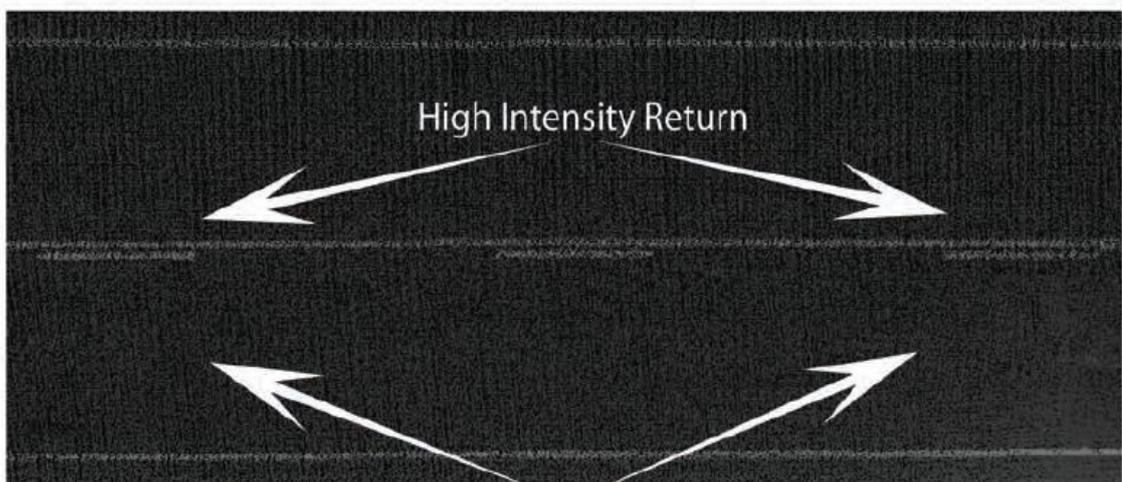
Dong & Cheng (2018) manifiestan que el diseño de un algoritmo de filtrado o clasificación de puntos, generalmente se basa en dos criterios: (1) el terreno tiene la elevación más baja en comparación con los objetos que se encuentran arriba y (2) la elevación y la pendiente cambian más lentamente para la tierra desnuda que para el DSM.

Según Meng (2010) existen seis categorías diferentes de algoritmos los cuales son los siguientes:

1. Algoritmos basados en la segmentación y agrupamiento.
2. Algoritmos Morfológicos
3. Algoritmos en función de la dirección de escaneo
4. Algoritmos basados en las curvas de nivel
5. Algoritmos basados en triangulación
6. Algoritmos basados en interpolación

Las categorías dispuestas por Meng (2010) consideran la clasificación de puntos en función a la información de posición de la nube de puntos y/o su orientación, sin embargo, una clasificación también debe apoyarse en la intensidad de los pulsos emitidos por el LiDAR y el uso de imágenes Aéreas.

Matthew (2010) La intensidad de la luz emitida por un sensor LiDAR es una propiedad conocida, basada en la Potencia y longitud de onda del sensor. Cuando un rayo láser LiDAR se refleja de nuevo en el LiDAR sensor, la cantidad de luz devuelta, calculada como un porcentaje de la luz emitida se denomina "intensidad". Los valores de intensidad están directamente relacionados con la reflectividad del objeto físico que se está escaneando. La Figura 60, ilustra una sección de una carretera con intensidad de contraste. El altamente la pintura reflectante devuelve señales de alta intensidad mientras que el asfalto oscuro y oscuro devuelve baja intensidad señales

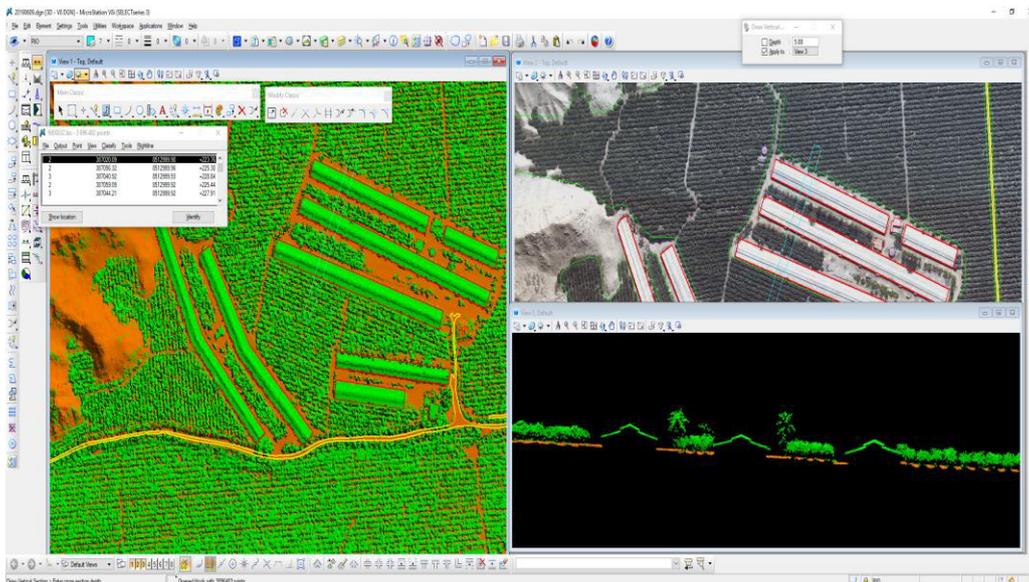


*Figura 60: Intensidad de retorno
Fuente: Matthew 2010*

Los rendimientos de intensidad, como la pintura en la carretera, se contrastan visiblemente con la baja

Matthew (2010) Una opción adicional que permite la identificación y clasificación de una nube de puntos es asignar una coloración a la nube de puntos a partir de imágenes en RGB, este proceso se le conoce como Mapeo de pixeles la nube de puntos al adoptar los colores de la imagen facilita la clasificación principalmente con los elementos que constituyen un Modelo digital de elevación.

Finalmente se requiere de un control visual asistido por el operador donde debe destacarse su experiencia en el análisis e interpretación de datos LiDAR, ver figura 61.



*Figura 61: Proceso de clasificación de nube de puntos.
Fuente: Elaboración Propia*

4.1.5.3 Filtrado de información

El filtrado de información se basa en reducir la cantidad de puntos necesarios para optimizar la representación de un MDT, esto en razón de emplear una menor cantidad de puntos necesarios para el procesamiento de la información que se capaz de

procesarse en diversas plataformas de procesamiento y para diversas finalidades como el diseño de carreteras ya que en los lugares de pendiente uniforme no será necesario disponer de toda la nube de puntos ya que en lugar plano bastara con disponer de 4 puntos en tanto una superficie irregular o con cambio de taludes si será necesario una mayor cantidad de puntos.

4.1.5.4 Representación del MDT

La generación del MDT ocurre cuando se ha terminado con la clasificación de la nube de puntos y su representación puede ser en modo Ráster o a través de curvas de nivel o TIN.

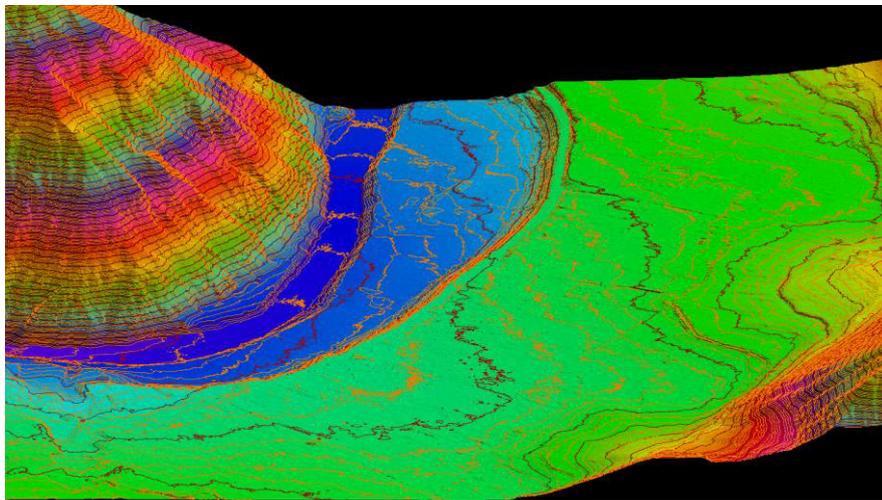


Figura 62: Representación de un MDT
Fuente: Elaboración Propia

4.1.5.5 Matriz de secuencia para procesamiento de nube de puntos y MDT

La siguiente Tabla muestra la secuencia de procesamiento de la nube de puntos y su obtención de MDT en el levantamiento topográfico LiDAR.

Tabla 20: Procedimientos de Edición LiDAR

PROCEDIMIENTO	MODULO	DESCRIPCION
CARGAR ARCHIVOS *.LAS DENTRO DEL PROYECTO	TerraScan	Importación de los archivos *.LAS del proyecto, transformación al sistema de coordenadas del proyecto
IMPORTACION DE TRAYECTORIAS	TerraScan y TerraPhoto	Importación de trayectorias, transformación al sistema de coordenadas del proyecto
CRACION DE PROYECTO Y DISEÑO TILES	TerraScan	Creación de proyecto en TerraScan y subdivisión del área de trabajo en bloques para la distribución de los trabajos de edición en diferentes Workstation.
EJECUCION DE 1RA MACRO "GROUND PER LINE"	TerraScan	Macro para diferenciar los puntos de terreno en cada línea de vuelo
EJECUCION DE 2DA MACRO "DEFAULT"	TerraScan	Macro para diferenciar los puntos de terreno en cada dos puntos en default
EJECUCION DE 3RA MACRO "DEDUCE LINES"	TerraScan	Macro para relacionar los puntos con las trayectorias de vuelo
DIFERENCIACION DE TRAYECTORIAS	TerraMatch	Emplear el módulo TerraMatch para la diferenciación de trayectorias, este proceso prepara los datos para el ajuste de líneas.
AJUSTE DE LINEAS	TerraMatch	Realizar el ajuste de líneas mediante el proceso "Find Fluctuation" de líneas, donde se determinará los errores en las líneas y posterior ajuste.
EJECUCION MACRO "CUT OVERLAP"	TerraMatch	Realizar un corte de los bordes de las líneas de vuelo con sobre posición.
GENERACION DE MODELO DIGITAL	TerraModeler	Creación del modelo digital del terreno posterior al ajuste de líneas, en este proceso se integrarán los puntos de control y el levantamiento topográfico.
GENERACION DEL MODEL KEY POINT	TerraScan y TerraModeler	Clasificación de los puntos clave para el modelamiento final del terreno.
EJECUCION DE MACRO "CONTOUR KEY POINT"	TerraScan y TerraModeler	Generar los puntos clave para triangulación de las curvas de nivel.
GENERACION DE CURVAS DE NIVEL	TerraModeler	Finalmente en este proceso se obtienen las curvas de nivel, en donde se realizará un filtrado para exportar a diferentes formatos.

Fuente: Elaboración Propia

4.1.5.6 Procesamiento en otras plataformas

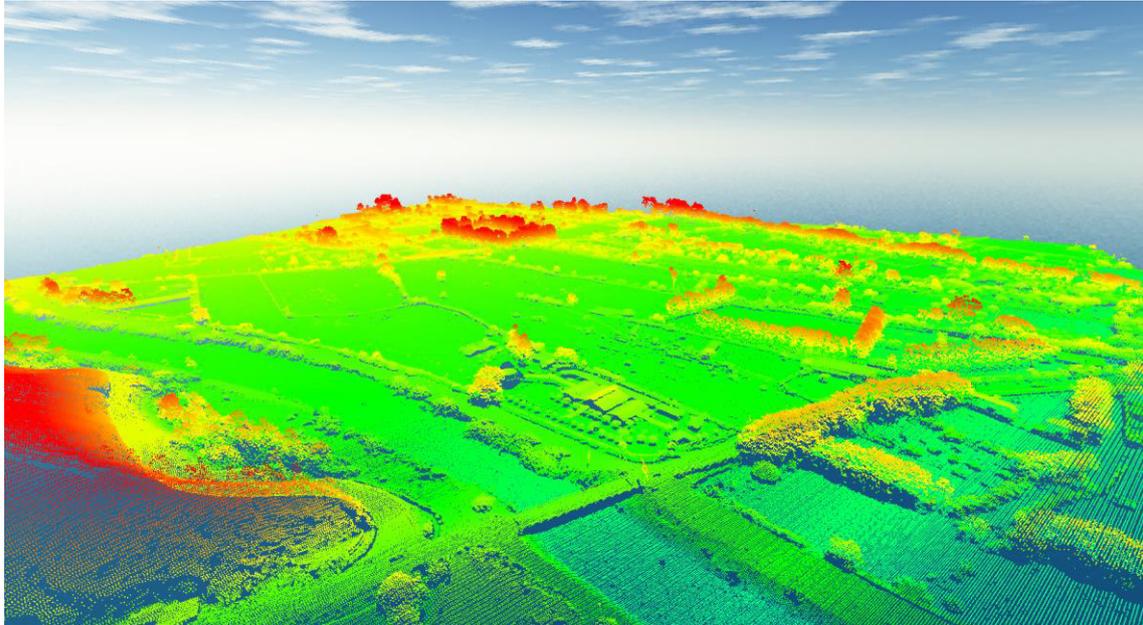
Actualmente, los softwares CAD y GIS han incluido en sus plataformas la posibilidad de realizar un procesamiento de la nube de puntos, principalmente visualización, clasificación y asignación de color empleando imágenes o fotografías de fondo, también de obtener modelos digitales de terreno. Sin embargo, el procesamiento de datos crudos aun es específico para los softwares especializados de los fabricantes de equipos. También, es posible obtener información vectorial a partir de la nube de puntos como es el caso de los levantamientos de líneas de transmisión cuyo objetivo es obtener información de los tendidos eléctricos.

Los softwares cuyo desarrollo ha ido en aumento en el manejo de información LiDAR (Nube de puntos) de acuerdo con mi experiencia, son los siguiente:

- Microstation – TerraSolid: Clasificación, Ajuste de trayectorias, Modelamiento, Vectorización
- Global Mapper: Clasificación, Modelamiento, Vectorización
- MARS: Clasificación
- ArcGIS: Clasificación
- QGIS: Clasificación
- AutoCAD MAP: Clasificación, Modelamiento

Se resalta entre ellos el MicroStation – Terrasolid, por su alta rigurosidad en el procesamiento de la nube de puntos y modelamiento en trabajos de alta precisión. También

el Global Mapper por su facilidad en la visualización y capacidad de exportar diversos modelos digitales a través de la nube de puntos, ver figura 63.



*Figura 63: Visualización de Nube de puntos en 3D en Global Mapper
Fuente: Elaboración Propia*

4.2 Evaluación de resultados de Procesamiento PPP

De acuerdo con el procesamiento de los datos de navegación con PPP descrito en el punto 3.6.4. Se ha realizado 2 procesamientos con PPP. El primer procesamiento con datos de efemérides Rápidas y el segundo procesamiento con efemérides finales, recordemos que ambos conceptos de efemérides fueron desarrollados en el punto 2.4.

A continuación, mostraremos los resultados comparando el procesamiento de la trayectoria PPP con efemérides Rápidas vs los valores obtenidos de la trayectoria procesados con puntos de estación Base, esta comparación también será realizada para la superficie obtenida por PPP efemérides finales.

Veamos la comparación de los resultados del procesamiento con PPP – Efemérides Rápidas, tiempo de espera de descarga de efemérides de 3 a 9 horas

Tabla 21: Comparación resultado PPP - Rápidas

Vuelo 20180301	Procesamiento de trayectoria Base Station	Procesamiento de trayectoria PPP-Rápida
Latitud (Y) (+/- cm)	10	6
Longitud (X) (+/- cm)	20	10
Altura (Z) (+/- cm)	20	14

Fuente: Elaboración Propia

Del procesamiento con PPP – Efemérides Rápidas se observa que los residuales en latitud y longitud son 6cm y 10 cm respectivamente en tanto en altitud es de 14cm, valores por debajo del Procesamiento con una estación base.

Ahora veamos los resultados del proceso de la trayectoria con procesamiento PPP- Efemérides finales, tiempo de espera de descarga de efemérides de 12 a 18 días.

Tabla 22: Comparación resultado PPP – Finales

Vuelo 20180301	Procesamiento de trayectoria Base Station	Procesamiento de trayectoria PPP-Final
Latitud (Y) (+/- cm)	10	3
Longitud (X)(+/- cm)	20	5
Altura (Z) (+/- cm)	20	7

Fuente: Elaboración Propia

Del procesamiento con PPP – Efemérides Finales se observa que los residuales en latitud y longitud son 3cm y 5 cm respectivamente en tanto en altitud es de 7cm, con resultados también por debajo de los obtenidos con una estación base.

De lo observado, al evaluar ambos resultados obtenemos que las precisiones en trayectoria son inferiores a los resultados obtenidos con el procesamiento de estación base y solo el procesamiento con PPP-Fina logra un resultado menor a lo indicado para la determinación de las trayectorias en las Especificaciones Técnicas Generales de levantamiento de información mediante SENSOR LIDAR aerotransportado del instituto Geográfico Militar del Ecuador. Tolerancia precisión de post proceso trayectoria RMSE <10cm en XYZ.

Por lo tanto, podemos decir el procesamiento con PPP final mejora la precisión del cálculo de la trayectoria y como segundo mejor resultado es el cálculo con PPP – Ultra rápido. Cabe precisar que durante al ajuste de líneas se mejorará las precisiones de todo el bloque.

Ahora veamos posterior al procesamiento de la trayectoria y el ajuste entre Líneas de vuelo, la comparación de las superficies con PPP – Ultra Rápido y PPP – Final, respecto a los puntos de control, veremos que las discrepancias de la nube de punto son mínimas.

Respecto a los resultados con Precise Point Positioning con efemérides ultra rápido, al cual indicaremos como PPP- Rápido vs los puntos de control, mostrado en la tabla 23, existe una precisión en el rango de -0.081m. a +0.136m.

Tabla 23: Comparación puntos de control y nube de punto PPP- Ultra Rápido

D:\2018\wilmer\análisis puntos de control vs ground_plot PPP-1.csv					
Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
LAM01045	659107.874	9239368.167	82.549	82.520	-0.029
LAM01046	667539.608	9237323.322	93.584	93.600	+0.016
LAM01048	687858.437	9240915.985	209.411	209.430	+0.019
1B	687334.833	9240813.270	200.824	200.960	+0.136
2A	682648.404	9240293.916	167.026	167.050	+0.024
3A	679903.867	9239574.986	151.659	151.770	+0.111
3B	679903.857	9239609.307	151.344	151.450	+0.106
4A	677425.748	9239108.690	136.620	136.680	+0.060
4B	677419.101	9239190.728	134.325	134.360	+0.035
4aA	676984.810	9238991.552	135.800	135.880	+0.080
4bB	676979.683	9239038.616	133.308	133.380	+0.072
5A	676098.475	9238971.037	133.327	133.420	+0.093
5B	675869.239	9238968.979	133.256	133.350	+0.094
7A	674758.286	9238601.039	126.408	126.530	+0.122
7B	674847.350	9238647.792	124.782	124.850	+0.068
8A	674465.086	9238414.265	127.030	127.120	+0.090
11A	663987.092	9238227.732	91.888	91.860	-0.028
12A	663402.753	9238311.333	92.689	92.660	-0.029
12B	663387.832	9238340.369	92.893	92.860	-0.033
13A	662181.280	9238548.014	90.711	90.630	-0.081
13B	662195.613	9238511.009	90.371	90.320	-0.051
14A	659949.096	9239013.478	83.757	83.810	+0.053
14B	659988.718	9239044.962	84.697	84.700	+0.003
15B	659054.661	9239388.218	82.633	82.640	+0.007
FOT05	659108.117	9239371.696	82.800	82.800	-0.000
FOT03	682946.102	9240162.339	169.804	169.850	+0.046
FOT02	671762.817	9237645.243	120.224	120.150	-0.074
FOT01	663401.327	9238328.877	92.732	92.800	+0.068
FOT04	705304.417	9240530.399	739.165	739.130	-0.035
Average dz	+0.033				
Minimum dz	-0.081				
Maximum dz	+0.136				
Average magnitude	0.057				
Root mean square	0.068				
Std deviation	0.061				

Fuente: Elaboración Propia

Respecto a los resultados con Precise Point Positioning con efemérides final, al cual indicaremos como PPP-Final vs los puntos de control, mostrado en la tabla 24, existe una precisión en el rango de -0.094m. a +0.136m.

Tabla 24: Comparación puntos de control y nube de punto PPP-Final

D:\2018\wilmer\análisis puntos de control vs ground_plot PPP-2.csv					
Number	Easting	Northing	Known Z	Laser Z	Dz
LAM01045	659107.874	9239368.167	82.549	82.510	-0.039
LAM01046	667539.608	9237323.322	93.584	93.600	+0.016
LAM01048	687858.437	9240915.985	209.411	209.430	+0.019
1B	687334.833	9240813.270	200.824	200.960	+0.136
2A	682648.404	9240293.916	167.026	167.040	+0.014
3A	679903.867	9239574.986	151.659	151.750	+0.091
3B	679903.857	9239609.307	151.344	151.430	+0.086
4A	677425.748	9239108.690	136.620	136.650	+0.030
4B	677419.101	9239190.728	134.325	134.320	-0.005
4aA	676984.810	9238991.552	135.800	135.870	+0.070
4bB	676979.683	9239038.616	133.308	133.340	+0.032
5A	676098.475	9238971.037	133.327	133.410	+0.083
5B	675869.239	9238968.979	133.256	133.330	+0.074
7A	674758.286	9238601.039	126.408	126.510	+0.102
7B	674847.350	9238647.792	124.782	124.840	+0.058
8A	674465.086	9238414.265	127.030	127.100	+0.070
11A	663987.092	9238227.732	91.888	91.850	-0.038
12A	663402.753	9238311.333	92.689	92.620	-0.069
12B	663387.832	9238340.369	92.893	92.850	-0.043
13A	662181.280	9238548.014	90.711	90.660	-0.051
13B	662195.613	9238511.009	90.371	90.310	-0.061
14A	659949.096	9239013.478	83.757	83.800	+0.043
14B	659988.718	9239044.962	84.697	84.690	-0.007
15B	659054.661	9239388.218	82.633	82.630	-0.003
FOT05	659108.117	9239371.696	82.800	82.790	-0.010
FOT03	682946.102	9240162.339	169.804	169.860	+0.056
FOT02	671762.817	9237645.243	120.224	120.130	-0.094
FOT01	663401.327	9238328.877	92.732	92.770	+0.038
FOT04	705304.417	9240530.399	739.165	739.120	-0.045
Average dz	+0.019				
Minimum dz	-0.094				
Maximum dz	+0.136				
Average magnitude	0.051				
Root mean square	0.061				
Std deviation	0.058				

Fuente: Elaboración Propia

4.3 Evaluación de modelamiento

Obtenido el procesamiento de las trayectorias con PPP, Efemérides Rápidas y finales, se ha procedido a realizar el ajuste de las líneas de vuelo y generar la nube de puntos, clasificación y posterior superficie para la representación del levantamiento topográfico por

método LiDAR. EL procedimiento para la obtención de la superficie se ha desarrollado en el punto 4.4. Obteniendo un MDT para cada procesamiento de trayectoria con PPP efemérides Rápidas y finales.

Es preciso considerar que ambas superficies has sido generadas a partir de la clasificación de la nube de puntos obteniendo solo puntos del terreno. Además de ello cada MDT de diferentes efemérides también ha sido clasificada y generada por diferentes operadores a fin de poder considerar la variable de clasificación de puntos.

A continuación, se muestra unas líneas de tendencia con las comparaciones de la superficie generada con PPP – Efemérides Rápidas y la superficie de control, representada en progresivas cada 500m. El mismo caso será aplicado para la superficie generada con PPP-Efemérides Finales y la superficie de control.

La superficie de control corresponde a la superficie generada con procesamiento de estación Base y ajustado a puntos de control de campo. Veamos los resultados de la superficie PPP-1 (Efemérides Rápidas) vs Superficie Control.

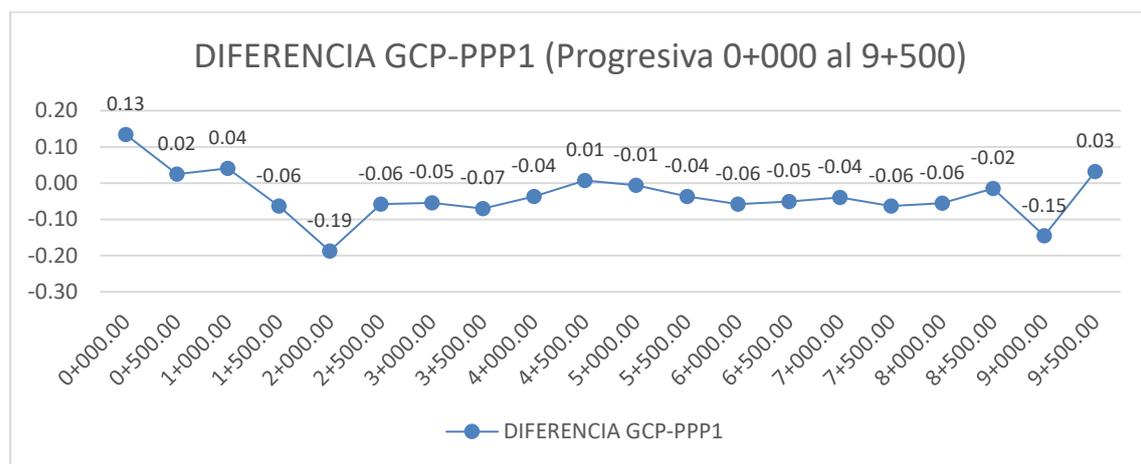


Figura 64: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 0+000 al 9+500
Fuente: Elaboración Propia

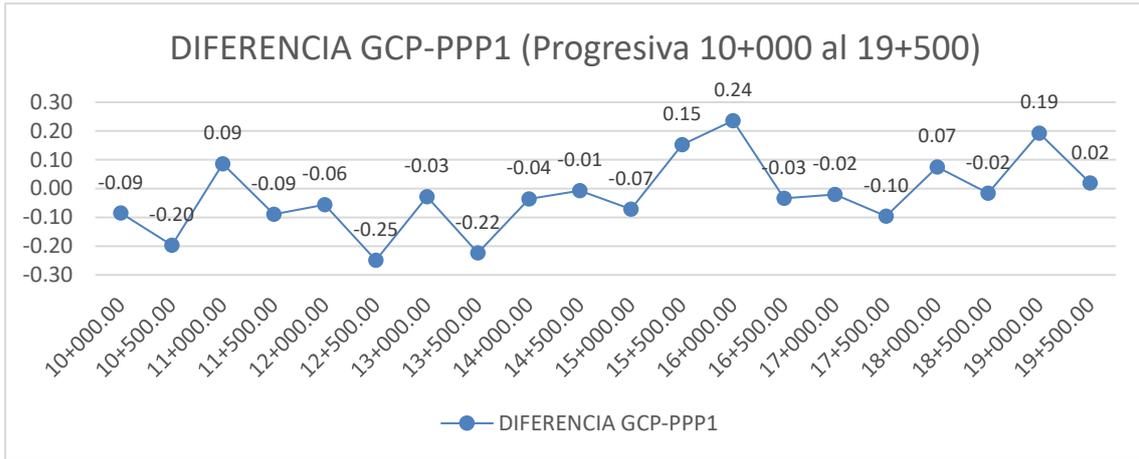


Figura 65: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 10+000 al 19+500
Fuente: Elaboración Propia

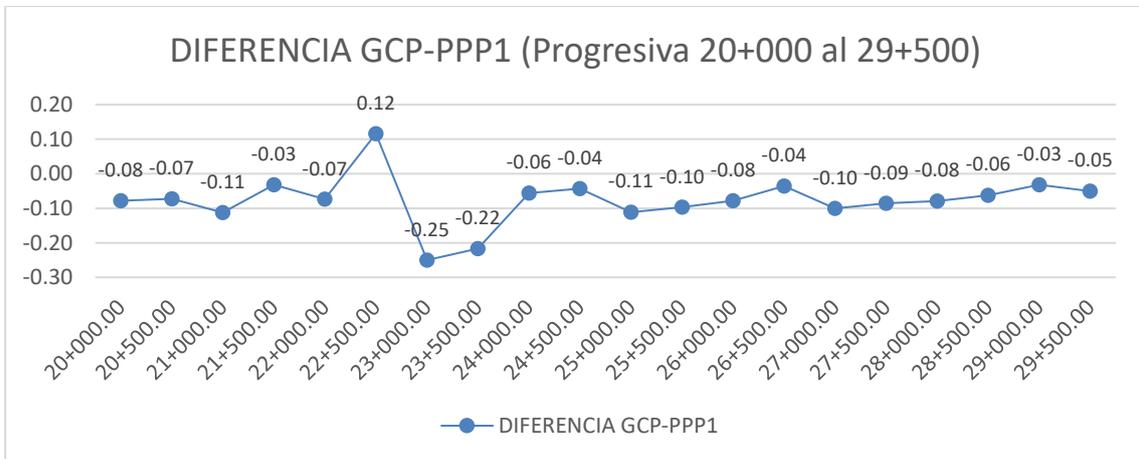


Figura 66: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 20+000 al 29+500
Fuente: Elaboración Propia

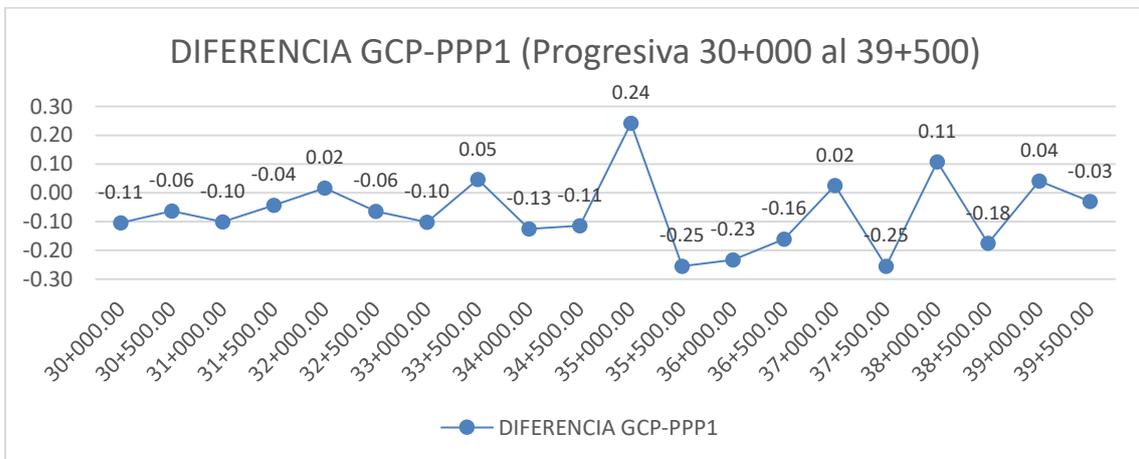
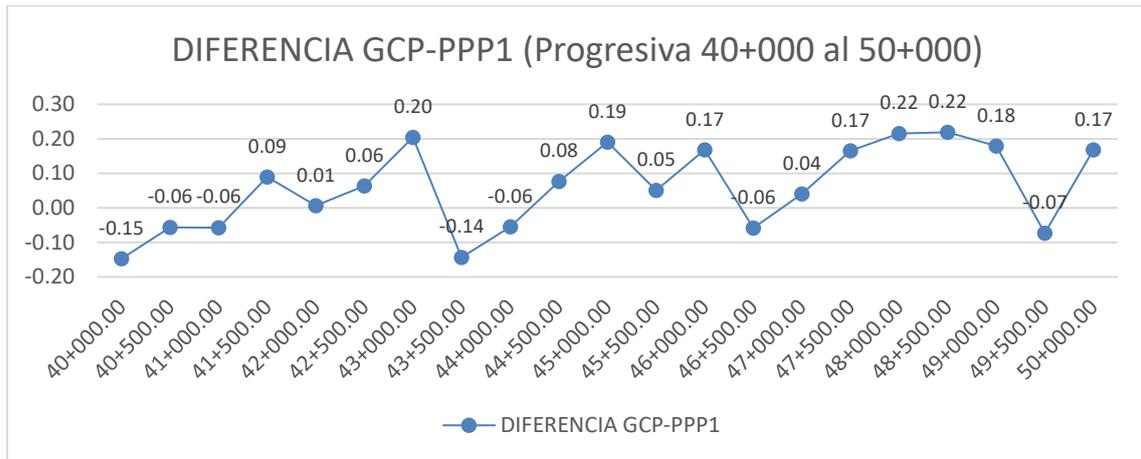


Figura 67: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 30+000 al 39+500
Fuente: Elaboración Propia



*Figura 68: Diferencia GCP - PPP Rápidas Tramo 40+000 al 50+000
Fuente: Elaboración Propia*

De acuerdo con la comparación de la superficie Obtenida por PPP- Efemérides Rápidas y la superficie de control se ha obtenido como resultados diferencias en el orden de -0.25m a 0.24m y un promedio de -0.03m, estos resultados se encuentran dentro de la tolerancia altimétrica establecida en ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA BÁSICA ESCALA 1:1 000 emitida por el Instituto geográfico Nacional del Peru cuya precisión máxima es de 25 cm.

Veamos ahora los resultados de la superficie PPP2 (PPP - final) vs Superficie Control

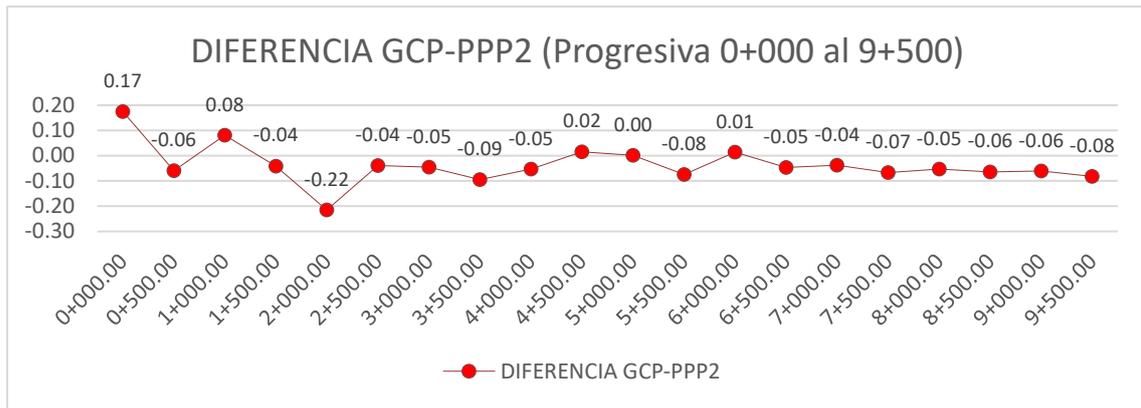


Figura 69: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 0+000 al 9+500
Fuente: Elaboración Propia

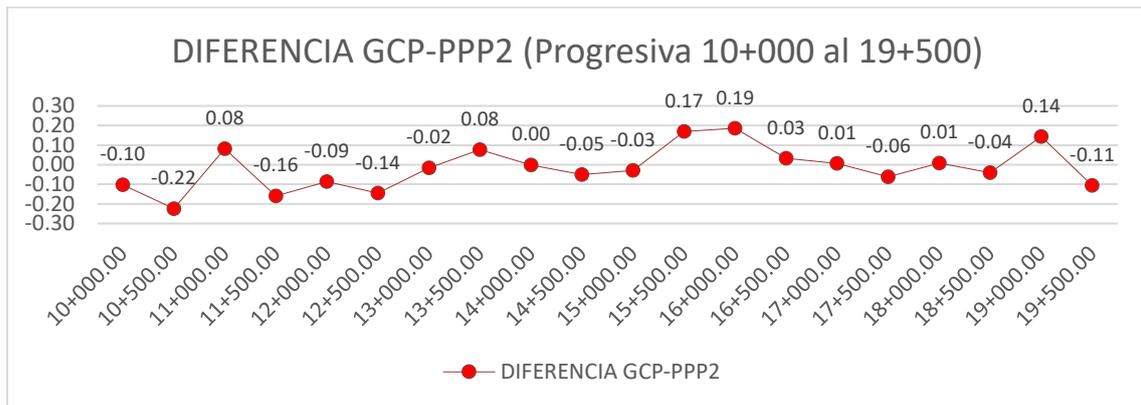


Figura 70: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 10+000 al 19+500
Fuente: Elaboración Propia

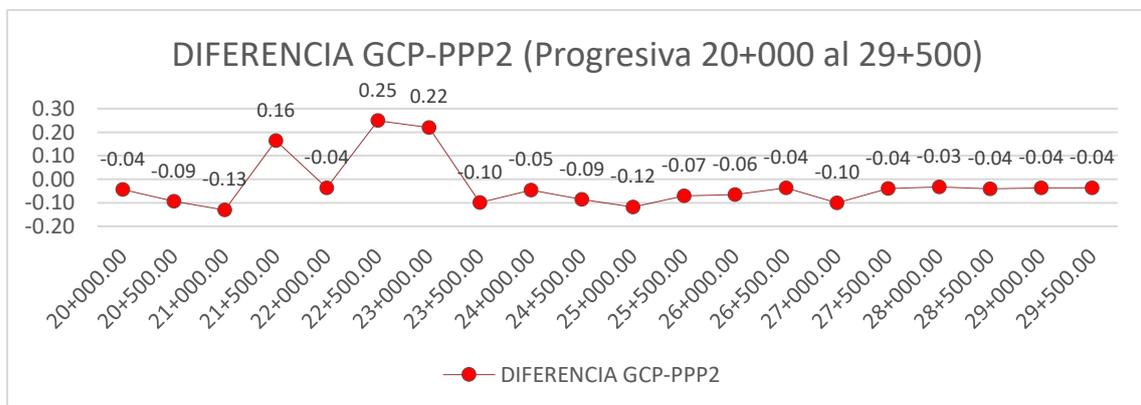


Figura 71: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 20+000 al 29+500
Fuente: Elaboración Propia

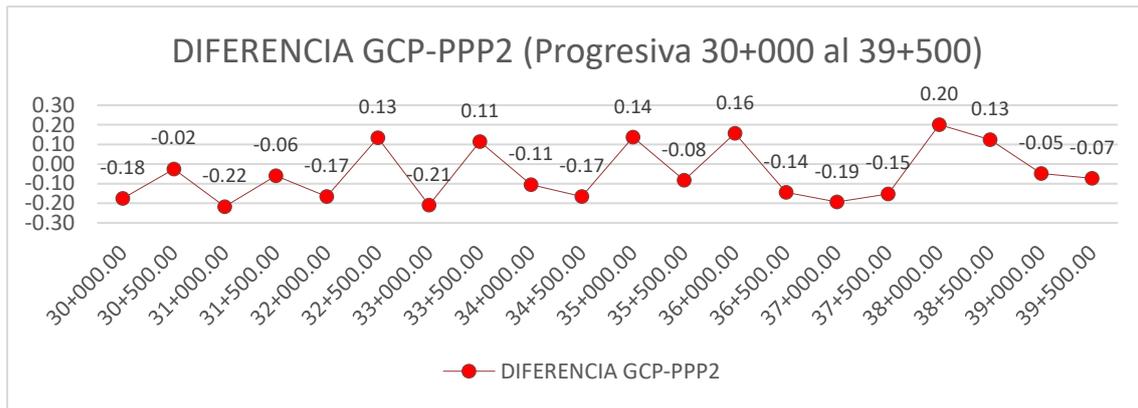


Figura 72: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 30+000 al 39+500
Fuente: Elaboración Propia

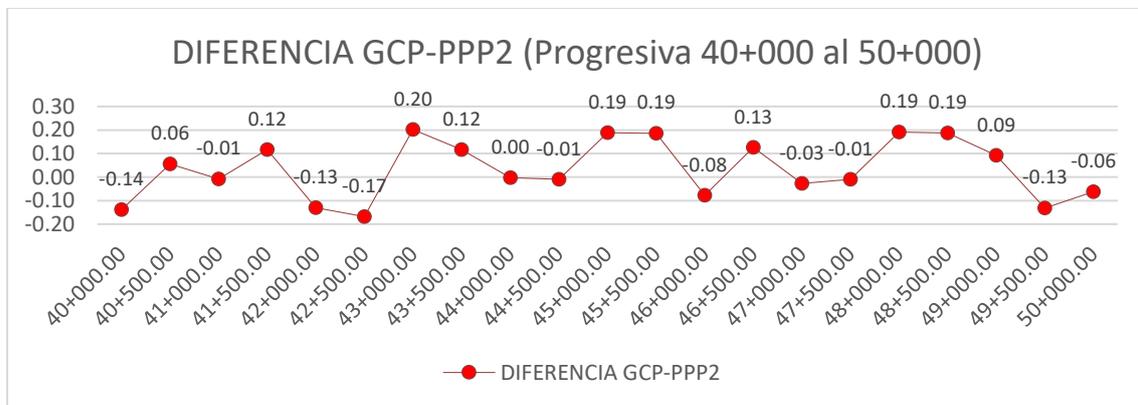


Figura 73: Diferencia GCP - PPP Final Tramo 40+000 al 50+000
Fuente: Elaboración Propia

En tanto de acuerdo con la comparación de la superficie Obtenida por PPP-Efemérides finales y la superficie de control se ha obtenido como resultados diferencias en el orden de -0.22m a 0.25m, y un promedio de -0.02m estos resultados se encuentran dentro de la tolerancia altimétrica establecida en ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA PRODUCCIÓN DE CARTOGRAFÍA BÁSICA ESCALA 1:1 000 emitida por el Instituto geográfico Nacional del Perú cuya precisión máxima es de 25 cm.

Finalmente, en los siguientes cuadros indicaremos las mejoras técnicas y mejoras en ahorro en tiempo y costo el levantamiento por método LiDAR vs procedimiento convencional.

Tabla 25: Análisis Económico

ANALISIS ECONOMICO		
Levantamiento de 50 km	METODO	
ACTIVIDAD	Levantamiento LIDAR	Levantamiento convencional
Georreferenciación	\$ 1,500.00	\$ 44,657.00
Levantamiento topográfico	\$ 34,800.00	\$ 16,000.00
Nivelación	\$ -	\$ 14,993.00
COSTO TOTAL	\$ 36,300.00	\$ 75,650.00

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 26: Análisis Tiempo

ANALISIS TIEMPO		
Levantamiento de 50 km	METODO	
ACTIVIDAD	Levantamiento LIDAR	Levantamiento convencional
Georreferenciación	3	30
Levantamiento topográfico	7	20
Nivelación	0	15
TIEMPO TOTAL REQUERIDO	10	65

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 27: Análisis mejoras técnicas

MEJORAS TECNICAS		
Levantamiento de 50 km	METODO	
ACTIVIDAD	Levantamiento LIDAR	Levantamiento convencional
Disponibilidad de Imagen	>15cm	no
Ancho de levantamiento disponible	>500 m	Limitado al aje
Permiso social para trabajo en campo	No	si
Grid de puntos en campo [m]	>1	<10
Restricciones por meteorología	Si	Si
Limitaciones por Vegetación o accesibilidad	No	Si

Fuente: Elaboración Propia

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

IGN (2011), en las especificaciones técnicas que son aplicables en el levantamiento LiDAR se indica que los procesamientos de trayectorias deben procesarse con una estación de referencia a una distancia no mayor a 40 km y las precisiones absolutas que se obtienen del procesamiento de las trayectorias no deben ser superior a 15cm en X,Y,Z. En tanto en mi investigación el procesamiento LiDAR con Precise Point Positioning y efemérides Rápidas mostrados en la tabla 21, se muestra un resultado 6cm. en Y, 10cm. en X, y 14cm. en Z, menores a 15cm solicitados por el IGN, es decir que el procesamiento con PPP-Rápidas cumple con la precisión. Por otro lado, en comparación con el Precise Point Positioning y final mostrados en la tabla 22, se muestra un resultado de 3cm. en Y, 5cm. en X, y 7cm. en Z, también menores a 15cm solicitados por el IGN e incluso menores a los resultados del Procesamiento con PPP- Ultra Rápida, además ambos procesamientos con PPP ultra rápido y PPP final no han requerido de una estación fija, es decir es libre y no limitado a una distancia con una estación de referencia.

Carpio (2015), indica dentro de su investigación de generación de modelos digitales mediante LiDAR empleo para el procesamiento de los datos LiDAR una estación de referencia ubicada a 50km del área del proyecto, en mi investigación el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) no requiere de una estación de referencia para cumplir con tener una precisión menor a 15cm como lo indica el IGN. Por otro lado, coincidimos que el modelamiento a partir del procesamiento de los datos LiDAR y la clasificación de la nube de puntos permite obtener un modelo digital preciso el cual ha validado en su investigación y en mi investigación está demostrado en las figuras del 64 al 73 en donde se demuestra los

resultados de comparar una superficie obtenida por procesamiento con Precise Point Positioning y una superficie control.

Arranz (2013), indica en su investigación que obtuvo diferencia de 19cm entre su modelo digital y los puntos de control utilizados y manifiesta que dicha diferencia es tolerable para la cartografía 1:1000 en tanto las diferencias obtenidas en mi investigación con los puntos de control para el caso del procesamiento con PPP-Rápida ha sido de un máximo de 0.136m. de acuerdo a lo indicado en la tabla 23 y el procesamiento con PPP – Final es también de 0.136m. de acuerdo con la tabla 23. Sin embargo el promedio de diferencias es más preciso con PPP- Final al obtener un promedio de +0.019m. En ambos casos sea con PPP- Ultra rápido o PPP – Final muestran un resultado aceptable y dentro de las tolerancias de una cartografía 1:1000.

Wang y Liu (2019), indica en su investigación que el procesamiento con Precise Point Positioning (PPP) tiene ventajas de no requerir procesar con una estación de referencia y que es posible realizar incluso un procesamiento en línea, es decir a través de internet en tiempo real, en mi investigación queda comprobado que efectivamente una mejora es omitir el uso de una estación de referencia ya que en nuestro caso las estaciones de referencia registran datos con épocas cada 5 segundos y también no hay las estaciones suficientemente cercanas para utilizarlas por lo que al tener que llevar una estación se gastaran recursos y tiempo que de acuerdo a los resultados mostrados en el capítulo de resultados no son necesarios ya que en el procesamiento de trayectorias se obtiene precisiones menores a lo solicitado por el IGN en procesamiento de vuelo < a 15 cm y en la obtención del modelamiento < a 20 en XY y < a 25 en Z.

Finalmente los resultados muestran que las discrepancias entre los perfiles obtenidos están dentro de la tolerancia de una cartografía a escala 1/1000, en tal sentido el modelamiento de la superficie obtenida con procesamiento PPP cumple con las tolerancias de la cartografía a escala 1/1000 sin necesidad de la implementación de una red de control o puntos de control en campo, esto constituye un ahorro a los proyectos en tiempo y costo, para los estudios de perfil o de factibilidad, ya que su objetivo es determinar la viabilidad de la construcción de una carretera y con este procedimiento de levantamiento topográfico se puede obtener topografía reduciendo recurso humano, tiempo y costo en las partidas de topografía y destinar los recursos ahorrados, por ejemplo en mejorar las evaluaciones sociales o medioambientales.

VI. CONCLUSIONES

El desarrollo del procesamiento de datos de vuelo LiDAR con Precise Point Positioning permitió obtener resultados óptimos para los procesamientos con PPP – Rápidas y PPP- final, para ambos casos la precisión es menor a 15cm normado por el IGN. Asimismo, se ha descrito los procesos que se requieren para la implementación de un proyecto LiDAR desde la planificación de vuelo, procesamiento de trayectorias con PPP, el procesamiento de la nube de puntos y la obtención del modelamiento del terreno a partir de proceso con PPP Rápidas y Finales, con el cual permitió obtener los modelamientos para la comparación con los puntos de control y la topografía control. Por lo tanto, mi investigación pone a disposición de futuras investigaciones del proceso de levantamiento topográfico por método LiDAR.

Del análisis de los resultados obtenidos a partir del procesamiento LiDAR con Precise Point Positioning, se concluye que no ha sido necesaria el procesamiento con datos de una estación de referencia sea a 50km o 40km, también que los resultados obtenidos del procesamiento de la trayectoria cumplen con las tolerancias exigidas por el IGN, además los resultados del procesamiento con PPP – Rápidas ha sido de 14 cm como máximo y del procesamiento con PPP – Finales ha sido de 7 cm como máximo. Sin embargo, el procesamiento con PPP – Final requiere de esperar de 12 a 18 días para disponer los datos de efemérides, mientras que el procesamiento con PPP – Rápidas están disponibles a partir de las 12 horas siguientes de la captura de los datos. Razón por la cual para efecto de obtener un modelamiento a una precisión de 1:1000 se puede realizar el procesamiento LiDAR con PPP – Rápidas.

De la comparación del modelamiento obtenido con el levantamiento topográfico LiDAR procesado con Precise Point Positioning y su evaluación con la muestra control que se obtuvo con procesamiento con estación Base y puntos de control, determina que no es necesario el uso de puntos de control en campo para asegurar la georreferenciación del levantamiento. Sin embargo, cabe la posibilidad de que requiera de una corrección para mejorar aún más la precisión, tal como la corrección que aplicó Carpio (2015) al elevar la superficie que obtuvo en 18cm en su investigación. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de mi investigación, no ha sido necesaria la aplicación de corrección alguna. Por lo tanto, de acuerdo con las precisiones obtenidas, queda demostrado que el levantamiento con tecnología LiDAR y su cumplimiento estricto de sus procedimientos para la obtención de topografía asegura una topografía a escala 1/1000, sin puntos de control. Ver anexos 9.1 y 9.2, que muestran precisiones admisibles encontradas en todo el recorrido de la muestra.

Respecto a la mejora en tiempo de ejecución el levantamiento LiDAR ofrece una mejora en 1/6 respecto a procedimientos convencionales, en condiciones meteorológicas óptimas. Además, en cuanto a la mejora económica, el levantamiento LiDAR ofrece un ahorro sobre el costo total de más del 50% sobre la partida de topografía. En tanto a las mejoras técnicas, el levantamiento LiDAR ofrece un mejor espaciamiento de puntos frente a métodos convencionales y su capacidad de mayor cobertura dispone y beneficia de información para otras especialidades que requieran de topografía e imagen de alta resolución.

VII. RECOMENDACIONES

Es necesario que los usuarios de esta tecnología se capaciten previamente en el manejo de la información LiDAR para desarrollarlo e implementarlos adecuadamente y así aprovechar todas las ventajas que ofrece y que seguirán en aumento en los próximos años.

Al ser un levantamiento que depende de las condiciones meteorológicas los proyectos, deben ejecutarse preferentemente en temporadas sin lluvias o mínima nubosidad. Para que exista un trabajo continuo y se respeten los tiempos de trabajo.

De disponer puntos de control pueden ser aplicados como puntos de chequeo para aplicar y mejorar las precisiones del levantamiento topográfico LiDAR.

Emplear sólo los trabajos de georreferenciación a los estudios viales definitivos y excluir la georreferenciación de la topografía cuando se emplee el método de levantamiento LiDAR para los estudios de factibilidad y perfil. Además, las instituciones como el IGN deben implementar normas para tener un marco normativo en el que las empresas proveedoras de levantamiento LiDAR puedan tener un estándar.

Se debe disponer de los reportes de procesamiento de trayectorias y ajuste de líneas de vuelo para verificar el cumplimiento de los procesos y precisiones obtenidas.

VIII. REFERENCIAS

- Arranz (2013) Arranz Justel, Jose. "Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas laser, para el modelado geométrico, registro y documentación aplicados a entidades de interés patrimonial". Tesis Doctoral, Escuela tecnica Superior de Ingenieros en Topografía, Geodesia y cartografía de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España. 2013.
- ASPRS (2010) American Society for Photogrammetry and Remote Sensing "Manual of Photogrammetry" Fifth Edition 2010 p. 705
- Bisnath (2009) Bisnath, S. B. and Gao, Y. Innovation: Precise Point Positioning – A Powerful Technique with a promising future, GPS World, April 2009
- Carpio (2015) Carpio Concha, Juan. "Generación de modelos digitales de terreno mediante metodología LiDAR aplicado en Selva". Tesis de Grado, Universidad Nacional Federico Villarreal. Lima. Perú. 2015.
- Castro (2013) Andrés Mauricio Castro Pescador "Fusión Sensórica INS/ GPS para Navegación en Plataformas Móviles" Tesis de Maestría, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá Colombia. 2013. p. 6-8
- Chapman (1952) Chapman C.A. "A new quantitative method of topographic analysis". American Journal of Science, 250: 428-452.
- Dong & Cheng (2018) Pinliang Dong & Qi Chen "LiDAR remote sensing and application. Ed. CRC Press Taylor & Francis. Indiana U.S.A. 2018. 1ra Edición. p.43

ESRI (2019) <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/manage-data/las-dataset/what-is-intensity-data-.htm>

Farrel (1999) Jay Farrel and Matthew Barth “THE GLOBAL POSITIONING SYSTEM AND INERTIAL NAVIGATION” Editorial: McGraw-Hill 1999 p. 1-3

Felicísimo (1994) Angel M. Felicísimo “Introducción a los modelos digitales del terreno” Oviedo 1994. p. 13 <http://www.etsimo.uniovi.es/~feliamfeli@unex.es>

Ferrer (2009) Gonzalo Ferrer Mínguez. “Integración Kalman de Sensores Inerciales INS con GPS en un UAV. RSLab TSC UPC. Abril 2009

Galván (2014) Galván Pineda, Sergio. “El sistema LiDAR aplicado a la geomática, generando modelos digitales de elevación (MDE). Tesis de Grado, Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México. 2014.

Gutiérrez (2003) Gutiérrez, José R. “Multipath and GPS Signal Jamming Mitigation through Multiple Model Adaptive Estimation Applied to Ultra-Tightly Coupled GPS/INS Architecture”. MS thesis, Air Force Institute of Technology, 2003.

Huber (2010) Katrin Huber, Florian Heuberger, Christoph Abart, Ana Karabatic, Robert Weber and Philipp Berglez. PPP: Precise Point Positioning – Constraints and Opportunities (Pg. 2-4) FIG Congress 2010 Facing the Challenges – Building the Capacity. Sydney, Australia, 11-16 April 2010

Huerta (2005) Eduardo Huerta 2005 “GPS Posicionamiento Satelital” Editorial: UNR editora Universidad Nacional de Rosario – Argentina (p. 113 -115)

IGN (2011) Instituto Geográfico Nacional. Especificaciones Técnicas para la producción de cartografía Básica Escala 1:1000. Perú. 2011.

IGM (2016) Instituto Geográfico Militar. Especificaciones Técnicas Generales de levantamiento de informacion mediante sensor LiDAR Aerotransportado. Ecuador. 2016.

IGS (2019) <http://www.igs.org/>

Inegi (2016) <https://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/g14a55a1.html>

IPAS (2010) Leica Geosystems IPAS TC User Manual – Leica 2010

Kasser (2002) Michel Kasser and Yves Egels “Digital Photogrammetry” Editorial: Taylor & Francis London and New York (pg. 159-160)

Leica (2011) Leica ALS 70 User Manual “Leica ALS70 Documentation – Technical data. Vol.1” Pg. 145.

LiDAR-UK (2018) <http://www.lidar-uk.com/a-brief-history-of-lidar>

Linder (2009) Wilfried Linder “Digital Photogrammetry” First Edition Editorial: Springer, Alemania. p. 55-57

Matthew (2010) Matthew J. Lato “Geotechnical Applications of LiDAR Pertaining to Geomechanical Evaluation and hazard identification” Queen’s University. Kingston, Ontario, Canada. 2010. p. 30-31.

Ministerio de Cultura (2016) <https://www.gob.pe/institucion/cultura/noticias/48718-una-nueva-era-para-la-arqueologia-se-abre-en-el-peru-con-el-uso-de-la-tecnologia-lidar-en-el-estudio-de-machu-picchu-y-el-gran-pajatzen>

Meng (2010) Meng, X., Currit, N., and Zhao, K., 2010. Ground filtering algorithms for airborne LiDAR data. A review of critical issues. Remote Sensing, 2: 833–860.

MTC (2018) <https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/rutas.html>

MTC (2019) Bases Concurso Público N° 005-2019-MTC/10 Contratación del Servicio de Consultoría en General para la Elaboración del Estudio de Pre-Inversión a Nivel de Perfil del Proyecto “Creación del ferrocarril Lima – Ica”.

Neu (2004) Jonathan M. Neu “A Tightly-coupled INS/GPS integration using a mems IMU”. MS thesis, Air Force Institute of Technology, 2004.

NOAA (2016) <http://oceanservice.noaa.gov/facts/lidar.html>

Novatel (2018) <http://www.novatel.com/products/software/inertial-explorer/>

Paredes (2013) Mauricio Paredes” Procesamiento PPP de Observaciones GNSS Utilizando Software libre RTKLIB” Editorial: Universidad de Santiago De Chile, Chile p. 42-50

Rizos (2012) Chris Rizos “Precise Point Positioning: Is the Era of Differential GNSS Positioning Drawing to an End? University of New South Wales, Sydney Australia p.7

Santos (2006) Luis Julian Santos Perez “Cámaras fotogramétricas aéreas digitales: Ventajas e inconvenientes. Influencias en la ejecución de cartografía Catastral. p.59

Sithole & Vosselman (2004) Sithole, G., and Vosselman, G., 2004. Experimental comparison of filter algorithms for bare-Earth extraction from airborne laser scanning point clouds. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 59: 85–101.

Wang y Liu (2019) Wang Jungang y Liu Zhizhao. Improving GNSS PPP accuracy through WVR PWV augmentation. Journal of Geodesy. Netherlands, Heidelberg. 2019. <https://search.proquest.com/docview/2254190383?accountid=40045>

Welch (2001) Greg Welch y Gary Bishop “An Introduction to the Kalman Filter” University of North Carolina at Chapel Hill. USA. 2001. p.19.

IX. ANEXOS

9.1 Tabla de diferencias de secciones Superficie Control vs PPP-1 Ultra rápido

GCP VS PPP-1 (Ultra Rápido)			
PROGRESIVA	GCP	PPP-1	DIFERENCIA GCP-PPP1
0+000.00	77.835	77.701	0.13
0+500.00	82.026	82.001	0.02
1+000.00	83.371	83.33	0.04
1+500.00	83.55	83.613	-0.06
2+000.00	84.572	84.759	-0.19
2+500.00	87.726	87.784	-0.06
3+000.00	89.617	89.671	-0.05
3+500.00	90.261	90.331	-0.07
4+000.00	90.937	90.974	-0.04
4+500.00	91.963	91.956	0.01
5+000.00	92.722	92.728	-0.01
5+500.00	91.983	92.02	-0.04
6+000.00	91.655	91.713	-0.06
6+500.00	91.88	91.931	-0.05
7+000.00	93.106	93.145	-0.04
7+500.00	94.026	94.089	-0.06
8+000.00	94.966	95.021	-0.06
8+500.00	95.455	95.47	-0.02
9+000.00	94.225	94.37	-0.15
9+500.00	92.814	92.782	0.03
10+000.00	96.476	96.561	-0.09
10+500.00	95.379	95.576	-0.20
11+000.00	100.804	100.718	0.09
11+500.00	102.771	102.86	-0.09
12+000.00	106.287	106.343	-0.06
12+500.00	109.665	109.914	-0.25
13+000.00	114.323	114.351	-0.03
13+500.00	118.794	119.018	-0.22
14+000.00	118.864	118.9	-0.04
14+500.00	120.943	120.95	-0.01
15+000.00	122.899	122.97	-0.07
15+500.00	126.245	126.092	0.15
16+000.00	129.607	129.371	0.24
16+500.00	125.487	125.521	-0.03
17+000.00	125.477	125.497	-0.02
17+500.00	128.236	128.332	-0.10
18+000.00	131.238	131.163	0.07
18+500.00	132.009	132.025	-0.02
19+000.00	133.957	133.764	0.19
19+500.00	135.021	135.002	0.02
20+000.00	137.455	137.533	-0.08
20+500.00	141.063	141.136	-0.07
21+000.00	144.418	144.53	-0.11
21+500.00	147.49	147.522	-0.03
22+000.00	149.802	149.876	-0.07
22+500.00	153.592	153.476	0.12
23+000.00	151.243	151.493	-0.25

23+500.00	146.832	147.049	-0.22
24+000.00	157.868	157.924	-0.06
24+500.00	161.436	161.479	-0.04
25+000.00	165.506	165.617	-0.11
25+500.00	168.869	168.966	-0.10
26+000.00	172.303	172.381	-0.08
26+500.00	176.046	176.082	-0.04
27+000.00	180.449	180.549	-0.10
27+500.00	183.805	183.891	-0.09
28+000.00	184.196	184.275	-0.08
28+500.00	190.506	190.568	-0.06
29+000.00	192.649	192.681	-0.03
29+500.00	195.273	195.323	-0.05
30+000.00	200.004	200.109	-0.11
30+500.00	210.359	210.422	-0.06
31+000.00	226.471	226.572	-0.10
31+500.00	263.418	263.461	-0.04
32+000.00	297.814	297.798	0.02
32+500.00	334.376	334.44	-0.06
33+000.00	376.162	376.264	-0.10
33+500.00	411.008	410.962	0.05
34+000.00	444.513	444.639	-0.13
34+500.00	481.39	481.504	-0.11
35+000.00	510.748	510.506	0.24
35+500.00	490.148	490.403	-0.25
36+000.00	509.519	509.752	-0.23
36+500.00	541.856	542.017	-0.16
37+000.00	536.66	536.635	0.02
37+500.00	732.321	732.576	-0.25
38+000.00	939.077	938.97	0.11
38+500.00	920.148	920.324	-0.18
39+000.00	680.303	680.262	0.04
39+500.00	613.132	613.162	-0.03
40+000.00	557.967	558.114	-0.15
40+500.00	498.151	498.207	-0.06
41+000.00	469.171	469.228	-0.06
41+500.00	410.706	410.616	0.09
42+000.00	409.15	409.144	0.01
42+500.00	554.067	554.003	0.06
43+000.00	440.647	440.443	0.20
43+500.00	452.966	453.109	-0.14
44+000.00	573.213	573.268	-0.06
44+500.00	563.49	563.413	0.08
45+000.00	556.374	556.184	0.19
45+500.00	573.74	573.689	0.05
46+000.00	598.957	598.789	0.17
46+500.00	578.262	578.32	-0.06
47+000.00	542.545	542.504	0.04
47+500.00	571.416	571.251	0.17
48+000.00	787.167	786.952	0.22
48+500.00	910.8	910.581	0.22
49+000.00	703.643	703.464	0.18
49+500.00	700.929	701.002	-0.07
50+000.00	719.568	719.4	0.17

Fuente: Elaboración Propia

9.2 Tabla de diferencias de secciones Superficie control vs PPP-2 Final

GCP VS PPP-2 (Final)			
PROGRESIVA2	GCP	PPP-2	DIFERENCIA GCP-PPP2
0+000.00	77.835	77.66	0.17
0+500.00	82.026	82.085	-0.06
1+000.00	83.371	83.29	0.08
1+500.00	83.55	83.591	-0.04
2+000.00	84.572	84.787	-0.22
2+500.00	87.726	87.765	-0.04
3+000.00	89.617	89.662	-0.05
3+500.00	90.261	90.355	-0.09
4+000.00	90.937	90.99	-0.05
4+500.00	91.963	91.948	0.02
5+000.00	92.722	92.721	0.00
5+500.00	91.983	92.058	-0.08
6+000.00	91.655	91.641	0.01
6+500.00	91.88	91.926	-0.05
7+000.00	93.106	93.144	-0.04
7+500.00	94.026	94.093	-0.07
8+000.00	94.966	95.019	-0.05
8+500.00	95.455	95.519	-0.06
9+000.00	94.225	94.286	-0.06
9+500.00	92.814	92.896	-0.08
10+000.00	96.476	96.579	-0.10
10+500.00	95.379	95.603	-0.22
11+000.00	100.804	100.723	0.08
11+500.00	102.771	102.93	-0.16
12+000.00	106.287	106.374	-0.09
12+500.00	109.665	109.81	-0.14
13+000.00	114.323	114.339	-0.02
13+500.00	118.794	118.717	0.08
14+000.00	118.864	118.866	0.00
14+500.00	120.943	120.994	-0.05
15+000.00	122.899	122.928	-0.03
15+500.00	126.245	126.075	0.17
16+000.00	129.607	129.421	0.19
16+500.00	125.487	125.455	0.03
17+000.00	125.477	125.47	0.01
17+500.00	128.236	128.298	-0.06
18+000.00	131.238	131.229	0.01
18+500.00	132.009	132.05	-0.04
19+000.00	133.957	133.814	0.14
19+500.00	135.021	135.127	-0.11
20+000.00	137.455	137.498	-0.04
20+500.00	141.063	141.157	-0.09
21+000.00	144.418	144.549	-0.13
21+500.00	147.49	147.326	0.16
22+000.00	149.802	149.839	-0.04
22+500.00	153.592	153.343	0.25
23+000.00	151.243	151.023	0.22
23+500.00	146.832	146.931	-0.10
24+000.00	157.868	157.914	-0.05
24+500.00	161.436	161.522	-0.09
25+000.00	165.506	165.624	-0.12

25+500.00	168.869	168.94	-0.07
26+000.00	172.303	172.368	-0.06
26+500.00	176.046	176.083	-0.04
27+000.00	180.449	180.549	-0.10
27+500.00	183.805	183.844	-0.04
28+000.00	184.196	184.228	-0.03
28+500.00	190.506	190.547	-0.04
29+000.00	192.649	192.686	-0.04
29+500.00	195.273	195.31	-0.04
30+000.00	200.004	200.179	-0.18
30+500.00	210.359	210.384	-0.02
31+000.00	226.471	226.688	-0.22
31+500.00	263.418	263.478	-0.06
32+000.00	297.814	297.98	-0.17
32+500.00	334.376	334.242	0.13
33+000.00	376.162	376.371	-0.21
33+500.00	411.008	410.894	0.11
34+000.00	444.513	444.619	-0.11
34+500.00	481.39	481.556	-0.17
35+000.00	510.748	510.611	0.14
35+500.00	490.148	490.23	-0.08
36+000.00	509.519	509.362	0.16
36+500.00	541.856	542	-0.14
37+000.00	536.66	536.854	-0.19
37+500.00	732.321	732.473	-0.15
38+000.00	939.077	938.876	0.20
38+500.00	920.148	920.023	0.13
39+000.00	680.303	680.352	-0.05
39+500.00	613.132	613.205	-0.07
40+000.00	557.967	558.106	-0.14
40+500.00	498.151	498.096	0.06
41+000.00	469.171	469.179	-0.01
41+500.00	410.706	410.59	0.12
42+000.00	409.15	409.281	-0.13
42+500.00	554.067	554.235	-0.17
43+000.00	440.647	440.445	0.20
43+500.00	452.966	452.849	0.12
44+000.00	573.213	573.216	0.00
44+500.00	563.49	563.5	-0.01
45+000.00	556.374	556.185	0.19
45+500.00	573.74	573.554	0.19
46+000.00	598.957	599.035	-0.08
46+500.00	578.262	578.136	0.13
47+000.00	542.545	542.572	-0.03
47+500.00	571.416	571.426	-0.01
48+000.00	787.167	786.976	0.19
48+500.00	910.8	910.613	0.19
49+000.00	703.643	703.551	0.09
49+500.00	700.929	701.061	-0.13
50+000.00	719.568	719.631	-0.06

Fuente: Elaboración Propia

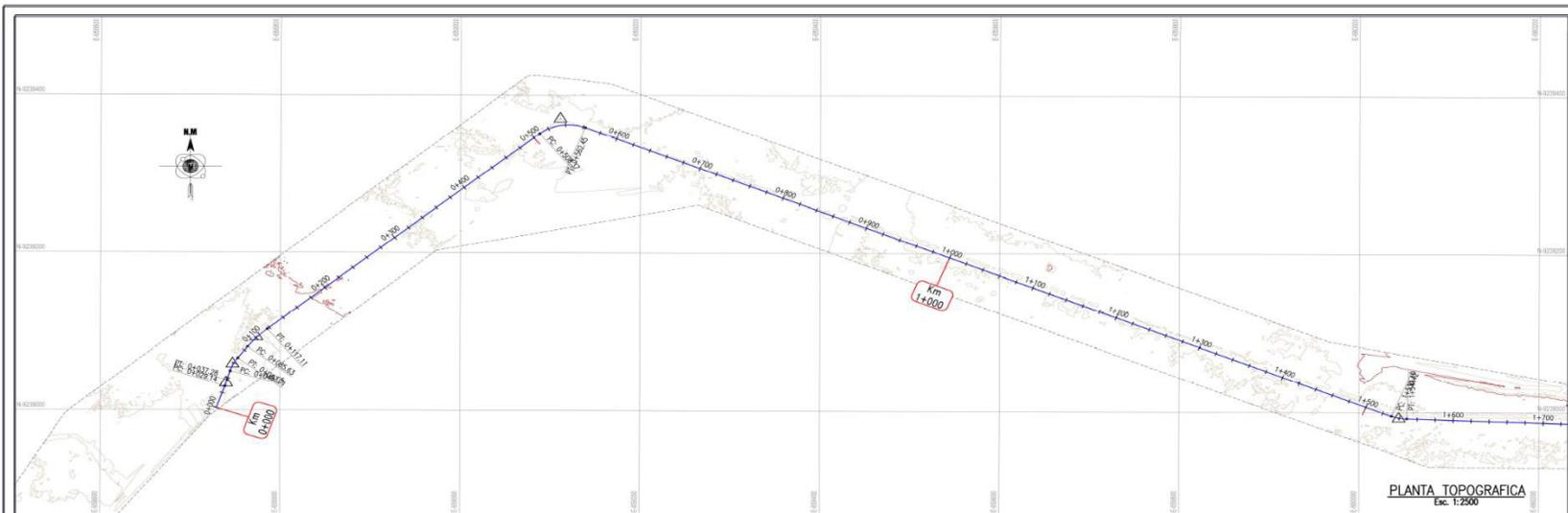
9.3 Planos

- Plano 1: GCP-PPP1-001
- Plano 2: GCP-PPP1-002
- Plano 3: GCP-PPP1-003
- Plano 4: GCP-PPP1-004
- Plano 5: GCP-PPP2-001
- Plano 6: GCP-PPP2-002
- Plano 7: GCP-PPP2-003
- Plano 8: GCP-PPP2-004

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

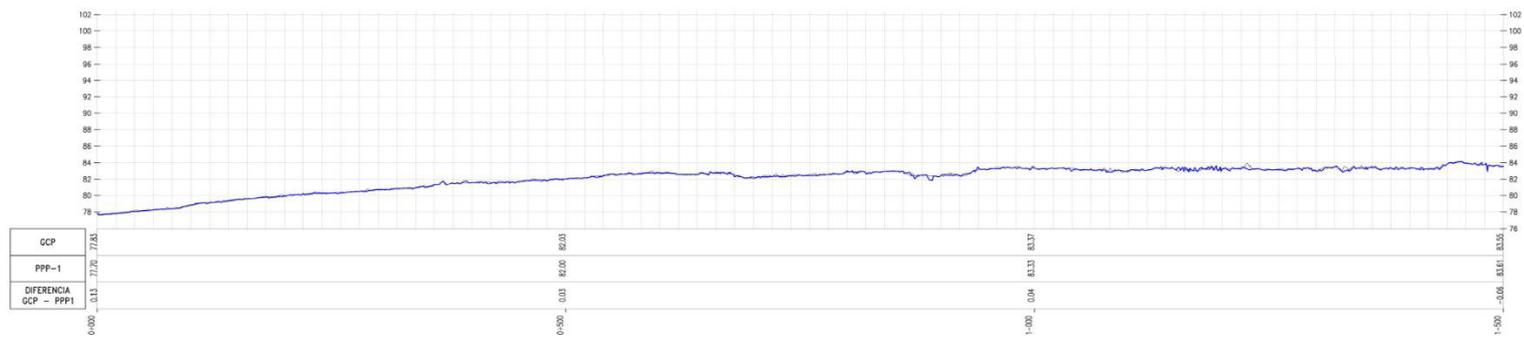
Universidad Nacional Federico Villarreal

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEOGRAFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

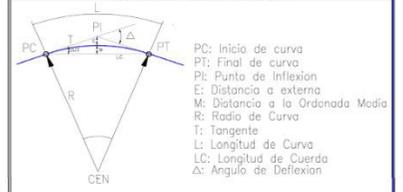


PLANTA TOPOGRAFICA
E.C. 1:2500

PERFIL LONGITUDINAL
E.C. H 1:2500
E.C. V 1:250



ELEMENTOS DE CURVA CIRCULAR



NOTAS:
1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO ESTÁ REFERIDO AL DATUM WGS-84
2.- ELEVACIONES EN METROS
3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.

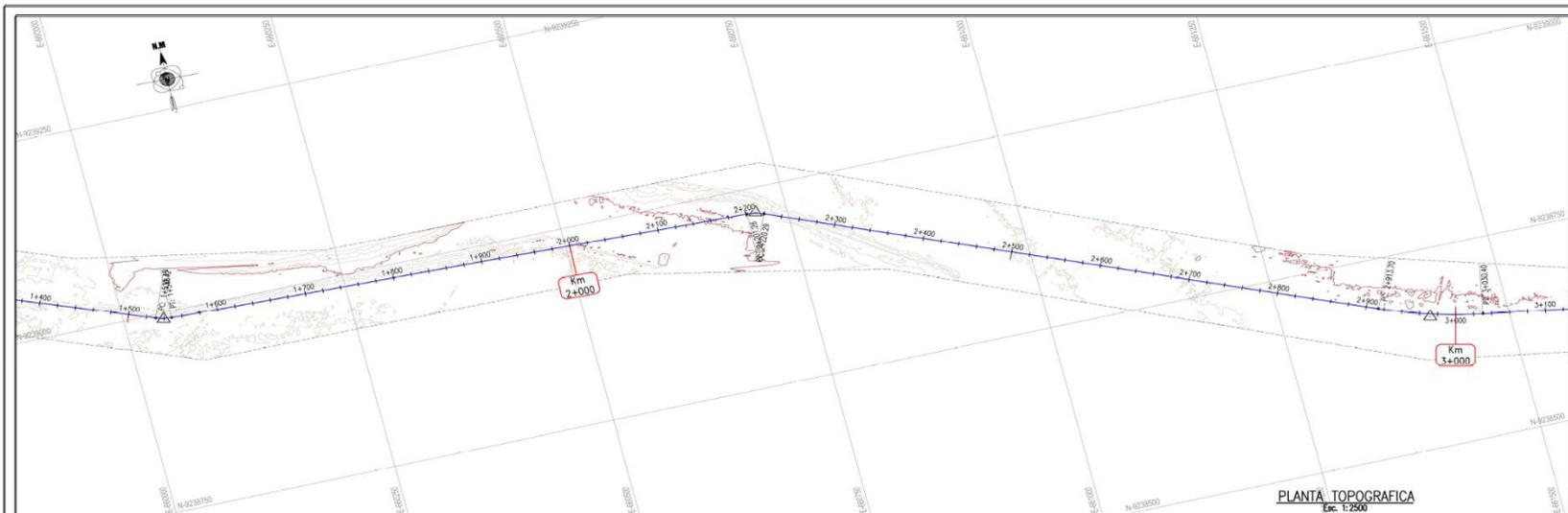
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA

PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP1-ULTRA RAPIDA		
UBICACION DEPARTAMENTO : LAMBAYEQUE REGION : CHILAYO DISTRITO : ZARA	PLANO: PLANTA Y PERFIL	LAMINA N°: GCP-PPP1-001
DISEÑO: WILMER DE LA CRUZ DIBUJO: JOSE VALCA	ESCALA: INDICADA	FECHA: OCTUBRE 2019
DATUM: WGS 84 SISTEMA DE COORDENADAS: UTM HEMISFERIO: Sur ZONA: 17		

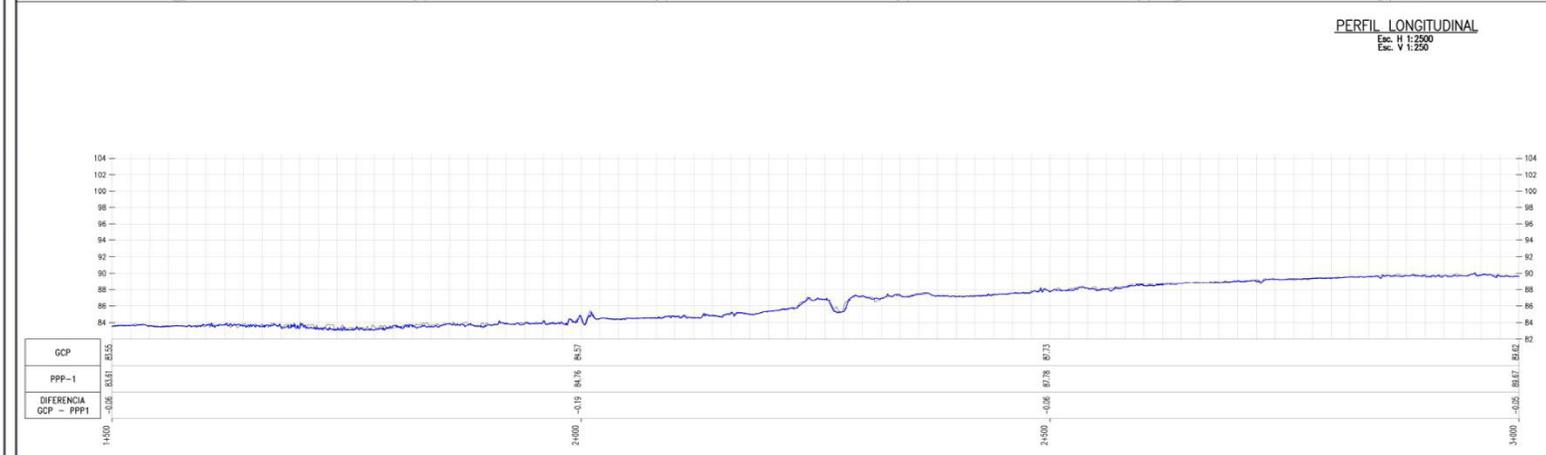
ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Universidad Nacional Federico Villarreal

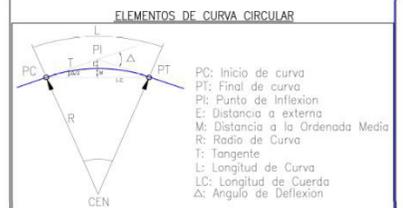
TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEOGRÁFO
BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI



PLANTA TOPOGRÁFICA
Escala: 1:2500



PERFIL LONGITUDINAL
Escala: H 1:2500
Escala: V 1:250



NOTAS:
1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO ESTÁ REFERIDO AL DATUM WGS-84
2.- ELEVACIONES EN MSNM.
3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.
ESCALA GRÁFICA: 1:1000-11, 1:2000-13

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA

PLANO: TOPOGRAFÍA LIDAR GCP VS PPP1-ULTRA RÁPIDA

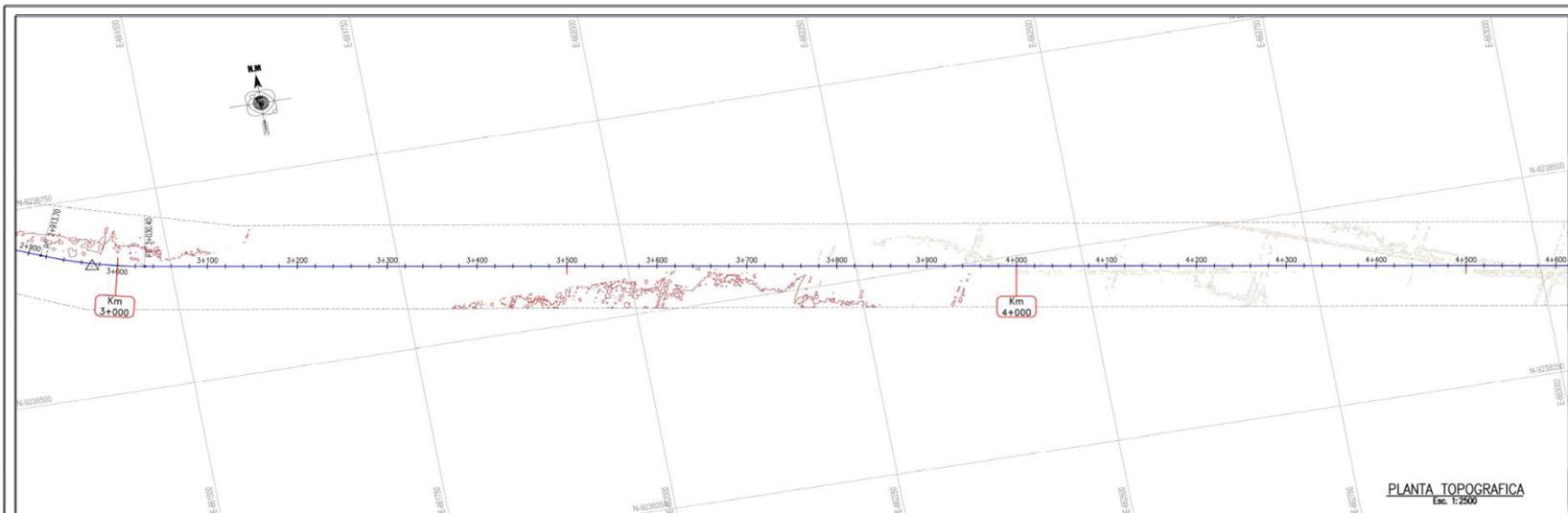
UBICACIÓN	LAMBAYEQUE	PLANO	LAMENA N°
DEPARTAMENTO	CHILCAYO	PLANTA Y PERFIL	GCP-PPP1-002
REGION	CHILCAYO		
PROVINCIA	ZANA		
DISTRITO			
TUPO: WILMER DE LA CRUZ	SOCIAL: INDIADA	FECHA: OCTUBRE 2019	
LD: JOEL VALCA			

DATUM: WGS 84 SISTEMA DE COORDENADAS: UTM HEMISPHERIO: Sur ZONA: 17

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR METODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACION DE CALCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Universidad Nacional Federico Villarreal

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO GEOGRAFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI



PLANTA TOPOGRAFICA
Esc. 1:2500

PERFIL LONGITUDINAL
Esc. H: 1:2500
Esc. V: 1:250



ELEMENTOS DE CURVA CIRCULAR



NOTAS:
 1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO ESTA REFERIDO AL DATUM WGS-84
 2.- ELEVACIONES EN MSNM.
 3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.
 ESCALA GRAFICA 1:2000-1:3

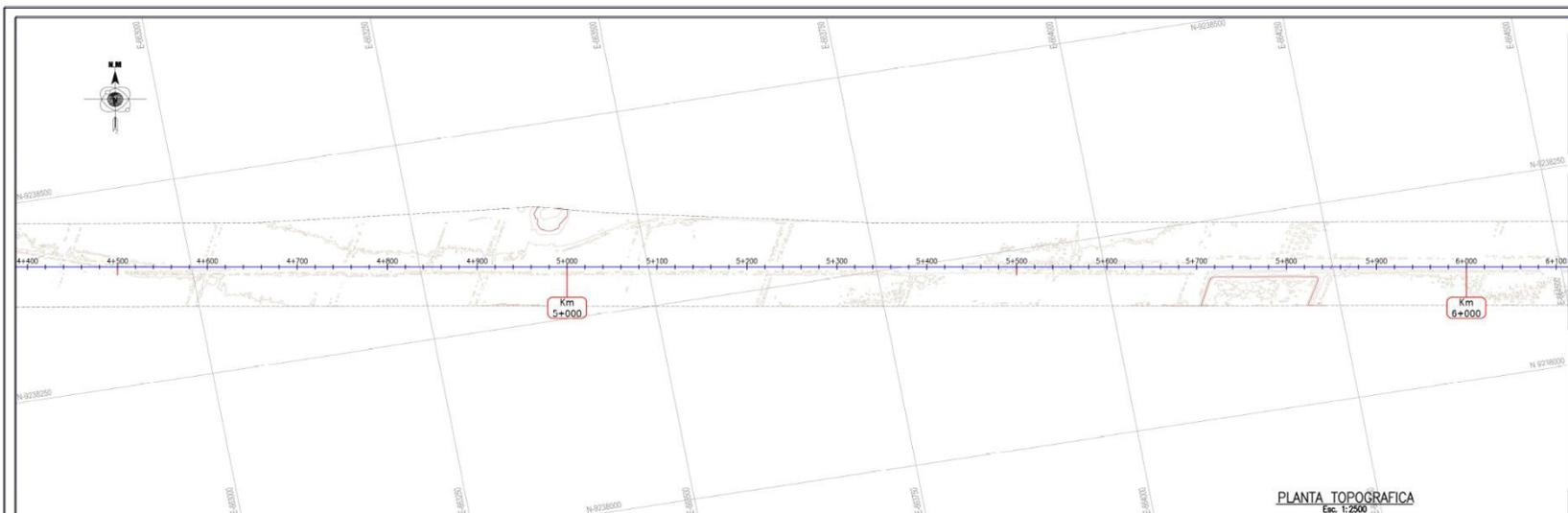
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y SOCIOURBANISMO
 ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA

PLANO TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP1-ULTRA RAPIDA		
UBICACION DEPARTAMENTO : LAMBAYEQUE REGION : CHILAYO PROVINCIA : CHILAYO DISTRITO : ZANA	PLANO PLANTA Y PERFIL	LAMINA N°: GCP-PPP1-003
TITULAR : WILMER DE LA CRUZ HUAMANI CURSO : JOSE VALDA	ENCARGADO : INDIKADA	FECHA : OCTUBRE 2019
DATUM: WGS 84 SISTEMA DE COORDENADAS: UTM HEMISFERIO: Sur ZONA: 17		

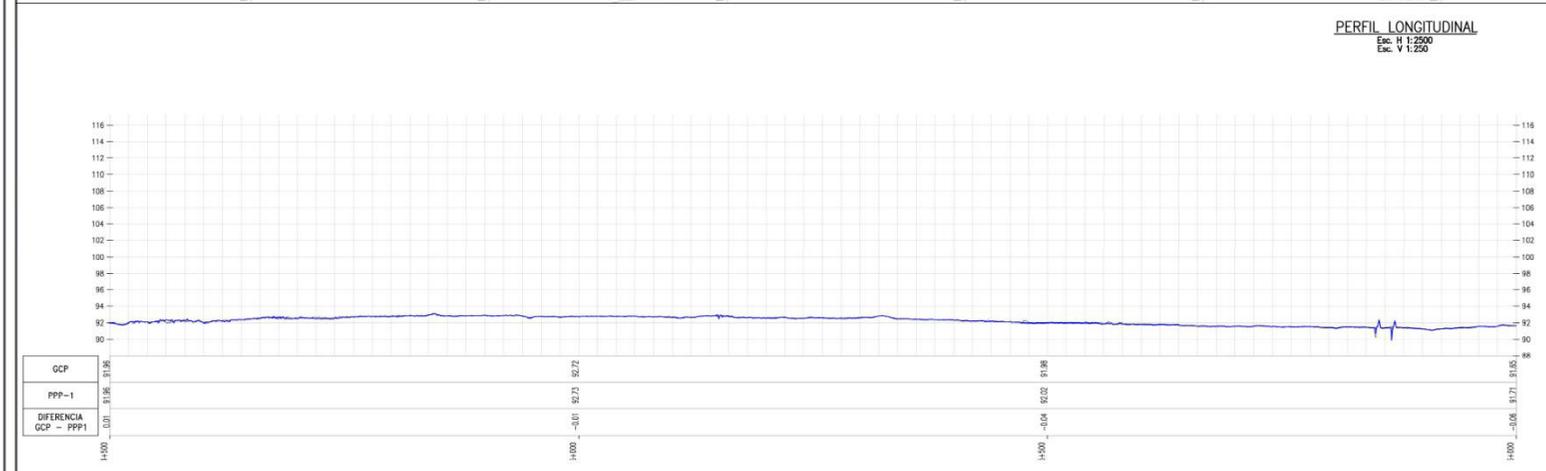
ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR METODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACION DE CALCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)



TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO GEOGRAFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

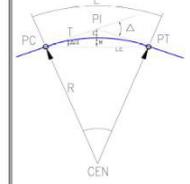


PLANTA TOPOGRAFICA
Esc: 1:2500



PERFIL LONGITUDINAL
Esc: H: 1:2500
Esc: V: 1:250

ELEMENTOS DE CURVA CIRCULAR



- PC: Inicio de curva
- PT: Final de curva
- PI: Punto de Inflexion
- E: Distancia a externa
- M: Distancia a la Ordenada Media
- R: Radio de Curva
- T: Tangente
- L: Longitud de Curva
- LC: Longitud de Cuerda
- Δ: Angulo de Deflexion

NOTAS:
1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO ESTA REFERIDO AL DATUM WGS-84
2.- ELEVACIONES EN MSNM.
3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.
ESCALA GRAFICA 1:1000-1:10000-1:2000-1:3

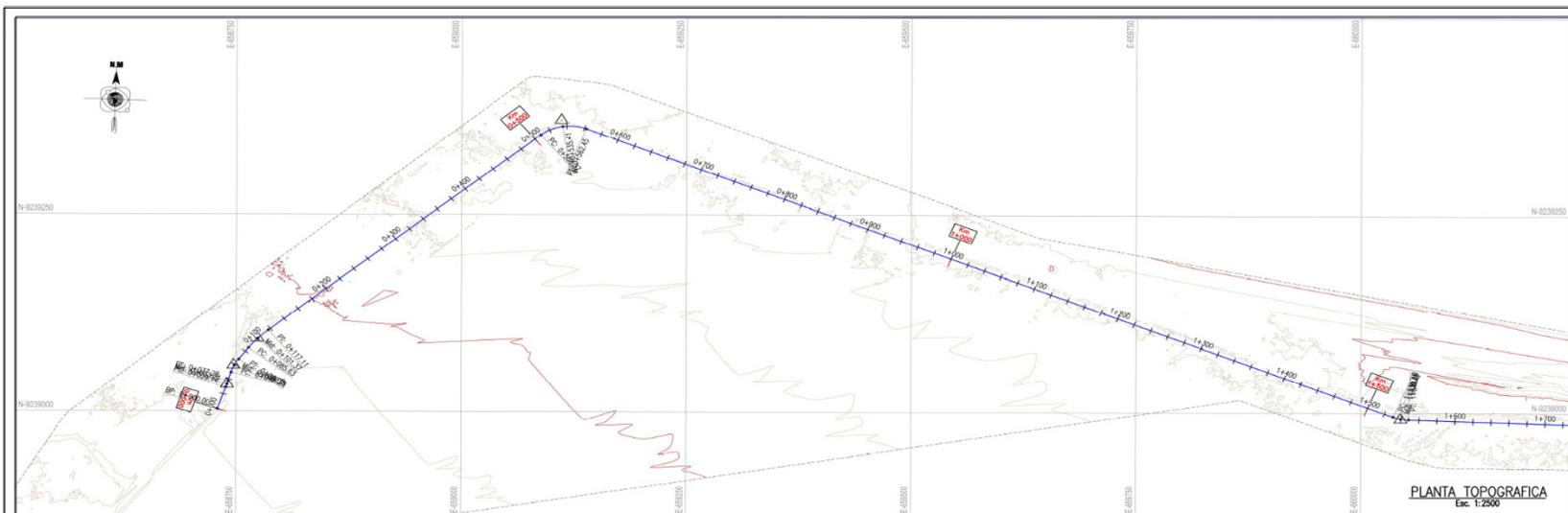
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL
INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL Y AMBIENTAL

PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP1-ULTRA RAPIDA		
UBICACION REGION : LAMBAYEQUE PROVINCIA : CHICLAYO DISTRITO : ZANA	PLANO: PLANTA Y PERFIL	LAMINA N°: GCP-PPP1-004
DISEÑO: WILMER DE LA CRUZ DIBUJO: JOSE VALCA	ESCALA: INDEFINIDA	FECHA: OCTUBRE 2019
DATUM: WGS 84 SISTEMA DE COORDENADAS: UTM HEMISFERIO: Sur ZONA: 17		

ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR METODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACION DE CALCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

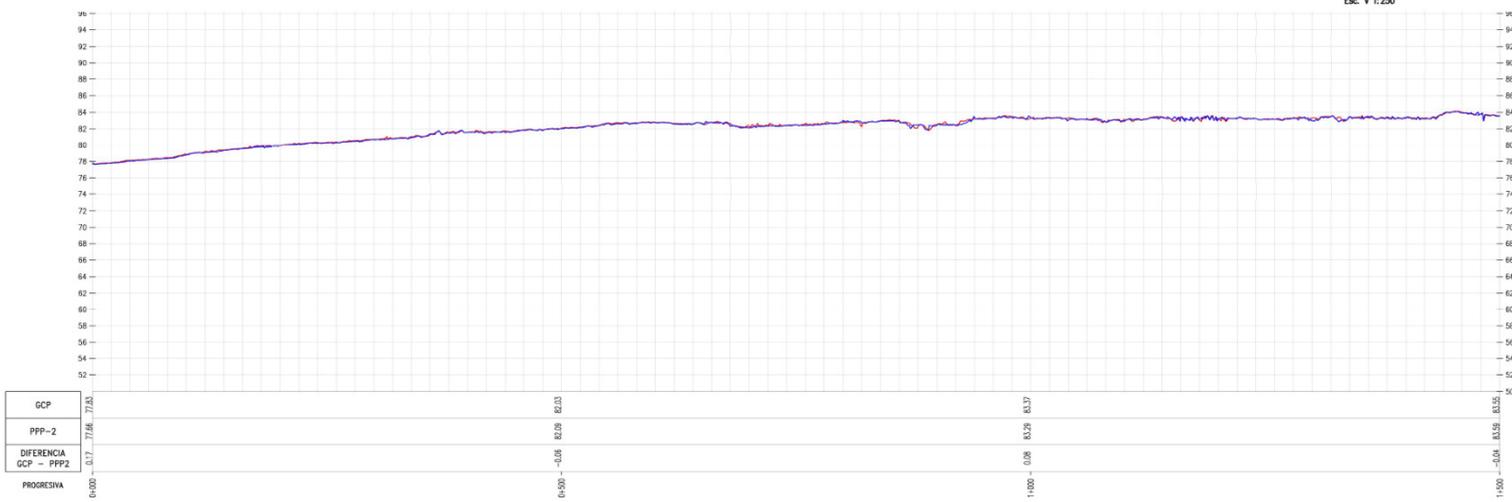
Universidad Nacional Federico Villarreal

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO GEOGRAFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

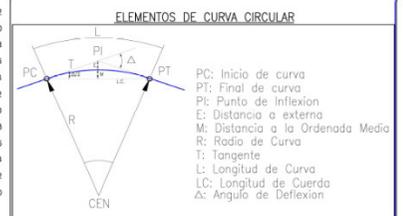


PLANTA TOPOGRAFICA Esc. 1:2500

PERFIL LONGITUDINAL Esc. H: 1:2500 Esc. V: 1:250



GCP	0+000	0+17	77.66	77.85
PPP-2				
DIFERENCIA GCP - PPP2				
PROGRESIVA	0+000	0+500	0+1000	1+700
		-0.05	0.08	0.17
			0.29	0.17
			-0.04	0.15
				0.15



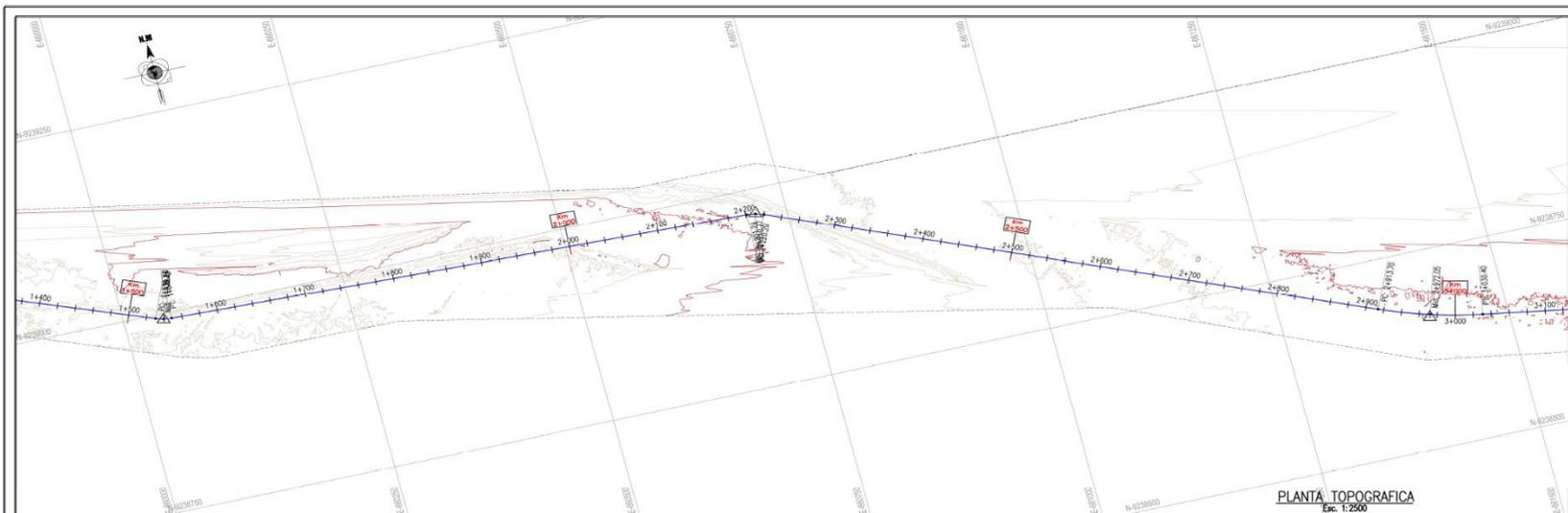
NOTAS:
 1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO ESTA REFERIDO AL DATUM WGS-84
 2.- ELEVACIONES EN M.N.M.
 3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.
 ESCALA GRAFICA 1:2000-43

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA			
PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP2-FINAL			
UBICACION	DEPARTAMENTO : LAMBAYEQUE	PLANO:	LAMINA N°:
REGION	: CHICLAYO	PLANTA Y PERFIL	
DISTRICTO	: ZARA	GCP-PPP2-001	
DISEÑO: WILMER DE LA CRUZ HUAMANI	ESCALA: INDICADA	FECHA: OCTUBRE 2019	
DIBUJO: JOSE YUCA	SISTEMA DE COORDENADAS: UTM	HEMISFERIO: Sur	ZONA: 17

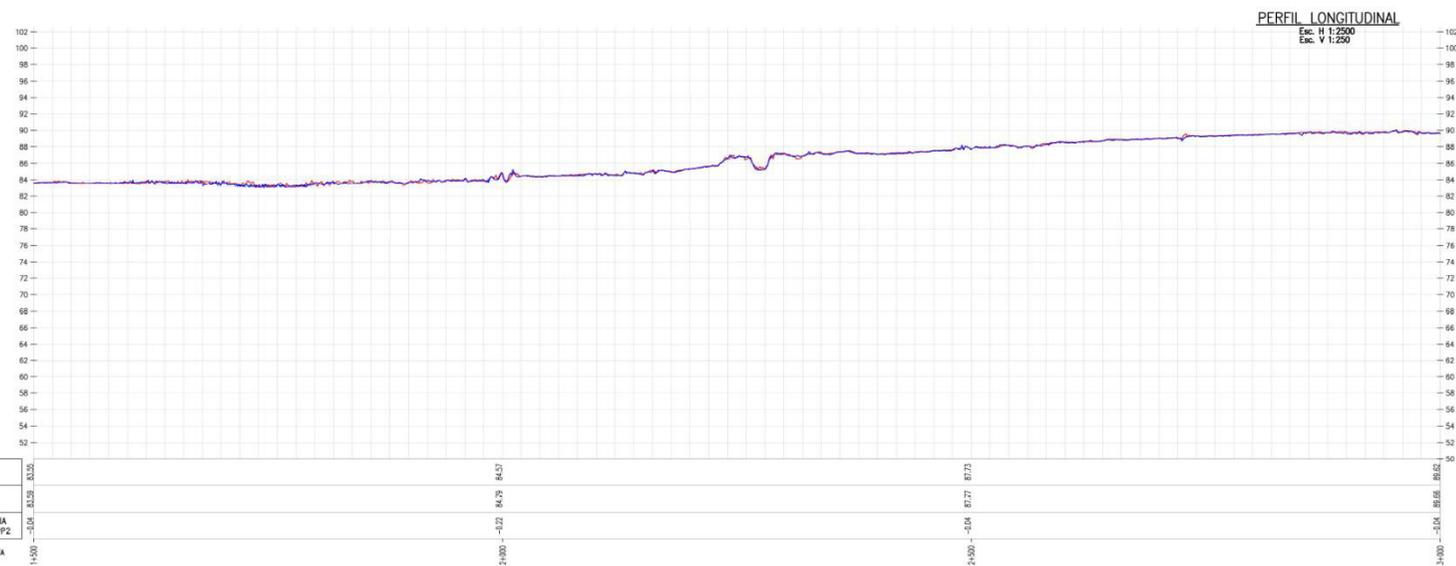
ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Universidad Nacional Federico Villarreal

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEOGRÁFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

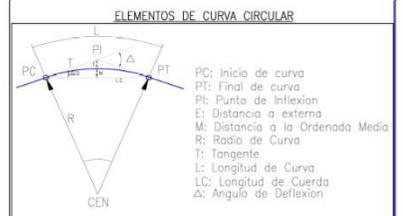


PLANTA TOPOGRAFICA Esc: 1:2500



PERFIL LONGITUDINAL Esc: H 1:2500 Esc: V 1:250

GCP	1+300	83.38	83.38	2+300	86.57
PPP-2	1+300	83.39	83.39	2+300	86.73
DIFERENCIA GCP - PPP2		-0.01	-0.01		-0.16
PROGRESIVA	1+300			2+300	



NOTAS:
 1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRAFICO ESTA REFERIDO AL DATUM WGS-84.
 2.- ELEVACIONES EN MSNM.
 3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.

ESCALA GRAFICA

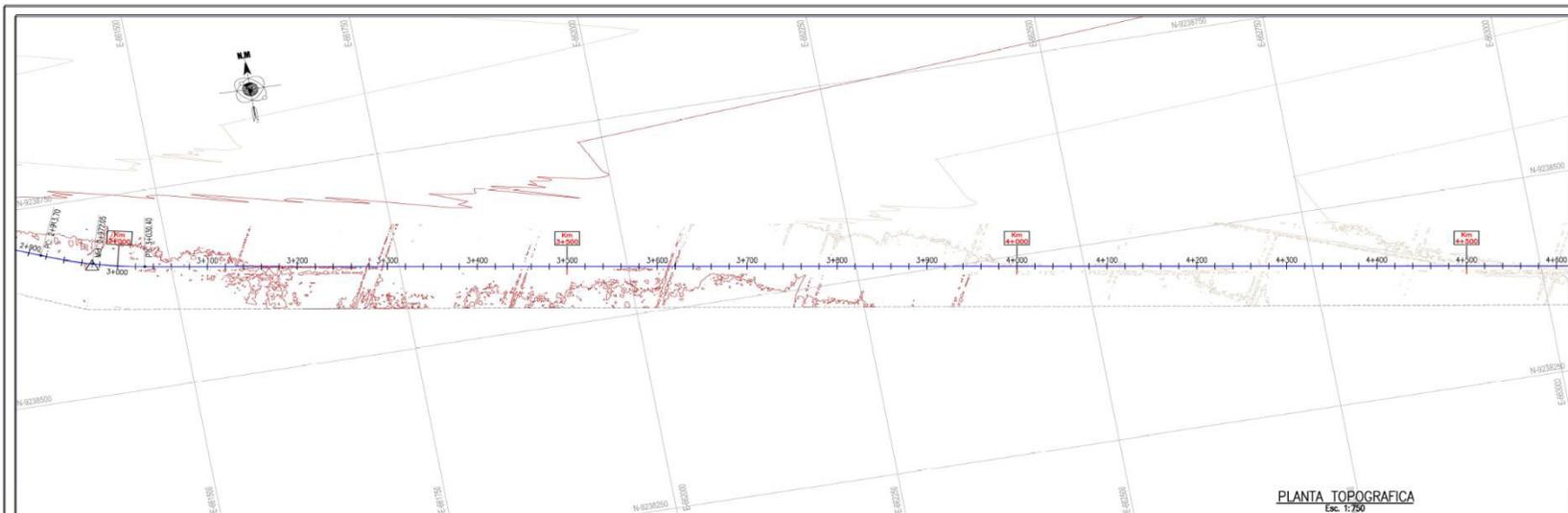
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
 ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA

PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP2-FINAL		
UBICACION	DEPARTAMENTO	PLANO
REGION	PROVINCIA	LAMINA N°
DISTRITO		PLANTA Y PERFIL
		GCP-PPP2-002
DISEÑO: WILMER DE LA CRUZ HUAMANI	ESCALA: INDICADA	FECHA: OCTUBRE 2019
DATUM: WGS 84	SISTEMA DE COORDENADAS: UTM	HEMISFERIO: Sur ZONA: 17

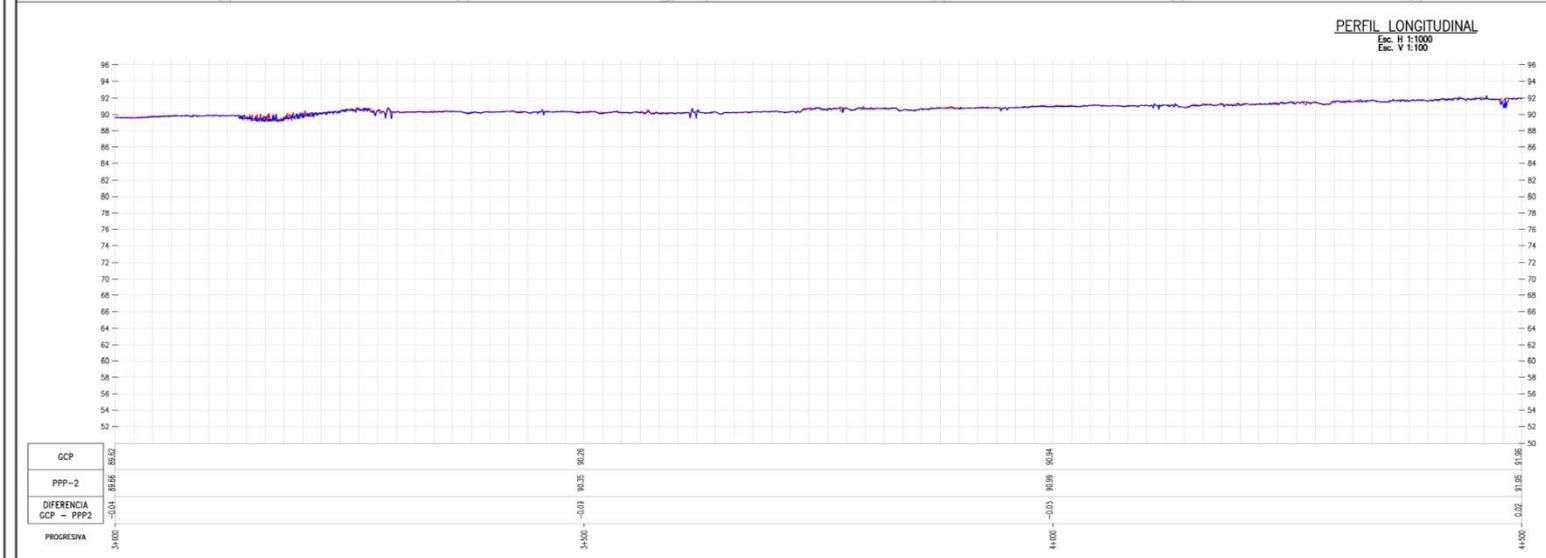
ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR METODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Universidad Nacional **Federico Villarreal**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEOGRÁFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI

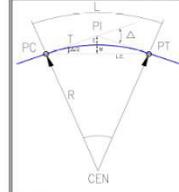


PLANTA TOPOGRAFICA
Esc. 1:750



PERFIL LONGITUDINAL
Esc. H: 1:100
Esc. V: 1:100

ELEMENTOS DE CURVA CIRCULAR



- PC: Inicio de curva
- PT: Final de curva
- PI: Punto de Inflexion
- E: Distancia a externa
- M: Distancia a la Ordenada Media
- R: Radio de Curva
- T: Tangente
- L: Longitud de Curva
- LC: Longitud de Cuerda
- Δ: Angulo de Deflexion

NOTAS:
1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO ESTÁ REFERIDO AL DATUM WGS-84.
2.- ELEVACIONES EN MSNM.
3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.
ESCALA GRAFICA 1:2000-43

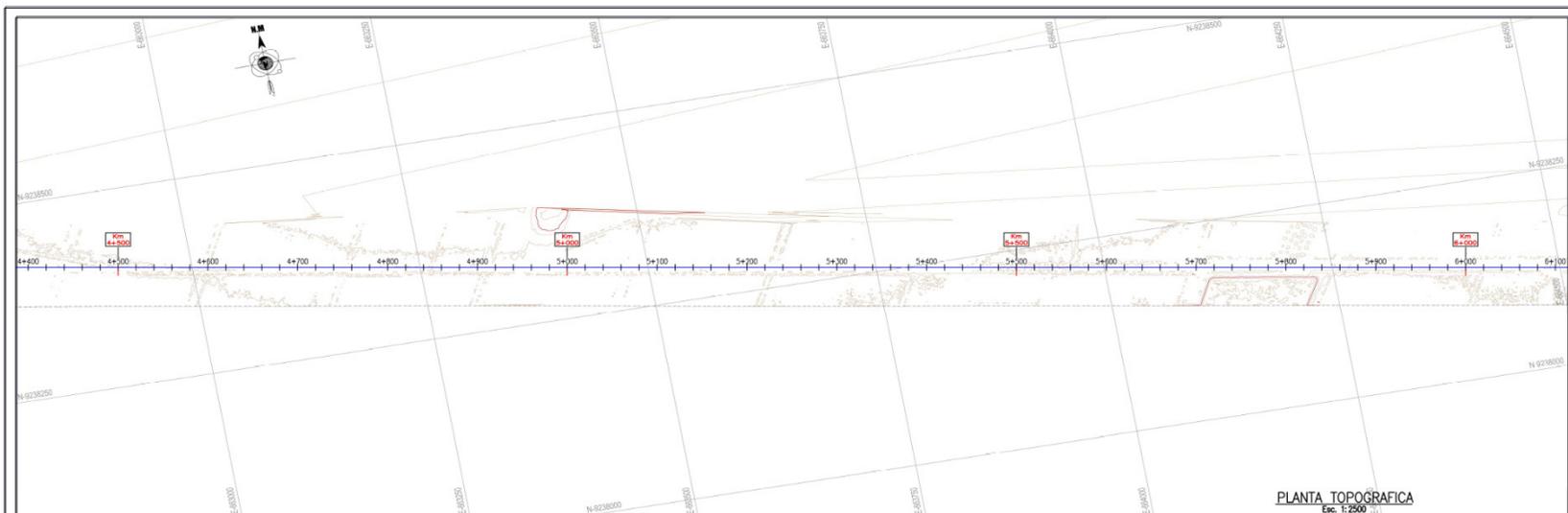
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA

PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP2-FINAL		
UBICACION DEPARTAMENTO : LAMBAYEQUE REGION : CHICLAYO PROVINCIA : CHICLAYO DISTRITO : ZARA	PLANO PLANTA Y PERFIL	LAMINA N°: GCP-PPP2-003
TUBERNO : WILMER DE LA CRUZ CURSO : JUELVA	ESCALA : INDICADA	FECHA : OCTUBRE 2019
DATUM: WGS 84 SISTEMA DE COORDENADAS: UTM HEMISFERIO: Sur ZONA: 17		

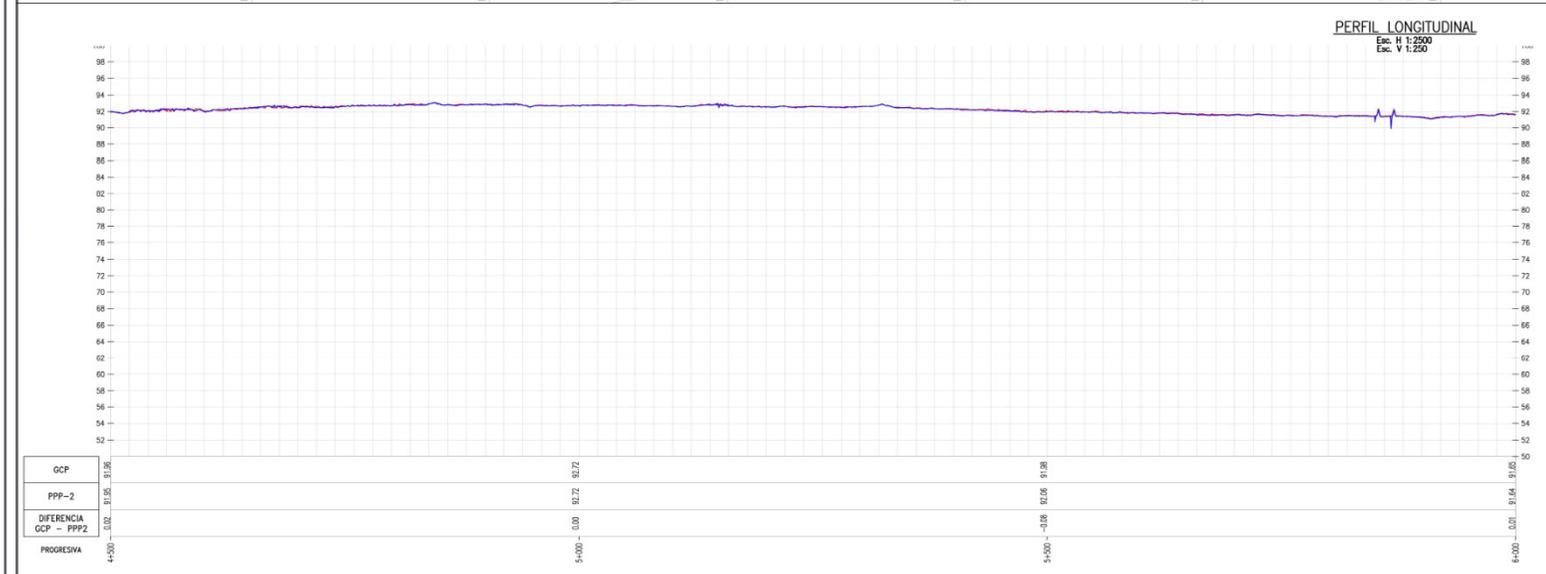
ANÁLISIS E IMPLEMENTACIÓN DE LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO POR MÉTODO LIDAR PARA PROYECTOS VIALES, MODELAMIENTO DE SUPERFICIE Y VALIDACIÓN DE CÁLCULOS CON PRECISE POINT POSITIONING (PPP)

Universidad Nacional Federico Villarreal

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO GEOGRÁFO BACH. WILMER JORGE DE LA CRUZ HUAMANI



PLANTA TOPOGRAFICA
Esc: 1:2500



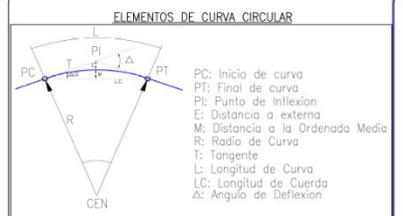
PERFIL LONGITUDINAL
Esc: H 1:2500
Esc: V 1:250

GCP	4+300	480000	91,96
PPP-2	4+300	480000	91,96
DIFERENCIA GCP - PPP2	0,00	0,00	0,00
PROGRESIVA	4+300	480000	91,96

GCP	5+000	487000	92,72
PPP-2	5+000	487000	92,72
DIFERENCIA GCP - PPP2	0,00	0,00	0,00
PROGRESIVA	5+000	487000	92,72

GCP	5+500	490000	91,98
PPP-2	5+500	490000	91,98
DIFERENCIA GCP - PPP2	0,00	0,00	0,00
PROGRESIVA	5+500	490000	91,98

GCP	6+000	497000	91,95
PPP-2	6+000	497000	91,95
DIFERENCIA GCP - PPP2	0,00	0,00	0,00
PROGRESIVA	6+000	497000	91,95



NOTAS:
1.- EL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO ESTÁ REFERIDO AL DATUM WGS-84
2.- ELEVAIONES EN MSNM.
3.- LA EQUIDISTANCIA ENTRE CURVAS DE NIVEL ES DE UN METRO.

UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOLOGIA
ESCUELA DE INGENIERIA GEOGRAFICA

PLANO: TOPOGRAFIA LIDAR GCP VS PPP2-FINAL			
LUBICACION	DEPARTAMENTO : LAMBAYEQUE	PLANO:	LAMINA N°:
REGION	: CHILAYO	PLANTA Y PERFIL	
PROVINCIA	: CHILAYO		GCP-PPP2-004
DISTRITO	: ZARA		
DISEÑO: WILMER DE LA CRUZ	ENCALA: INDICADA	FECHA: OCTUBRE 2019	
CONJUNTO: JORJA VILCA			
DATUM: WGS 84	SISTEMA DE COORDENADAS: UTM	HEMISFERIO: Sur	ZONA: 17