



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE
TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA**

Ing. Jorge Alejandro Juárez Ortega
Asesorado por el Mtro. Ing. Francisco Guillermo Vela Morales

Guatemala, noviembre de 2019



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Ingeniería Vial

**COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE
TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA**

Ing. Jorge Alejandro Juárez Ortega

Asesorado por el Mtro. Ing. Francisco Guillermo Vela Morales

Guatemala, noviembre de 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE
TECNOLOGÍA LiDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE
INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

ING. JORGE ALEJANDRO JUÁREZ ORTEGA
ASESORADO POR EL MTRO. ING. FRANCISCO VELA MORALES

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA VIAL

GUATEMALA, NOVIEMBRE DE 2019

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
VOCAL I	Ing. José Francisco Gómez Rivera
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Br. Luis Diego Aguilar Ralón
VOCAL V	Br. Christian Daniel Estrada Santizo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

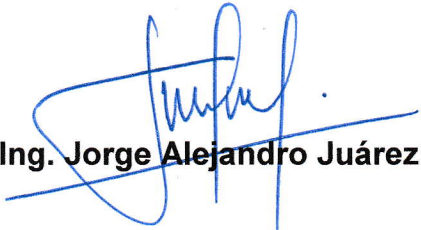
DECANA	Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
EXAMINADOR	Mtro. Ing. César Augusto Castillo Morales
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Postgrado, con fecha 5 de abril de 2019.

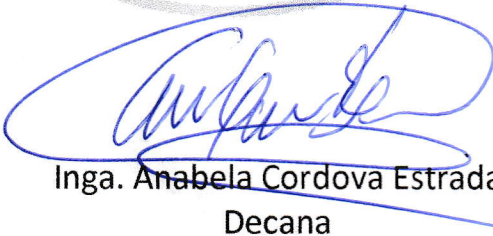


Ing. Jorge Alejandro Juárez Ortega

DTG. 583.2019

La Decana de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Postgrado, al Trabajo de Graduación titulado: **COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA**, presentado por el **Ingeniero Jorge Alejandro Juárez Ortega**, estudiante de la **Maestría en Ingeniería Vial** y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Inga. Anabela Cordova Estrada
Decana



Guatemala, noviembre de 2019
AACE/asga

EEPFI-1144-2019

En mi calidad de Director de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen y verificar la aprobación del Revisor y la aprobación del Área de Lingüística al Trabajo de Graduación titulado: **“COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Civil Jorge Alejandro Juárez Ortega quien se identifica con Carné **100011345**, correspondiente al programa de Maestría en Artes en Ingeniería Vial; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”


Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
Director

Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2019

EEPFI-1145-2019

Como Coordinador de la Maestría en Artes en Ingeniería Vial doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA”** presentado por el Ingeniero Civil **Jorge Alejandro Juárez Ortega** quien se identifica con Carné **100011345**.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

Armando Fuentes Roca

Mtro. Ing. Armando Fuentes Roca
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala



Guatemala, noviembre de 2019

Guatemala, noviembre de 2019

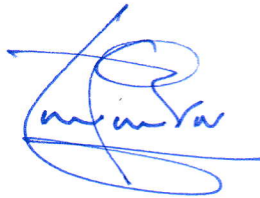
Maestro
Edgar Darío Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
USAC – Facultad de Ingeniería
Presente.-

Estimado Mtro. Álvarez:

En mi calidad como Asesor del Ingeniero Civil **Jorge Alejandro Juárez Ortega** quien se identifica con Carné **100011345** procedo a dar el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: **“COMPARACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO GENERADOS A TRAVÉS DE TECNOLOGÍA LIDAR Y TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL EN PROYECTOS DE INFRAESTRUCTURA VIAL EN GUATEMALA”** quien se encuentra en el programa de Maestría en Artes en Ingeniería Vial en la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Atentamente,

“Id y Enseñad a Todos”

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Francisco Vela Ortega', written over a circular stamp or seal.

Mtro. Ing. Francisco Guillermo Vela Ortega
Asesor

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Porque a través de su hijo, mi Señor me ha dado la oportunidad de alcanzar mis metas.
Mis padres	Jorge Juárez (q.e.p.d.) y Aracely de Juárez, por sus oraciones, su paciencia y su apoyo.
Mis hermanas	Lesbia y Claudia Juárez Ortega, por darme su apoyo y cariño en todas las épocas de mi vida.
Mis sobrinos	Pablo Flores Juárez y Sebastián Alvarado Juárez, por ser mi inspiración.
Mis primos	Marissabel, Marco y Lui Nájera Ortega, por estar en los momentos felices y tristes de mi vida.
Mi abuelita	Josefina Paniagua (q.e.p.d.) porque siempre vivirá en mi corazón.
Mi tía	Clara Luz Ortega (q.e.p.d.) cada peldaño alcanzado se lo debo a tus consejos.
Mi asesor	Ing. Francisco Guillermo Vela Morales, por brindarme el apoyo profesional.
Mis padrinos	Lopsany Godínez y Luis Gerardo Reyes.

Mis amigas

Ada Alvizurez, Dixi Ruiz, Astrid Meza, Ruth Marleny Flores y Patricia Rivera.

Mis amigos

Alejandro Hernández, Jorge Mario Godínez, Manuel Socop, David Elias, Jacobo Ortiz, Ing. Leonel Aguilar, Ricardo Hernández, Hassen Gaitán y Sergio Prah.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser mi alma *mater*.

Escuela de Postgrado Por su valiosa aportación académica.

Ingeniero Armando Fuentes Roca Por su apoyo profesional.

Constructora Norberto Odebrecht, S.A. Por aportar a mi experiencia profesional.

Horizons South America, S.A.C. Por su aporte en el presente estudio.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	XIII
GLOSARIO	XV
RESUMEN.....	XXI
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	XXV
OBJETIVOS.....	XXIX
HIPÓTESIS.....	XXXI
RESUMEN DEL MARCO METOLÓGICO	XXXIII
INTRODUCCIÓN	XXXV
ANTECEDENTES.....	XXXIX
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Levantamientos topográficos.....	1
1.2. Levantamiento con topografía convencional	2
1.2.1. Tolerancias	3
1.2.2. Postproceso de datos	4
1.2.3. Red georeferenciada	8
1.2.4. Precisión de los puntos de control de redes georeferenciadas	8
1.3. Levantamiento con la tecnología LiDAR.....	10
1.4. Precisiones de tecnología LiDAR	14
2. MEDICIÓN DEL DATUM.....	17
2.1. Datum Vertical	17
2.1.1. Geoide	17

2.1.2.	Elipsoide.....	20
2.1.3.	Altura ortométrica (H)	22
2.2.	Datum horizontal	23
2.2.1.	Datum horizontal WGS84.....	23
2.2.2.	Datum ITRS (The International Terrestrial Reference System).....	24
2.2.3.	Sistema de Referencia Geocéntrico (SIRGAS)	25
2.2.4.	Sistema de coordenadas de referencia, UTM	26
2.2.5.	Sistema de coordenadas de referencia, GTM	30
2.2.6.	Proyección local transversal mercator (LTM)	31
2.2.6.1.	Definición de planos topográficos locales (PTL)	31
2.2.6.2.	Relación de distancias en terreno y PTL.....	33
3.	SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL	35
3.1.	Métodos de posicionamientos.....	37
3.1.1.	Método estático relativo estándar.....	37
3.1.2.	Método estático relativo rápido.....	38
3.1.3.	Método GPS en tiempo real (RTK).....	38
3.1.4.	Método diferencial en tiempo real (RTDGPS)	39
3.2.	Estaciones de operación continua (CORS).....	39
4.	FOTOGRAMETRÍA.....	41
4.1.	Fotogrametría digital	41
4.2.	Productos fotogramétricos	42
4.2.1.	Mapa de líneas.....	42
4.2.2.	Puntos de control	42
4.2.3.	Fotomosaico.....	42

4.2.4.	Ortofotos	43
4.3.	Tolerancias	47
5.	DIFERENCIAS ENTRE MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT), MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE) Y MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (MDS)	49
5.1.	Modelo digital de superficie	49
5.2.	Modelo digital de elevación (MDE)	51
5.3.	Modelo digital de terreno (MDT)	53
5.3.1.	Red irregular de triángulos (TIN)	57
5.3.2.	Curvas de nivel	58
5.3.3.	Pendientes.....	59
6.	DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN.....	61
6.1.	Generalidades	61
6.2.	Tramo analizado.....	62
6.3.	Metodología de trabajo	64
6.4.	Actividades previstas a los trabajos de campo	65
6.4.1.	Elaboración del plan de trabajo	65
6.4.2.	Coordinación de recursos	66
6.4.3.	Asignación y revisión de recursos	66
6.5.	Ejecución de trabajos de campo.....	67
6.6.	Inicio de operaciones.....	68
6.7.	Control horizontal	69
6.7.1.	Datum horizontal.....	70
6.7.2.	Control horizontal de los puntos solicitados.....	74
6.8.	Control vertical.....	78
6.8.1.	Datum vertical.....	78
6.8.2.	Nivelación geométrica	78

6.9.	Puntos de apoyo fotogramétrico de control de calidad	82
6.10.	Modelo geoidal local.....	83
6.11.	Procesamiento y resultado de las mediciones	85
6.12.	Levantamiento con tecnología LiDAR	91
6.12.1.	Equipo utilizado	92
6.12.2.	Precisiones.....	92
6.12.3.	Líneas de vuelo	93
6.12.4.	Calibración	93
6.12.5.	Vuelo LiDAR.....	94
6.12.6.	Base estación de GPS	97
6.12.7.	Procesamiento de los datos obtenidos por LiDAR ..	97
6.13.	Procesamiento de datos.....	99
6.13.1.	Postproceso de datos obtenidos con GPS	100
6.13.2.	Postproceso de datos GPS, LiDAR e IMU	100
6.13.3.	Modelo digital de terreno y generación de las curvas de nivel	100
6.13.4.	Ortofotos.....	103
6.13.5.	Levantamiento de secciones transversales con topografía convencional	104
7.	PRESENTACIÓN DE RESULTADOS.....	107
7.1.	Grilla de comparación	108
7.2.	Evaluación cuantitativa.....	110
7.2.1.	Metodología punto a punto.....	111
7.2.2.	Metodología superficie a superficie	116
7.2.3.	Metodología segmento a segmento	122
8.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	129

8.1.	Análisis mediante estándares para precisión de datos geoespaciales de la ASPRS y normativa colombiana NTC 5205.....	130
8.2.	Análisis mediante el manual de carreteras de Chile.....	133
CONCLUSIONES		137
RECOMENDACIONES		139
BIBLIOGRAFÍA.....		141

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Equipo para realizar levantamientos topográficos.....	2
2.	Generación de curvas por el método TIN.....	7
3.	Componentes de un sistema LiDAR aerotransportado	12
4.	Nube de puntos LiDAR.....	13
5.	Efecto de las mareas.....	18
6.	Modelo del campo gravitatorio terrestre (geoide)	18
7.	Modelo geoidal EGM08 (grilla de alturas a cada 2.5 min).....	19
8.	Elipsoide.....	20
9.	Geoide, elipsoide y superficie topográfica (corteza terrestre)	21
10.	Altura ortométrica	22
11.	Definición del sistema de coordenadas WGS84	24
12.	Red SIRGAS	27
13.	Factor de escala.....	29
14.	Zonas UTM	29
15.	Datum WGS84, proyección GTM.....	30
16.	Constelación de satélites GPS.....	36
17.	Red CORS de Guatemala.....	39
18.	Ortofoto del proyecto Ca-2 Occidente, km 145	43
19.	Modelo digital de superficie.....	50
20.	Modelo digital de superficie, estructuras existentes	51
21.	MDE para usos hidrológicos	52
22.	MDE en una ciudad Maya, Petén, Guatemala	53
23.	Datos obtenidos mediante metodología LiDAR.....	55

24.	MDE incluyendo vegetación	56
25.	MDT al filtrar la vegetación	57
26.	Modelo TIN.	58
27.	Curvas de nivel	59
28.	Modelo de pendientes.....	60
29.	Tramo de la carretera CA-2, analizado con LiDAR	62
30.	Ortofoto de 400 m de búfer.....	63
31.	Flujo de trabajo implementado.....	64
32.	Ubicación de puntos de red y LTB, en el proyecto Ca-2.....	70
33.	Posicionamiento GPS en el punto red OC01	71
34.	Formulario de estaciones permanentes del IGN.....	72
35.	Formulario de estaciones permanentes del IGN.....	73
36.	Esquema de la antena de la estación CORS.....	71
37.	Diagrama de trabajo y control horizontal de los puntos solicitados	75
38.	Postproceso de los puntos de red.....	76
39.	Postproceso de puntos, líneas de bases topográficas (LBT).....	77
40.	Bench mark (BM) C90A	79
41.	Diagrama de procedimientos de nivelación geométrica.....	80
42.	Secuencia del proceso de datos GPS	86
43.	Especificaciones técnicas de los GPS GR-5	87
44.	Plan de vuelo	93
45.	Vuelo de calibración (imágenes de intensidad).....	94
46.	Calibración del <i>heading</i>	95
47.	Calibración del <i>pitch</i>	95
48.	<i>Software</i> utilizado TracGUI	96
49.	Vuelo LiDAR	96
50.	Ubicación de los puntos de la red geodésica básica	97
51.	Información LiDAR editada y filtrada.....	99
52.	Superficie del MDT	101

53.	Modelo digital de elevación (MDE).....	101
54.	Curvas de nivel generadas a partir del MDT	102
55.	Información agregada por rectificación utilizando ortofoto	102
56.	Ortofoto obtenida para el proyecto CA-2.....	103
57.	Secciones transversales con topografía convencional.....	105
58.	Red de puntos de la poligonal del proyecto	107
59.	Comparación entre 2 superficies por medio de una grilla	109
60.	Conción de la grilla a cada 5 m	109
61.	LiDAR, para el segmento a: zona montañosa y con vegetación	117
62.	Topografía convencional para la zona a	117
63.	Clasificación de diferencias entre métodos por color	118
64.	Superficie del km 137+900 al km 138+800	118
65.	Superficie del km 139+100 al km 139+320	119
66.	Superficie del km 139+500 a km 140+300	120
67.	Superficie del km 140+500 a km 141+120	121
68.	Perfil longitudinal entre el km 137+900 a km 138+720	122
69.	Perfil longitudinal del km 139+120 al km 139+340.....	124
70.	Perfil longitudinal del km 139+520 al km 140+280.....	126
71.	Perfil longitudinal del km 140+520 al km 141+060.....	126
72.	Precisiones por cada subtramo analizado.....	129

TABLAS

I.	Tolerancia para obtener secciones transversales	4
II.	Estándares para precisión de redes geodésicas.....	10
III.	Tolerancias para LiDAR aerotransportado en proyectos viales	15
IV.	Precisión vertical/calidad de levantamientos LiDAR.....	15
V.	Comparación entre esferoides	21
VI.	Parámetros del sistema LTM con altura PTL	32

VII.	Tolerancia en restituciones aerofotogramétricas	47
VIII.	Coordenadas de las estaciones de la red geodésica de Guatemala	74
IX.	Nivelación geométrica.....	81
X.	Diferencias entre cotas del IGN y la nivelación geométrica	82
XI.	Parámetros de ondulación calculados	84
XII.	Parámetros para proyectar a GTM local 15.5	88
XIII.	Coordenadas de la línea base LBT.....	88
XIV.	Red de puntos de la poligonal del proyecto CA-2.....	105
XV.	Ejemplo de las coordenadas obtenidas de la grilla de puntos	110
XVI.	Ejemplo de los datos obtenidos del segmento a.....	111
XVII.	Ejemplo de la comparación de cotas del segmento a.....	113
XVIII.	Datos comparativos para el segmento a.....	114
XIX.	Datos comparativos para el segmento b.....	114
XX.	Datos comparativos para el segmento c.....	115
XXI.	Datos comparativos para el segmento d.....	115
XXII.	Resumen de los datos obtenidos.....	116
XXIII.	Subtramo a: del km 137+920 al km 138+720	123
XXIV.	Subtramo b: del km 139+120 al km 138+340	125
XXV.	Subtramo c del km 139+520 al km 140+300	127
XXVI.	Subtramo d: del km 140+500 al km 141+100	128
XXVII.	Precisiones para datos geoespaciales.....	130
XXVIII.	Análisis de los resultados obtenidos	131
XXIX.	Densidad nominal recomendada por clase.....	132
XXX.	Intervalos de curvas de nivel según clase por subtramo	133
XXXI.	Tolerancias según las normas chilenas	133
XXXII.	Número de muestras por tramo	134
XXXIII.	Análisis de errores para curvas de nivel con intervalo de 1 m	134
XXXIV.	Análisis de errores para curvas de nivel con intervalo de 2 m	135
XXXV.	Puntos de control recomendados por área del proyecto.....	139

XXXVI.Recomendación de metodología a usar según la fase del proyecto .. 140

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
km	Kilómetros
m/s	Metros por segundo
m	Metro
°	Grados sexagesimales
+/-	Más o menos
'	Minutos
"	Segundos
ppm	Partes por millón
min	Minutos
mm	Milímetros
cm	Centímetros
90`s	Década de 1990 a 1999
c/5.0 m	Cada cinco metros
kph	Kilómetros por hora
s	Segundos
Hz	Hertz
2D	2 dimensiones
ρ	Confianza
ID	Más/menos

GLOSARIO

AASHTO	Asociación Americana de Oficiales de Carreteras y Transportes (American Association of State Highway and Transportation Officials).
ASCE	Sociedad Estadounidense de Ingenieros Civiles; fundado en 1852 que representa a los ingenieros civiles en el mundo; por sus siglas en inglés, American Society of Civil Engineers.
ASPRS	Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Teledetección; sociedad dedicada a la fotogrametría y estudios geoespaciales por sus siglas en inglés American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
<i>Bench mark</i>	Banco de marca o BM, son marcas conocidas de puntos estratégicos de una ciudad o construcción, poseen datos de altura sobre el nivel del mar.
CA-1	Carretera centroamericana 1.
CA-2	Carretera centroamericana 2.
COGUANOR	Comisión Guatemalteca de Normas; cuya función es normalizar y certificar en Guatemala, desde el año

1962 a través del decreto 1523 del Congreso de la República.

CORS	Estaciones geodésicas de operación continúa conectadas entre sí en una red dependiente.
Curvas de nivel	Líneas que en un plano o mapa une puntos que tienen la misma cota.
Datum	Referencia definida a partir de un modelo asociado a la forma de la Tierra para definir un sistema de coordenadas.
Formato RINEX	Es un formato de ficheros de texto orientado a almacenar de manera estandarizada medidas proporcionadas por receptores de sistemas GNSS. Por sus siglas en inglés, Receiver Independent Exchange.
Georeferencia	Técnica de posicionamiento espacial definida por coordenadas y un datum específico.
GNSS	Sistema global de navegación por satélite para definir un punto sobre la Tierra.
GOCE	Satélite de la Agencia Espacial Europea ESA, dedicada a la medida del campo gravitatorio terrestre. Lanzado el 17 de marzo de 2009.

GPS	Sistema de posicionamiento global.
ICOTEC	Instituto colombiano de normas y técnicas y certificación.
IGN	Instituto Geográfico Nacional de Guatemala, cuya función es la de crear y mantener la red geodésica autorizada para la toma de datos de georeferencia.
IMU	Unidad de medición inercial (<i>inertial measurement unit</i>).
ITRF	Sistema internacional de referencia terrestre; describe los procedimientos para crear marcos de referencia, adecuados para su uso con mediciones sobre la superficie de la Tierra.
LiDAR	Metodología para la creación del MDT, MDS y/o MDE a través de un dispositivo que permite determinar la distancia desde el emisor láser a la superficie utilizando un haz láser pulsado.
Líneas de quiebre	Se utilizan en un MDT para mejorar la creación de la superficie definiendo de mejor las estructuras existentes como caminos, casas, aceras, etc.
Manual de Chile	Norma para la realización de estudios, diseños y construcción de carreteras de Chile. Creado por el

Ministerio de Obras Públicas a través de la Dirección de Vialidad. La última edición es del año 2018.

Modelo geoidal

Modelo físico que busca representar la verdadera forma de la Tierra, calculándola como una superficie del campo de gravedad con potencial constante y es utilizada como referencia para determinar la elevación del terreno.

NASA

Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio; agencia del gobierno estadounidense, responsable del programa espacial civil, investigación aeronáutica y aeroespacial.

NTC

Normas técnicas colombianas; creadas por el Instituto colombiano de normas y técnicas y certificación.

PDOP

Término usado en la navegación con satélite e ingeniería geomática para especificar el efecto multiplicativo adicional en la precisión de medidas posicionales. Por sus siglas en inglés, *position (3D) dilution of precision*.

Puntos ground

Clasificación normada por la ASPRS para definir el suelo o terreno descubierto, cuyos puntos son los utilizados para la generación de MDT.

RMSE	Mide el promedio de los errores al cuadrado, es decir, la diferencia entre el estimador y lo que se estima. Conocida también como desviación estándar.
SIECA	Secretaría de Integración Económica Centroamericana; es el órgano regional que ofrece acompañamiento técnico a los gobiernos de la región, para impulsar los esfuerzos para alcanzar gradualmente la unión económica de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá.
SIRGAS	Acrónimo para el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas; el cual es el sistema de referencia geodésico, producto de la densificación de una red de estaciones GNSS de alta precisión en el área continental.
TPDA	Tránsito promedio diario anual, es el volumen total de vehículos que pasan por un punto o sección de una carretera en un período de tiempo determinado, que es mayor de un día y menor o igual a un año, dividido por el número de días comprendido en dicho período de medición.
UTM	Sistema de coordenadas universal de Mercator, por sus siglas en inglés, Universal Transverse Mercator; sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye

como la proyección Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace secante a un meridiano.

WGS84

Sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra (sin necesitar otro de referencia) por medio de tres unidades dadas (x,y,z). WGS 84 son las siglas en inglés de World Geodetic System 84 (que significa sistema geodésico mundial 1984).

RESUMEN

Durante muchos años, la infraestructura en Guatemala ha tenido mejoras a través de nuevas tecnologías utilizadas tanto para realizar el diseño de ingeniería de detalle y el control de calidad durante la construcción. Entre las áreas que están innovando tenemos: las estructuras de pavimento, puentes, etc.; sin embargo, los estudios de topografía, que son la base para iniciar los estudios, se han quedado en el uso de topografía convencional a base de estaciones totales. Si bien es cierto, las estaciones totales obtienen excelentes precisiones para la toma de datos, muchas veces no pueden utilizarse en las primeras etapas del diseño, por tiempo y costos.

Los proyectos de infraestructura que utilizan las ventajas de la tecnología existente como fotogrametría y LiDAR, (por sus siglas en inglés, *Light Detection and Ranging*), se podrían mencionar los hidroeléctricos y viales, en cada una de sus etapas: perfil, pre factibilidad, factibilidad e ingeniería de detalle.

Como en todas las áreas profesionales, es importante aprovechar la experiencia de otros países que están realizando proyectos, resolviendo problemas, etc. y utilizar esa experiencia para evitar errores en proyectos locales. Una de las maneras más fáciles de realizar transferencia de conocimientos, se tiene cuando una empresa internacional es contratada para realizar un proyecto, y esta a su vez contrata profesionales locales.

El proyecto de ampliación y mejoramiento de la ruta CA-2 Occidente, tramo: Cocales (Suchitepéquez) – Ciudad Tecún Umán (San Marcos), pertenece al plan maestro centroamericano, el cual debe ser ampliado de 2 a 4 carriles, mejorando

sus condiciones actuales, para permitir el paso de las cargas y volúmenes estimados de tránsito.

Uno de los problemas más sensibles para este proyecto es el derecho de vía, sobre todo en la zona donde los grandes ingenios de producción de azúcar, poseen o tienen rentados grandes extensiones de tierra. Antes de empezar una negociación de derecho de vía, es necesario tener estudios que permita determinar técnicamente cual es la mejor área para realizar la ampliación de los 2 carriles existentes. Pueden realizarse las ampliaciones a la izquierda o derecha y muchas veces dependiendo de los problemas de la orografía del lugar, al centro.

Además de ello se determinó que existen 3 ciudades donde es contraproducente realizar la ampliación: San Bernardino, Mazatenango y Cuyotenango; donde además de tener invasión del derecho de vía con construcciones formales, algunas zonas realizan giros a casi 90° sobre el eje.

También, es importante conocer los recursos naturales que se afectarán como ríos, lagunas, lagos, donde muchos de los cuales, pueden pertenecer al Estado, pero en carácter de zona protegida, hace más complicado su construcción.

En este proyecto se utilizó el LiDAR aerotransportado, para realizar la toma de datos de superficie de un área de 140 km con un búfer de 400 m. el cual sirvió para generar el modelo digital de terreno donde se trabajó el diseño geométrico a nivel factibilidad, obteniendo datos necesarios para determinar como mínimo lo siguiente:

- Movimiento de tierras

- Determinar cantidad y longitud del drenaje mayor
- Microcuencas para el drenaje menor, así como su ubicación, longitud, etc.
- Estructuras existentes

Con estos datos se realizó el diseño, encontrando muchas ventajas e igualmente desventajas, que los métodos convencionales conocidos en el país.

Por tal motivo se pudo analizar y comparar ambos métodos según las normativas internacionales y poder realizar conclusiones y recomendaciones para ser utilizados en futuros proyectos de infraestructura vial en el país.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para un proyectista, tener un modelo digital de terreno es la base para crear un diseño, que sea ejecutable y que si hubiere modificaciones no sean significativas; de lo contrario, los costos estimados tendrán variaciones que afecten las condiciones económicas/financieras del proyecto.

Lamentablemente, este escenario es muy común en el área de infraestructura vial en Guatemala; muchos proyectos viales diseñados no reflejan las condiciones reales en campo, obligando que los presupuestos destinados se vuelvan insuficientes. Esto genera poca certeza en los constructores, los bancos que realizan los financiamientos, las empresas supervisoras, y en los usuarios, que cada vez más ven más proyectos sin terminar.

Actualmente, para la obtención de datos de superficie se usa la topografía convencional. Esta metodología tradicional posee muy buena precisión, sin embargo, el problema radica en los criterios utilizados durante el levantamiento. Muchas veces no se toman datos importantes en el terreno afectando las estimaciones de movimientos de tierra.

El uso de fotogrametría, prácticamente es de uso limitado en proyectos viales; se utilizan más en proyectos hidroeléctricos y/o por empresas extranjeras que ya lo han utilizado en otros países y conocen su potencial y beneficios.

Por otro lado, en Guatemala, lamentablemente, no existe la costumbre de compartir la información obtenida mediante la experiencia de proyectos similares,

por lo que cada vez que aparece el mismo problema en otro proyecto, tendrán que empezar a investigar prácticamente de cero.

Se tiene además la creencia que usar tecnología en un proyecto, supone elevar los costos, algo que no siempre es así.

En Latinoamérica, hay poca planificación urbana por lo que se ha vuelto común hacer libramientos a las ciudades. Es común como muchas rutas principales de la red vial han pasado a ser prácticamente calles. Esto podemos verlo por ejemplo en la carretera CA-2 Occidente, al transitar por los municipios de San Bernardino, Mazatenango y Cuyotenango. Estos puntos, se han vuelto un embudo que no permite una libre circulación al tránsito. Algunas veces el problema es tan grave, que pasan hasta horas detenido el tránsito sin poder tener una opción para evitar pasar por allí.

Para mejorar la movilidad, se requieren estudios de ingeniería que permitan resolver el problema. Estos estudios, deben realizarse a través de métodos no invasivos, como por ejemplo la fotogrametría y/o tecnología LiDAR, ya que para poder realizar el estudio de topografía se necesitan permisos a cada propietario del lugar. Estos permisos, hacen argumentar a las personas que el terreno puede ser afectado y esto podría crear una falsa expectativa, haciendo que éstos especulen con los precios de sus propiedades, haciendo que los proyectos muchas veces sean inviables, sin saber aún si podrían serlo en condiciones normales y todo esto debido a la falta de leyes que los regulen.

Por tal motivo, es importante registrar las experiencias obtenidas en la utilización del LiDAR para la obtención de datos que sirvan para generar modelos digitales de terreno como apoyo al diseño desde su fase de prefactibilidad, factibilidad y en algunos casos, la de ingeniería de detalle.

Este es el caso del diseño geométrico, que se realizó en la CA-2 Occidente tramo: Cocales – Tecún Umán, con una longitud de 140 kilómetros, los cuales no podían hacerse inicialmente con topografía convencional, por lo que la tecnología LiDAR dio una solución viable, cuya precisión es la que será evaluada en el presente trabajo y servirá como apoyo en la toma de decisiones para futuros estudios de ingeniería.

OBJETIVOS

General

Comparar modelos digitales de terreno, generados a partir de topografía convencional con la tecnología LiDAR, para uso en el diseño de un proyecto vial en la República de Guatemala.

Específicos

1. Comparar mediante métodos utilizados en varios países del mundo, a fin de conocer las diferencias entre modelos digitales generados mediante topografía y LiDAR.
2. Definir la confiabilidad del dato capturado en cada una de las metodologías convencional (topografía utilizada en estaciones totales) y no convencionales (LiDAR).
3. Establecer la exactitud de los modelos digitales de terreno generados con LiDAR, utilizando metodologías de comparación avaladas por normativas internacionales y por recomendaciones realizadas en otros proyectos fuera de Guatemala.
4. Establecer el uso de tecnología LiDAR para la obtención de datos en otros proyectos.

Hipótesis

El uso de la tecnología LiDAR en un proyecto vial puede establecer parámetros técnicos que aventajen a la tecnología actual utilizada en Guatemala; promueve su uso y aceptación en el medio regulador del país.

RESUMEN DEL MARCO METOLÓGICO

Antes de realizar la comparación de dos metodologías es importante conocer a fondo como funciona cada una para determinar ventajas, desventajas y alcances; ya que al tener los resultados no podrá concluirse y tampoco realizar recomendaciones al respecto.

Por tal motivo, aunque el método válido para comparar el LiDAR es la topografía convencional, ampliamente conocido en el medio de ingeniería vial, es importante realizar un repaso de los equipos disponibles, así como las tolerancias necesarias en cada levantamiento para considerarlo válido.

Por otro lado, la tecnología LiDAR que no había sido usada en proyectos viales en Guatemala, es mucho más compleja que la topografía convencional, ya que esta utiliza además del escáner láser, el GPS de doble frecuencia, se agrega una unidad de medición inercial (IMU) que documenta la ubicación exacta y balanceo (*roll*), cabeceo (*pitch*) y desvío (*yaw*) de la aeronave en el momento que el láser es enviado a la superficie. De todo esto, lo más complejo es el GPS, ya que, si no se utiliza un adecuado datum, tanto horizontal como vertical, se tendrán errores inducidos a la metodología.

Después de la toma de datos con cada metodología, es importante guiarse con normativas para la evaluación de los datos. Las normas de la ASPRS (por sus siglas en inglés, Sociedad Estadounidense de Fotogrametría y Teledetección), las normas de diseño chilenas además de estudios realizados en Colombia y España sirvieron de base para utilizar la estadística como herramienta de comparación. Las normas actuales recomiendan la RMSE (raíz

media cuadrática) para el caso de terrenos sin vegetación y el 95 percentil para aquellos que poseen vegetación. Guatemala es un país con mucha vegetación por lo que será difícil encontrar un proyecto de infraestructura vial descubierto; sin embargo, es importante analizar con ambos métodos y comparar los datos.

Es importante entender que normas guatemaltecas deben ser creadas utilizando como base las de países como Chile, las cuales ya empiezan a generar mejores resultados. México y Colombia también están ya empezando a reconocer la tecnología LiDAR, como opción en las fases de diseño.

INTRODUCCIÓN

Al iniciar la investigación de comparación entre dos metodologías para la generación de modelos digitales de terreno para el diseño de infraestructura vial, se dio la oportunidad de conocer mejor cada, especialmente la LiDAR.

El LiDAR no solo es el haz láser aerotransportado que es lanzado desde un dispositivo y recoge la información de la superficie, sino que requiere de un sistema de geoposicionamiento como el GNSS o GPS, el cual es de mucha importancia para la precisión necesaria.

El GPS, aunque ya forma parte de la vida cotidiana y está presente en casi todos los dispositivos electrónicos que se utilizan, celular, computadora, etc.; contiene una serie de componentes que son de vital importancia conocer para aprovechar al máximo las ventajas del LiDAR.

Se ha mencionado que el LiDAR existe antes del GPS, pero su uso era limitado porque no se podía transportar. El GPS le dio ese factor que necesitaba.

Para que el GPS apoye y genere coordenadas a cada uno de los datos obtenidos por el LiDAR, necesita trabajar sobre un Datum, el cual ha tenido modificaciones durante todos estos años. Los modelos geoidales han sido perfeccionados con el uso de tecnologías usadas por la NASA. Además de la creación de sistemas de referencia adecuados a cada país, como el SIRGAS, del cual es parte Guatemala por medio del Instituto Geográfico Nacional.

Los fabricantes de los equipos también han realizado mejoras, ha creado dispositivos con mejores receptores; no importa las condiciones meteorológicas, sobre todo en la costa sur del país donde se registra la mayor precipitación pluvial.

Además del GPS, es importante mencionar que los equipos LiDAR aerotransportados deben ser capaces de emitir por lo menos 4 retornos para poder obtener datos del suelo. Para este caso en particular, la CA-2 está implantada en zonas de bosques, cañaverales y construcciones aledañas a la carretera, con lo cual se pudo solventar esta dificultad.

Toda esta información obtenida en el sitio del proyecto, requiere además de postproceso, el cual es de vital importancia para obtener los puntos *ground* (superficie) lo más precisos posibles. Este postproceso realizado con software especializado, requiere de calibraciones y generación de filtros que permiten mejorar el desecho de la información no necesaria para este trabajo, como copas de árboles, estructuras, etc., el cual sirve para un modelo digital de superficie, no necesario en la ingeniería vial.

Con el apoyo de la ortofoto obtenida durante el levantamiento LiDAR se mejoró la calidad del diseño, ya que el proyectista pudo observar el comportamiento de las curvas de nivel.

Todo esto, sumado a que el LiDAR obtiene por lo menos un punto por cada metro cuadrado de superficie generando una superficie más real.

La calibración es de vital importancia, por lo que es necesario realizar un vuelo de calibración. Los filtros que se utilicen para obtener los datos *ground* y separarlos de los inútiles para la creación del MDT también es importante, para

que el producto final pueda apearse a las categorías o clases que mencionan las normativas internacionales válidas para estos trabajos.

Como se verá en el trabajo de comparación, se pueden utilizar varias metodologías para validar los datos obtenidos con LiDAR, comparándolos, en este caso, con la topografía convencional con estación total; por lo que se siguen las recomendaciones dadas por estudios realizados con normativas colombianas y trabajos presentados en España; todo esto avalado por todas las normativas internacionales como la de la ASPRS que es la recomendada para certificar un levantamiento de un proyecto de infraestructura vial.

Los resultados obtenidos son muy interesantes y reflejan lo encontrado *in-situ* durante la ejecución de la obra. Toda esta experiencia da conclusiones que pueden utilizarse en proyectos similares futuros; además de las recomendaciones que pueden servir para evitar retrasos y aprovechar al máximo la tecnología LiDAR.

Debe, además, aclararse que la función del presente trabajo no es la de invalidar el trabajo realizado; solamente, servir como apoyo en el conocimiento del sistema LiDAR; sus ventajas y desventajas; así también ayudar a entender cómo mejorar posibles errores.

ANTECEDENTES

Los proyectistas guatemaltecos de proyectos viales han utilizado técnicas topográficas tradicionales para la generación de superficies de terreno y con éstos se realizan los cálculos de movimientos de tierras, drenajes, etc.; sin embargo, esto ha ido cambiando considerablemente debido a la utilización de computadoras, las cuales poseen herramientas que permiten trabajar con mejores rendimientos y precisiones al momento de diseñar.

A partir de la generación de los modelos digitales de terreno (MDT), se pueden obtener de campo más que datos de la superficie topográfica, los cuales mejorarán los diseños y harán cálculos más reales. La obtención de datos se puede realizar mediante levantamientos topográficos convencionales utilizando teodolitos, estaciones totales, niveles de precisión y GPS. En algunos proyectos de grandes dimensiones, se ha utilizado la fotogrametría, como un método de planificación y diseño a nivel preliminar o pre-factibilidad. En la actualidad, ya existen técnicas para la obtención de datos denominadas no convencionales (hasta el momento en el área vial) como lo es la tecnología LiDAR (Han, 2014).

Esta tecnología fue desarrollada por la NASA en la década de los 70s, pero no tenía demasiadas aplicaciones. Con la llegada del GPS, el LiDAR encontró un aliado importante, que le permitió implementarse en proyectos de todas las áreas, incluyendo la ingeniería vial.

El LiDAR ha sido utilizada en proyectos de grandes dimensiones como las hidroeléctricas. Ya a partir de los años 2010s se empezó a utilizar el LiDAR en proyectos viales (Han, 2014); una opción que permite ver el proyecto en forma

global y con muchas alternativas. Podría decirse que la tecnología LiDAR lleva al escritorio la superficie del terreno de una manera más fiel y precisa que cualquier otro método de levantamiento convencional. Empezó a ser utilizada con mayor intensidad para crear modelos digitales de superficie (MDS) en proyectos viales (Fecilísimo, 2014) los cuales buscaban determinar la exactitud de los datos obtenidos por el escaneo laser apoyado con topografía convencional. En los Países Bajos en el año 2013 se realizó la investigación *Evaluación de la Exactitud Posicional Vertical de una Nube de Puntos Topográficos LiDAR usando topografía Convencional como referencia* (Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra, y Cortina, 2014). En esta investigación se determinó la exactitud vertical de una nube de puntos, con una densidad de 1.02 puntos por metro cuadrado. Si se toma que los datos tomados con estación total tienen precisiones milimétricas, los datos obtenidos con LiDAR cumplen con las especificaciones solicitadas por las especificaciones y/o términos de referencia solicitados por cualquier entidad incluyendo a la Dirección General de Caminos.

No está demás mencionar que la tecnología siempre está en revisión y mejora y esto mismo sucede con la LiDAR, la cual aún no alcanza todo su potencial hasta el momento.

Existen infinidad de estudios, realizados alrededor del mundo (Ibañez Martínez, 2007), con resultados positivos y cada vez con mejores resultados, siempre y cuando se defina el tipo y alcances del proyecto a realizar. En Alemania, por ejemplo, existe una normativa muy restrictiva para proyectos viales, debido al cuidado que tienen con la naturaleza, por lo que cualquier estudio debe tener tolerancias altas, permitiendo que los estudios viales se realicen con LiDAR.

En Latinoamérica, Colombia y Chile son los países pioneros en LiDAR, los cuales han creado sus propias normas que regulan el uso de LiDAR. Por ejemplo, las normas técnicas creadas por el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) basadas en las normas de ASPRS, 2004, para validar los trabajos realizados con LiDAR en el territorio colombiano; en Chile es el Ministerio de Obras Públicas (MOP), a través de la Dirección de Vialidad, quien implementó las normativas para esta tecnología, en sus manuales de carreteras, en el capítulo de *Términos de referencia para estudio de obras viales*.

México es otro país que está realizando proyectos viales utilizando LiDAR para diseños a nivel factibilidad. La UNAM (Universidad Nacional Autónoma de México), en el año 2013, realizó una investigación, (Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra y Guevara Cortina, 2014) la cual muestra los resultados de la efectividad del uso de esta tecnología y da las recomendaciones y limitaciones que esta posee.

Dentro del presente estudio de comparación, se da un valor al marco teórico de los métodos a evaluar para la obtención de datos de la superficie topográfica, aprovechando para describir las tecnologías involucradas.

El uso de equipo convencional, como la estación total, requiere además una red georreferenciada y que es de carácter obligatorio en todos los proyectos viales.

Como se decía anteriormente, el LiDAR está compuesto las siguientes tecnologías:

- Sistemas de posicionamiento satelital, GPS
- Fotogrametría

- Tecnología láser (LiDAR)

Cada una de las partes de la tecnología requiere apoyo de la misma red geodésica, puntos de control, todos referidos al sistema avalado por el Instituto Nacional Geográfico y al que a su vez forma parte de la red SIRGAS, la cual es la base de Latinoamérica.

Por tal motivo, es necesario entender el marco teórico que incluye todo lo anterior y a partir de allí, se podrán realizar los análisis estadísticos de precisión con base en las normativas vigentes, para concluir y realizar las recomendaciones adecuadas a nuestro medio.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Levantamientos topográficos

Como lo indica Rodríguez (2015) la información topográfica obtenida en campo es uno de los pilares sobre el cual se basan los demás estudios técnicos de infraestructura. Es tal su importancia que no debe de comprometerse la precisión y calidad, por lo que es importante garantizar que se cumplan con los parámetros solicitados en los términos de referencia de cada proyecto. Estos parámetros basados en normativas internacionales requieren de un control de calidad durante la toma de datos para que, en su posterior proceso y análisis en gabinete, alcance las expectativas esperadas.

El Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda aún no cuenta con una norma que regule los parámetros y las tolerancias a utilizar en levantamientos topográficos para los estudios de ingeniería vial, en cada una de sus fases (perfil de proyecto, prefactibilidad, factibilidad, ingeniería de detalle), solamente lo indicado por las bases de licitación que crea un proyecto en específico.

No es correcto dejar únicamente a las bases de licitación que definan las precisiones y metodologías aceptadas para crear un diseño porque son demasiado generales, sobre todo porque en general, las bases que se sacan para los concursos de licitación son estandarizadas y no realizan una clasificación para proyectos que utilicen nuevas metodologías o las condiciones propias de cada proyecto.

1.2. Levantamiento con topografía convencional

La topografía denominada convencional, está basada en medición de ángulos y distancias tomadas en campo (Galindo y Villarraga, 2017, p.24). Estos datos tomados en sistema angular se trasladan a un sistema cartesiano, donde no se considera la curvatura de la Tierra. Estos datos o puntos son la base para crear un modelo digital de terreno.

Para la realizar este tipo de levantamientos se requiere de instrumentos electro-ópticos como las estaciones totales

Figura 1. **Equipo para realizar levantamientos topográficos**



Fuente: One Point Survey. (2019). *Estación total Leica*. Recuperado de <https://www.onepointsurvey.com/products/leica-viva-ts11-total-station>.

Estos equipos deben estar calibrados y recibir mantenimientos periódicos, para evitar desajustes, los cuales pueden comprometer tolerancias que certifica el fabricante, haciendo que el trabajo en campo no obtenga los resultados esperados.

1.2.1. Tolerancias

Actualmente en las normativas internacionales las tolerancias están referidas a la escala en que se vaya a confeccionar los planos de diseño y a la distancia mínima entre las curvas de nivel.

Se toma de referencia que los equipos disponibles en el mercado nacional, no se deben tener errores mayores a 0.2 mm a la escala del plano a entregar en un diseño vial (Dirección de Vialidad, 2018, p.131).

Para las tolerancias en las poligonales principales topográficas se suele utilizar una precisión de por lo menos 1:20,000 y que los lados de ésta no supere los 12 por cada 5 km de longitud.

La tabla I se resume las tolerancias para estudios topográficos de seccionamiento, utilizadas por el Ministerio de Transporte de Chile para levantamientos convencionales.

Desde la aparición del GPS (siguiente capítulo del presente trabajo), se empezó a solicitar por las autoridades del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, que todos los proyectos estuvieran geo-referenciados.

El levantamiento con topografía convencional ha ido evolucionando; tiene como base el teodolito, que aún son utilizados en algunos proyectos, debido a su

gran precisión. En el medio guatemalteco se utilizan estaciones totales las cuales realizan levantamientos taquimétricos, con una colectora electrónica que almacena y calcula los datos de distancia (a base de láser) y que minimizan el error humano.

Tabla I. **Tolerancia para obtener secciones transversales**

Escala del levantamiento	Equidistancia de la curva de nivel	Tol. Prec. Planimetría (m)	Tol. Prec. Altimetría (m)	Densidad Mínima (puntos/Ha.)
1:2,000	2.0	0.40	0.50	25
1:1,000	1.0	0.20	0.25	50
1:500	0.5	0.10	0.15	100
1:200	0.2	0.05	0.10	400

Fuente: Dirección de Vialidad. (2018). *Procedimientos de estudios viales*.

1.2.2. **Postproceso de datos**

Dependiendo de los equipos que se utilicen (teodolitos o estaciones totales) así deben ser los procedimientos para trasladar la información al software donde serán representados gráficamente por medio de curvas de nivel.

Si es un teodolito, donde se traslada la información de una libreta manual a una hoja electrónica para calcular las coordenadas, o de una estación total, donde solamente se traslada digitalmente los datos de la colectora a una computadora.

Todos los levantamientos topográficos se representan gráficamente por medio de curvas de nivel. Cada punto tomado en campo no es cota entera, por lo que tendrá que utilizarse un método de interpolación, para obtener las curvas de nivel aproximadas a un metro.

En la carrera de ingeniería civil se enseña a realizar una interpolación lineal. Esta consiste en dividir la distancia entre los puntos de manera lineal y encontrar las cotas enteras donde pasará la curva de nivel a dibujar. Este método es bastante impreciso, ya que agrega al modelo un error de percepción humana, la cual es intangible.

Según lo describen Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra, y Guevara (2014) existen varios métodos estadísticos recomendados para la interpolación de una nube de puntos:

- El vecino más cercano (NN, *Nearest neighbour*)

“Consiste en encontrar en la nube de puntos, secciones transversales, de datos topográficos, el retorno más cercano a las coordenadas x,y,z de los puntos de referencia e interpretar la elevación de dicho retorno como valor reportado por los datos LiDAR para dichas coordenadas” (Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra, y Guevara Cortina).

- Red irregular de triángulos (TIN, *Triangulated irregular network*)

Es la forma más conocida de interpolación, ya que ésta es la que genera el programa de CAD más utilizado en Guatemala. Consiste en una red creada por triángulos cuyos nodos son los puntos obtenidos en campo, ya sea por topografía convencional o cualquier método que genere puntos con datos x,y y z. A partir

de los 3 puntos o nodos genera un triángulo que calcula la curva entre ellos. Es muy útil, porque se adapta mejor a las irregularidades del terreno, ocupa menos espacio y da buenos resultados como lo indica. (Sarría, 2006, p.128)

- Método de ponderación en función inversa de la distancia (IDW, *Inverse distance weighting*)

Consiste en asignar pesos a los n puntos más cercanos a cada dato de referencia con base en el inverso de la distancia a estos últimos para promediar el valor de la elevación en las coordenadas, x,y de cada punto sobre el terreno usado como referencia.

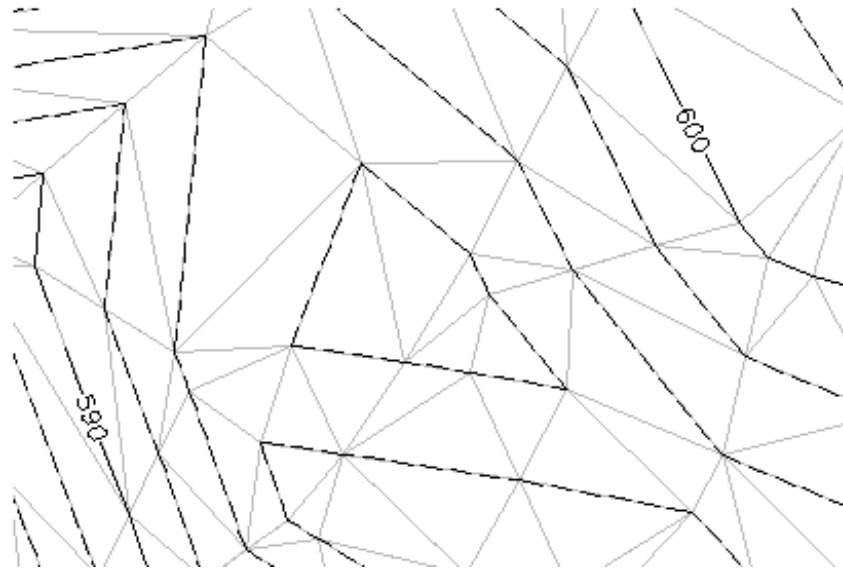
- Kriging (OK, *Ordinary kriging*, KT, *Kriging with a trend model*)

“Métodos de interpolación geo-estadístico basados en la teoría de variables regionalizadas, la cual asume que la variación espacial es homogénea en el área de estudio. El OK asume que la medida de la nube de puntos LiDAR varía a través del área en estudio, pero es constante en el vecindario local usado para la interpolación. KT asume que la media varía en cada vecindario local de interpolación” (Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra, y Cortina, 2014).

El CAD utilizado en el Guatemala crea una TIN, pero además utiliza el Método estadístico Kriging, para poder suavizar las curvas de nivel. Según el manual de AutoCAD (Autodesk, Inc., 2018) este método resuelve un problema que genera el suavizado individual de curvas de nivel que no toma en cuenta las curvas adyacentes, lo que en ocasiones provoca el solapamiento de curvas de nivel. El suavizado de superficie presenta ventajas, por ejemplo, permite realizar

una extrapolación más allá de la extensión de la superficie, basándose en las tendencias estadísticas de la superficie existente.

Figura 2. **Generación de curvas por el método TIN**



Fuente: Autodesk. (2018). *Manual del usuario*. Recuperado de <http://help.autodesk.com/view/CIV3D/2018/ENU/?guid=GUID-899731B5-0B6A-451E-9CF2-0DCF00FA9B64>.

En la topografía convencional es la metodología de toma y procesamiento de información más usada en proyectos de infraestructura vial, el cual constituye una representación de tipo vectorial, compuesta por un conjunto de líneas a las cuales se asocia un valor de altitud (Díaz, Villarraga y Galindo, 2017, p.30).

Para fines de las comparaciones realizadas en este estudio de tesis, se toma que la topografía convencional utilizando una estación total es exacta y la base para determinar la exactitud de la LiDAR.

1.2.3. Red georeferenciada

Para poder realizar el levantamiento del terreno, se construye una red que servirá como marco de referencia y a partir de la cual se ejecutarán los levantamientos topográficos. Esta red debe asegurar los estándares de precisión y calidad más rigurosos que los mismos proyectos de ingeniería y construcción.

Las bases georeferenciadas no deben estar colocadas a más de 5 km de distancia y deben ser monumentos de concreto, fuera del área de construcción y donde puedan permanecer en el tiempo. A partir de esta red geo-referenciada, se crean poligonales, preferiblemente cerradas, donde parten los levantamientos topográficos. Estos levantamientos, realizan la toma de datos a partir de secciones transversales con distancias entre 5 a 20 metros sobre el eje del camino y a 30 m como mínimo a cada lado de dicho eje. (Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda, 2001, p.98). Se solicita además que se realicen la toma de datos de las quebradas, ríos y todo accidente geográfico que permita ser tomado en cuenta en el diseño hidráulico y demás obras complementarias en gabinete.

1.2.4. Precisión de los puntos de control de redes georeferenciadas

La precisión de las redes es un punto muy importante, ya que estas son el marco de referencia sobre el cual se realizarán los levantamientos y materialización de los diseños, ya sean éstos convencionales o con fotogrametría, LiDAR, etc.; por tal motivo, debe de realizarse un control de calidad que cumpla con las tolerancias normadas.

Para las tolerancias de las redes geo-referenciadas se recomienda utilizar las indicadas por el Comité Federal de Datos Geográficos FGDC (Geospatial Positioning Accuracy Standards), la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección ASPRS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing), y/o también las normas latinoamericanas NTC 5204 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC y las incluidas en el Manual de Carreteras del Ministerio de Transporte de Chile.

En Colombia (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003) los estándares para clasificar una red geodésica están basados en las precisiones horizontales y a las alturas elipsoidales.

Los puntos de control colocados para las redes geodésicas en Colombia se clasifican en un estándar que se verifica para validar su consistencia con los demás puntos de la red nacional y no solo los colocados para un proyecto en específico.

Para clasificar estos puntos no se realizan cierres de las observaciones sino la capacidad del levantamiento de duplicar el valor de las existentes (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación, 2003, p.4).

En el año 2014 la ASPRS actualizó los estándares de precisión de las redes geodésicas para puntos de control colocados para datos de elevación y planimétricos, proponiendo la siguiente ecuación:

$$RMSE_x, RMSE_y \text{ o } RMSE_z = \frac{1}{4} \times RMSE_x(\text{mapa}), RMSE_y(\text{mapa}) \text{ o } RMSE_z(\text{DEM})$$

- RMSE: raíz media cuadrática (*root mean square error*)

Tabla II. **Estándares para precisión de redes geodésicas**

Orden	Clasificación precisión	95% de confianza menor o igual que
1	1 mm	0.001 m
2	2 mm	0.002 m
3	5 mm	0.005 m
4	1 cm	0.010 m
5	2 cm	0.020 m
6	5 cm	0.050 m
7	1 dm	0.100 m
8	2 dm	0.200 m
9	5 dm	0.500 m
10	1 m	1.000 m
11	2 m	2.000 m
12	5 m	5.000 m
13	10 m	10.000 m
14	15 m	15.000 m
15	20 m	20.000 m
16	50 m	50.000 m

Fuente: Instituto Colombiano de Normas. (2018). *Norma NTC 5204*.

1.3. Levantamiento con la tecnología LiDAR

La tecnología LiDAR fue inventada en los años 70 dentro de los programas de investigación de la NASA, pero al ser de vanguardia significaba un elevado costo. Aunque es muy preciso, por sí solo no podía utilizarse aerotransportado, por necesitar georeferencias. Con la llegada del GPS se le empezó a dar mucha utilidad.

Según lo describe Jiménez Perálvarez (2012) la tecnología LiDAR (*Laser Imaging Detection and Ranging*) mide distancias desde un emisor de láser,

existiendo de 2 tipos: a) aerotransportado (en el cual se centrará este trabajo de tesis) y b) el terrestre.

Como lo describe Galindo y Villarraga (2017) este sistema está compuesto por un transmisor, receptor, detector y la unidad de medida de tiempo. Como primera medida el transmisor emite el rayo de luz y lo dirige hacia el objeto, luego el reflejo de la luz incidente es captado por el receptor que lo dirige a un fotodetector donde se convierte en señal eléctrica.

El receptor mide con precisión el tiempo de viaje del pulso desde su inicio hasta su regreso. Con el pulso viajando a la velocidad de la luz, el receptor detecta el pulso de retorno antes de enviar el siguiente. Como se conoce la velocidad de la luz, el tiempo que le toma viajar se puede convertir en un rango medido por:

$$D = \frac{T \times c}{2}$$

Donde:

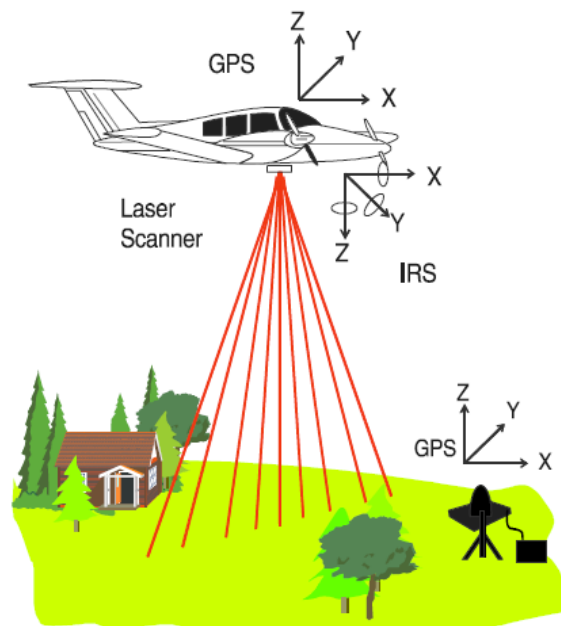
- D = distancia de receptor hasta objeto
- T = tiempo que le toma al laser ir de la unidad receptora al objeto y regresar
- c = velocidad de la luz, aproximadamente 299,792,458 m/s

En la aeronave, además del escáner láser, el GPS de doble frecuencia, se agrega una unidad de medición inercial (IMU) que documenta la ubicación exacta y balanceo (*roll*), cabeceo (*pitch*) y desvío (*yaw*) de la aeronave en el momento que el láser es enviado a la superficie. Toda esta información es administrada por un programa de computadora que combina toda la información y calcula las coordenadas x,y y z de precisión de cada uno de los retornos de láser. A partir

de cada retorno, se va formando una nube de puntos LiDAR que contiene toda la información que fue escaneada por el receptor. Contiene vegetación, estructuras, superficie etc. Dependiendo del equipo utilizado se tendrán varios retornos, es decir capas sobre el terreno. Si una superficie tiene vegetación se tendrán en promedio hasta 4 retornos, es decir, primer retorno: follaje de las copas, segundo retorno: tallos, etc. hasta llegar al terreno natural.

Es importante mencionar que existen diferencias entre el Modelo digital de superficie (MDS) y el modelo digital de terreno (MDT) (tratado con más detalle a continuación). Para los fines del diseño vial, se centrará en el modelo digital de terreno o MDT, el MDS tiene otras aplicaciones, para inventarios de bosques, tipo de flora, etc.

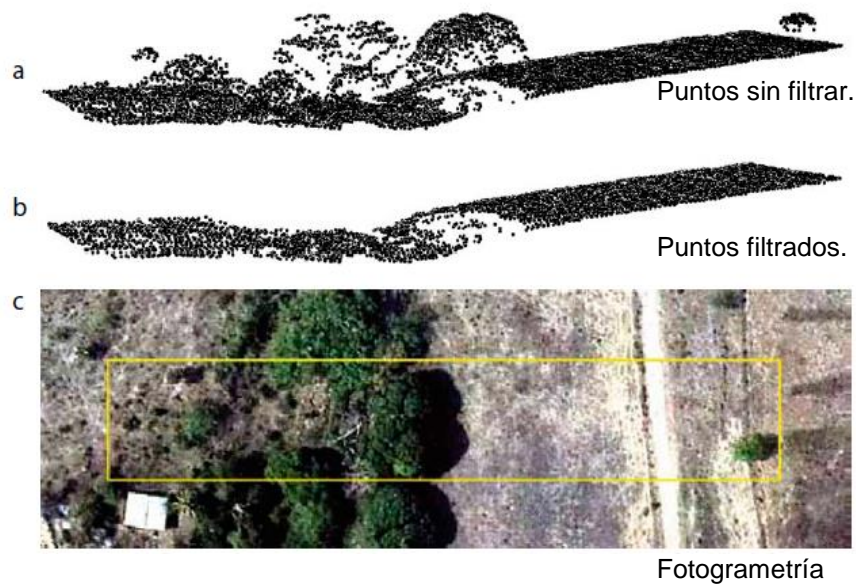
Figura 3. **Componentes de un sistema LiDAR aerotransportado**



Fuente: Berg, R. y Ferguson, J. (2000). *Airborne Laser Mapping For Highway Engineering Applications*.

Como se describirá más adelante, es importante mencionar que la tecnología LiDAR de por sí es muy precisa, ya que no requiere más que la inspección del ser humano para realizar la toma de datos; sin embargo, trasladar el MDS a MDT es una de sus principales limitaciones hoy en día.

Figura 4. **Nube de puntos LiDAR**



Fuente: Salinas Castillo, Paredes Hernández, Martínez Becerra y Cortina. (2014). *Evaluación exactitud vertical del LiDAR*.

En cada levantamiento LiDAR se toman fotografías aéreas las cuales sirven para generar la ubicación de estructuras, quebradas etc. que son post-procesos en la generación de información para crear un MDT.

Dentro de todas las ventajas de la tecnología LiDAR, se tiene que los vuelos de la nave que lleva el equipo, pueden programarse a cualquier hora del día, inclusive de noche, ya que la toma de información no necesita luz, inclusive si se

desea hacerlo durante lluvia. La única condicionante sería las restricciones que tenga la aeronave para poder realizar el vuelo.

Dentro de los errores que se presentan más comúnmente están los relativos al plan de vuelo y por supuesto a las condiciones del terreno.

1.4. Precisiones de tecnología LiDAR

La ASPRS recomienda en su última actualización de estándares de precisión para levantamientos LiDAR un error horizontal derivado de la elevación y de la red geodésica, error angular de altitud, error de vuelo la siguiente fórmula:

$$RMSE_r = \sqrt{(\text{GNSS error de posición})^2 + \left(\frac{\tan(\text{error IMU})}{0.55894170} \times \text{altitud de vuelo}\right)^2}$$

Donde:

- RMSE: distancia media cuadrática mínima (*root meansquare error*).
- GNSS: sistema global de navegación por satélite (Global Navigation Satellite System).
- IMU: unidad de medición inercial (*Inertial measurement unit*).

En la tabla siguiente se muestran las tolerancias que el Ministerio de Obras Públicas de Chile recomienda para los levantamientos LiDAR aerotransportados en proyectos viales. El rango de precisiones en altimetría, corresponde a tipos de superficies, considerando que para suelos descubiertos y planos se tienen valores menores y los más altos, para tipos de suelo montañosos y con algún grado de vegetación.

Tabla III. Tolerancias para LiDAR aerotransportado en proyectos viales

Escala del plano	Curvas de nivel (m)	Verificación en terreno. No más de 10% de la muestra presentará un error mayor que	
		Planimetría (m)	Altimetría (m)
1:500	0.50	0.15	0.15 – 0.25
1:1,000	1.00	0.25	0.25 – 0.50
1:2,000	2.00	0.50	0.50 – 1.00

Fuente: Dirección de Vialidad. (2018). *Procedimientos de estudios viales*.

Tabla IV. Precisión vertical/calidad de levantamientos LiDAR

Clase de precisión vertical	Exactitud absoluta		Mínimo recomendado NPD (pts/m ²)	Máximo recomendado NPS' (m)
	RMSE _z Sin Vegetación (cm)	NVA 95% Nivel de confianza (cm)		
1-cm	1.0	2.0	≥20	≤0.22
2.5-cm	2.5	4.9	16	0.25
5-cm	5.0	9.8	8	0.35
10-cm	10.0	19.6	2	0.71
15-cm	15.0	29.4	1	1.0
20-cm	20.0	39.2	0.5	1.4
33.3-cm	33.3	65.3	0.25	2.0
66.7-cm	66.7	130.7	0.1	3.2
100-cm	100.0	196.0	0.05	4.5
333.3-cm	333.3	653.3	0.01	10.0

Fuente: ASPRS. (2014). *Precisión de datos geoespaciales*.

2. MEDICIÓN DEL DATUM

2.1. Datum vertical

El datum vertical es la referencia sobre la cual se calculan las elevaciones. Para poder entender como calcular la altura sobre el terreno natural es importante conocer sobre el geoide y elipsoide.

2.1.1. Geoide

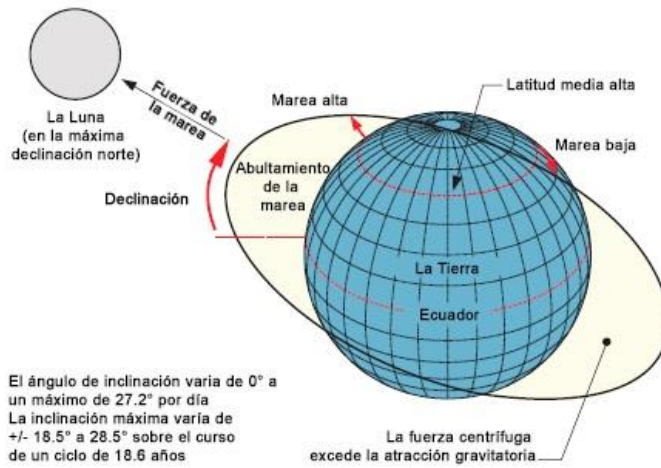
Es la representación de la línea equipotencial de la gravedad de la Tierra y es la que más se aproxima al nivel medio del mar. Es decir, si tomamos el nivel medio de los mares y se imagina que estos pasan debajo de los continentes, éste sería el geoide.

Esta representación sufre alteraciones causadas por la rotación de la Tierra y de los demás planetas. Esto se ve reflejado en las mareas, las cuales son deformaciones elásticas.

En la figura 6 se muestra la imagen tomada por el satélite GOCE con en el modelo más reciente del geoide publicado en el sitio web de la Agencia Espacial Europea, en el 2011.

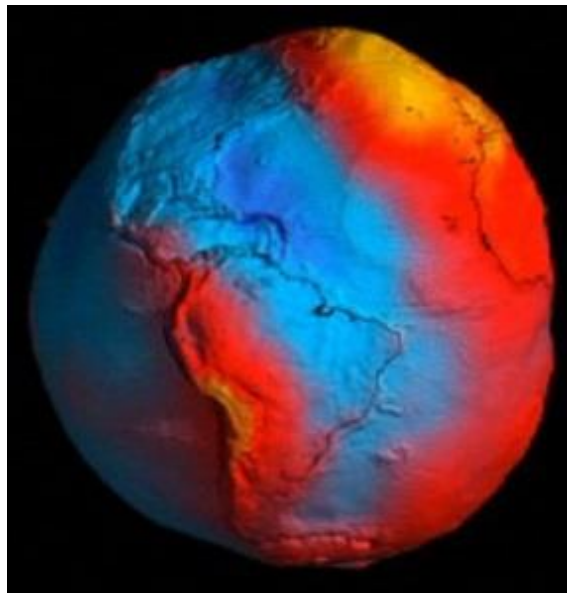
Dado que en cada parte de la tierra el geoide es muy irregular debido a la gravedad, masa de los continentes, etc. se han creado muchos modelos geoidales para representarlo; sin embargo, uno de los más precisos es el EGM08.

Figura 5. Efecto de las mareas



Fuente: Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors*.

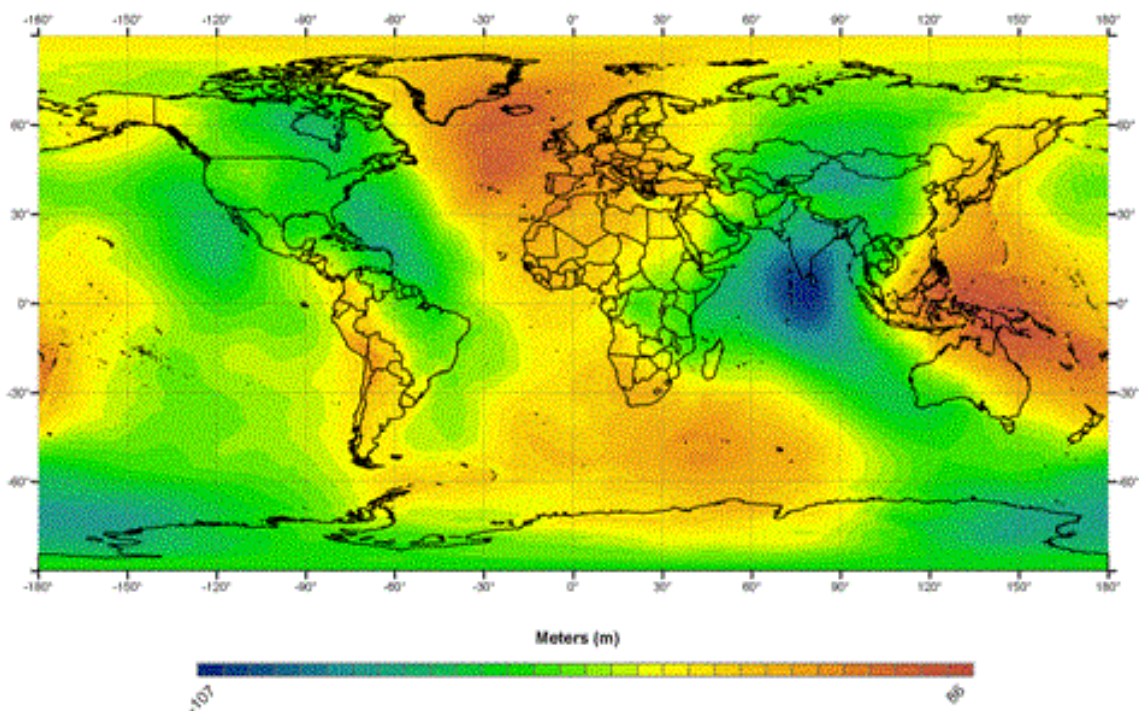
Figura 6. Modelo del campo gravitatorio terrestre (geoid)



Fuente: Agencia Espacial Europea. (2018). *Modelo gravitatorio terrestre*. Recuperado de www.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/.

El EGM08 (Earth Gravitational Model 2008) es un modelo geogravitacional creado por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) constituido por grados armónicos esféricos de hasta 2159 en orden y grado. Contiene coeficientes adicionales que lo extiende a grado 2190 y orden 2159.

Figura 7. **Modelo geoidal EGM08 (grilla de alturas a cada 2.5 min)**



Fuente: Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial. (2019). *Modelo geogravitacional*.

Recuperado de <https://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/gravitymod/egm2008/>.

Este modelo se utiliza en todo el mundo para calcular valores de ondulación geoidal en levantamientos GPS, sin embargo, algunas empresas y su experiencia en proyectos viales; como Horizons South America S.A.C. (2011) recomienda que estos modelos pueden soportar la generación de curvas de nivel a intervalos de 5 metros con ajustes, con constantes de elevación; sin embargo, para escalas

más precisas (curvas de nivel de 1.0 m) es recomendable el empleo de modelos geoidales locales.

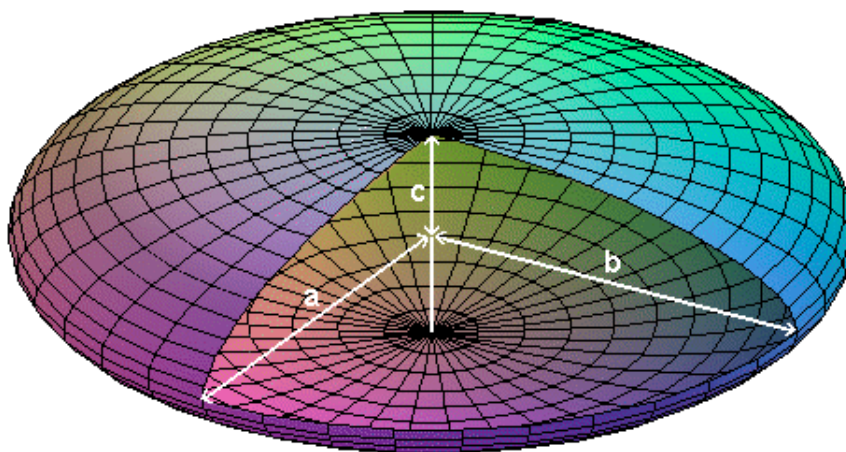
A la altura obtenida del geoide se le denomina altura sobre el geoide o geoidal (N).

2.1.2. **Elipsoide**

Dado que el geoide tiene una forma muy irregular, la cual no se puede representar matemáticamente se creó un elipsoide (en algunos lugares lo denominan también esferoide).

Un elipsoide es un volumen creado a partir de hacer girar una elipse. Esta elipse representa la Tierra, teniendo el semieje mayor del centro al Ecuador y el semieje menor del centro a los polos.

Figura 8. **Elipsoide**



Fuente: Berrocoso Domínguez M. (2012). *Los sistemas GNSS la última revolución geodésica.*

Los modelos de elipsoides que existen se diferencian uno del otro por las distancias de los semi ejes mayores y menores. Estos elipsoides han ido ajustándose con el paso de los años debido a la mejora en la tecnología.

El esferoide utilizado actualmente es el definido por el WGS84, que es prácticamente el elipsoide GRS80 como se muestra a continuación:

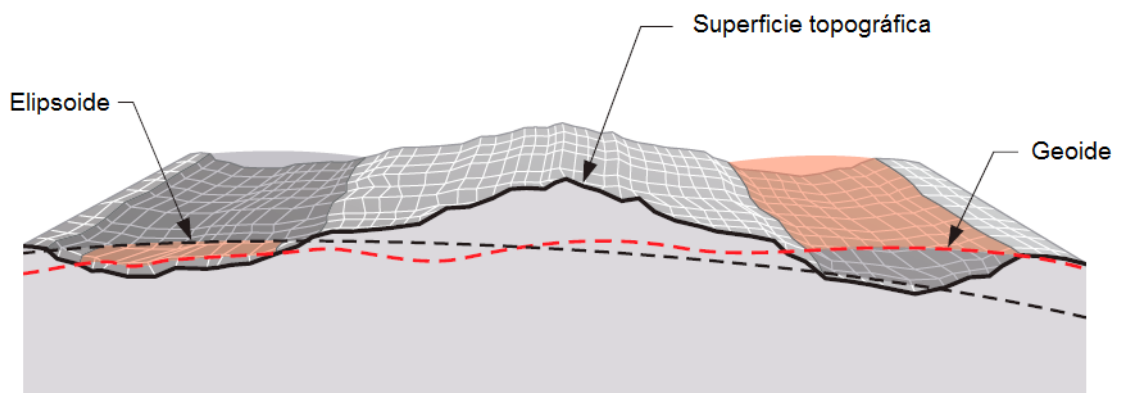
Tabla V. **Comparación entre esferoides**

Elipsoide	Semi eje mayor (m)	Semi eje menor (m)	1/f
GRS80	6,378,137.0	6,356,752.31414	298.257223563
WGS84	6,378,137.0	6,356,752.31424518	298.257222101

Fuente: ArcMap. (2019). *El geoide, el elipsoide, el esferoide y el datum, y cómo se relacionan.*
 Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/>.

El elipsoide WGS84 tiene su origen en el geocentro.

Figura 9. **Geoide, elipsoide y superficie topográfica (corteza terrestre)**



Fuente: Van Sickle, J. (2015) *GPS for Land Surveyors*.

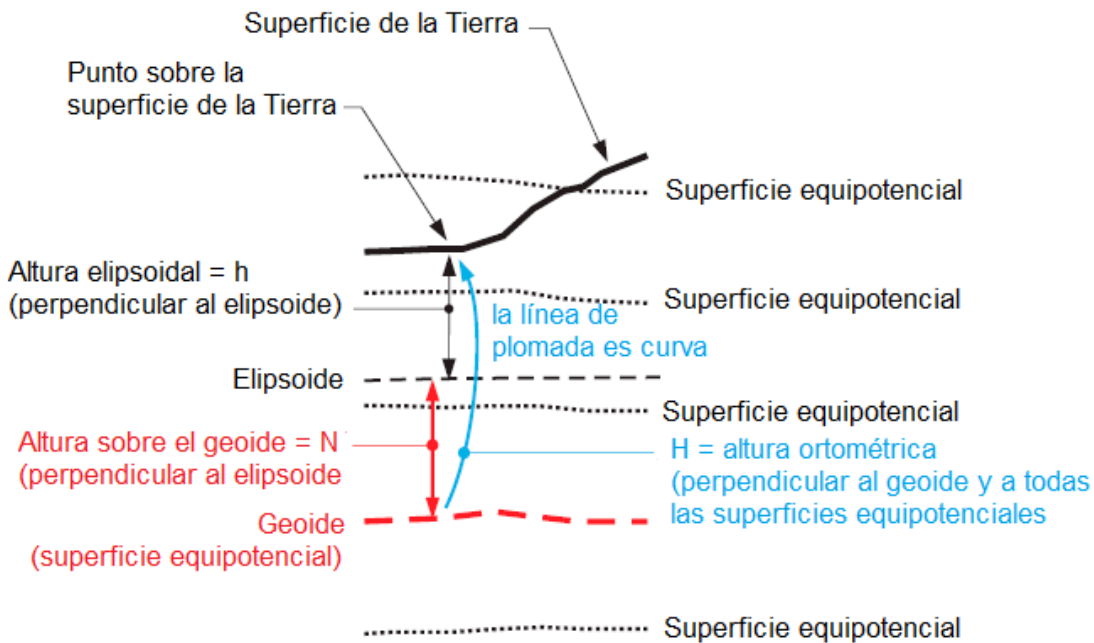
2.1.3. Altura ortométrica (H)

Los dispositivos GPS proporcionan la altura sobre el elipsoide (h), pero el dato que se necesita en topografía es sobre el terreno natural o superficie topográfica referido al nivel medio del mar (geoidal). A esta altura se le conoce como ortométrica (H).

Por tal motivo para conocer la altura ortométrica es necesario conocer la altura geoidal (N, por ser normalmente negativa) ya que la altura ortométrica la diferencia entre las alturas de elipsoide y geode, es decir:

$$H = h - N$$

Figura 10. **Altura ortométrica**



Fuente: Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors*.

2.2. Datum horizontal

Para definir el datum vertical el elipsoide es impráctico, pero para el datum horizontal es de uso amplio. Existen muchos modelos elipsoidales para definirlo. A continuación, se enumeran los más utilizados:

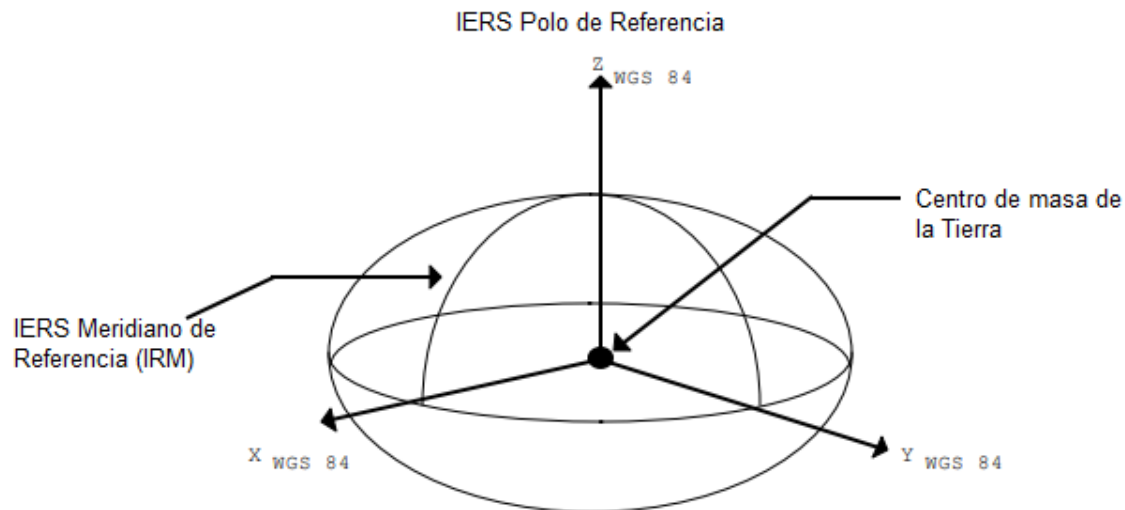
2.2.1. Datum horizontal WGS84

Al igual que en el datum vertical, el sistema WGS84 también tiene un datum horizontal, el cual es de mayor difusión en la actualidad. Anteriormente se ha venido utilizando el NAD27, el cual es de los datum más utilizados en EEUU. El NAD27 es también el utilizado en cartografía por el Instituto Nacional Geográfico (IGN) y aún hoy se encuentran en los mapas en escalas como 1:50,000, en ese datum, pero que no se adapta correctamente a nuestro territorio por alejarse demasiado de los EEUU por lo cual era necesario definir otro datum que se cumpliera con las precisiones.

Por tal motivo, empieza a utilizarse el definido por el WGS84, el cual es el que más se utiliza por la mayoría de dispositivos electrónicos, como celulares, tabletas, automóviles, GPS de navegación etc. (GISGEEK, 2014, p.80).

El WGS84 tiene una precisión submétrica. El centro de masa es igual al de la Tierra incluyendo océanos y la atmósfera. Su escala es el marco local de la Tierra, según la teoría relativista de gravitación. Tiene una orientación dada por la Oficina Internacional de Salud (BHI) en 1984 (National Imagery and Mapping Agency, 2000).

Figura 11. **Definición del sistema de coordenadas WGS84**



Fuente: Agencia Nacional Geoespacial. (2018). *Documento de estandarización*.

Como se mencionó anteriormente el elipsoide WGS84 es casi el mismo al GRS80 de la Unión Internacional de Geodesia (IUGG) en el año 1980 con una pequeña diferencia en los parámetros seleccionados el coeficiente utilizado para el segundo grado zonal. Este es el modelo gravitacional original en lugar del J2 utilizado por el GRS80.

2.2.2. **Datum ITRS (The International Terrestrial Reference System)**

Aunque actualmente el datum utilizado por el GPS es el WGS84 (World Geodetic System 1984) por ser la base del sistema de coordenadas mundial y ha sido utilizado por el ejército de los EEUU desde los años 1980, también se ha utilizado el sistema de referencia de la IERS (International Earth Rotation and Reference Systems Service) denominado ITRS (the International Terrestrial

Reference System). Este sistema salió en el año 1992 y al igual que el WGS84 es un sistema geocéntrico, es decir, coincide con el geocentro o centro de masa de la Tierra incluye los océanos y la atmósfera (International Earth Rotation and Reference Systems Service, 2013).

Al comparar el WGS84 con el ITRF92/08 coinciden a nivel sub-métrico, por lo que podría decirse que son idénticos (GISGEEK, 2014). Según la Agencia Nacional de Imágenes y mapas (NIMA) el WGS84 es consistente con el ITRF por tener diferencias en el rango de centímetros.

En años recientes, algunos países han trasladado sus datums a ITRF aunque el WGS84 es considerado idéntico a este (National Imagery and Mapping Agency, 2000).

2.2.3. Sistema de Referencia Geocéntrico (SIRGAS)

Debido a la densificación de la red GNSS de alta precisión, se creó un sistema de referencia geodésico internacional denominado Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas SIRGAS, cuya red cuenta con 250 estaciones. El Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur fue creado en Asunción, Paraguay en el año 1993 durante una conferencia internacional para la definición del datum geocéntrico suramericano. Debido a su diversificación, en el año 2001 se integraron las estaciones de América Central, EE.UU. y Canadá, creando el SIRGAS para toda América. (Sánchez Rodríguez, 2004), por recomendación de la Organización de las Naciones Unidas en su 7ma conferencia cartográfica de las Américas (Nueva York, enero 22 al 26 de 2001).

SIRGAS es el Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas. Su definición es idéntica a la del sistema internacional de referencia terrestre (ITRS:

International Terrestrial Reference System) y su realización es una densificación regional del marco internacional de referencia terrestre (ITRF: International Terrestrial Reference Frame) en América Latina. Además del sistema de referencia geométrico, SIRGAS se ocupa de la definición y realización de un sistema vertical de referencia basado en alturas elipsoidales como componente geométrica y en números geopotenciales (referidos a un valor W_0 global convencional) como componente física.

Para la conversión de coordenadas geocéntricas a coordenadas geográficas se utiliza el elipsoide GRS80. Todas las actividades relacionadas al datum Horizontal, son coordinadas por el SIRGAS-GTI: sistema de referencia y las actividades relacionadas a su aprovechamiento al SIRGAS-GTII: Sirgas a nivel nacional.

Para el caso del datum vertical, el SIRGAS define su sistema idéntico al Sistema de Referencia Internacional de Alturas IHRS (International Height Reference System). Todas las actividades para el datum vertical, son coordinadas por el SIRGAS-GTIII: datum vertical.

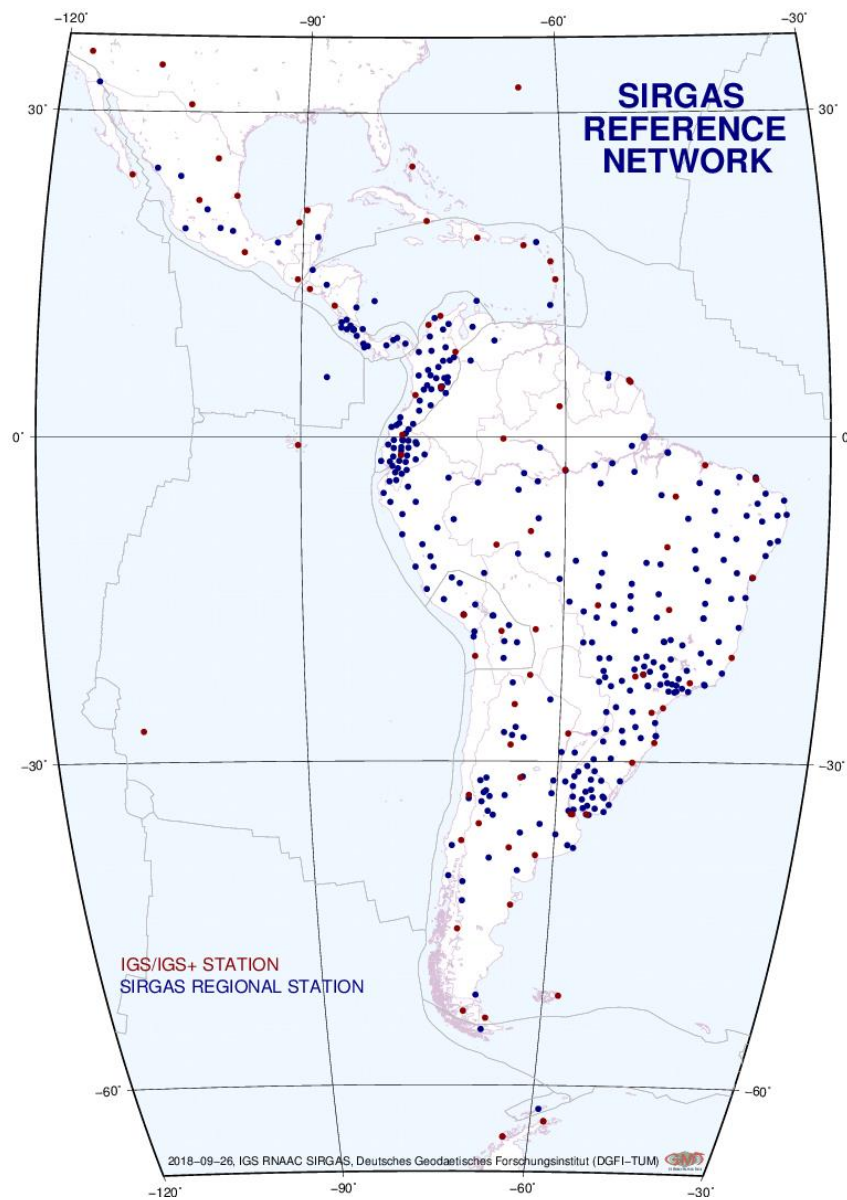
Guatemala ha incluido 15 estaciones dentro de la red SIRGAS, tipo CORS, después de la campaña SIRGAS95, coordinadas por el SIRGAS-GTIII.

2.2.4. Sistema de coordenadas de referencia, UTM

Tradicionalmente, se ha considerado para la representación de coordenadas cartesianas que la Tierra es plana. Sin embargo, el problema no se evidenció hasta que tuvieron que realizarse mediciones de grandes dimensiones. Ya en los años 1930 se diseñó un sistema utilizando modelos cónicos y cilíndricos de Lambert y Mercator para proyecciones de mapas. El datum era curvado, pero

solo en una dirección. Este método se utilizó por mucho tiempo. Hoy en día ya se utilizan mecanismos para mejorar la precisión geodésica.

Figura 12. Red SIRGAS



Fuente: SIRGAS. (2019). *Red de operación continua*. Recuperado de <http://www.sirgas.org/es/sirgas-con-network/>.

La distorsión de la posición de trasladar una coordenada geodésica a un sistema de coordenadas planas con este tipo de mecanismos y utilizando programas de computadora es generalmente pequeña.

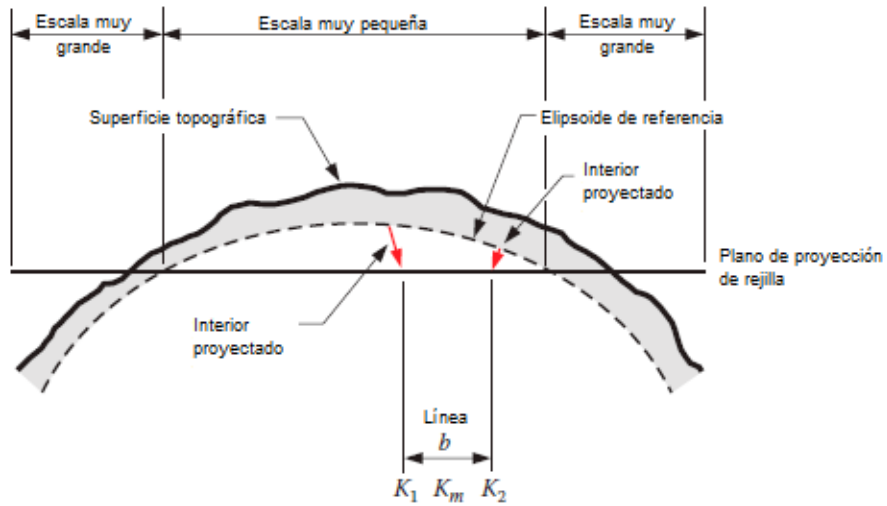
Siempre ha existido una lucha por representar la Tierra en mapas; se usan proyecciones las cuales siempre incluyen distorsiones; sin embargo, la tecnología ha ayudado a incrementar la precisión de los datos y la perfección de las proyecciones.

Las proyecciones actualmente utilizan un elipsoide, el cual tiene la misma forma general que la Tierra, pero a diferencia de un geoide, puede ser representado simple y correctamente en términos matemáticos (Van Sickle, 2015, p.29).

Con base en el elipsoide WGS84 se unificó el sistema de coordenadas utilizando la proyección conformal cónica de Lambert y la proyección transversal de Mercator. Esta proyección basada en una superficie de mapeo cilíndrica. A diferencia de Lamber cónico, el Mercator transversal representa meridianos de longitud como curvas en lugar de líneas rectas en la grilla. Esta proyección transversal se le denomina UTM (Universal Transverse Mercator System) y cubre toda la superficie de la Tierra. La proyección UTM divide el mundo en 60 zonas, que empiezan en la latitud 180°, donde se le denomina Línea Internacional de cambio de Fecha. Cada zona por lo tanto tiene 6° de latitud.

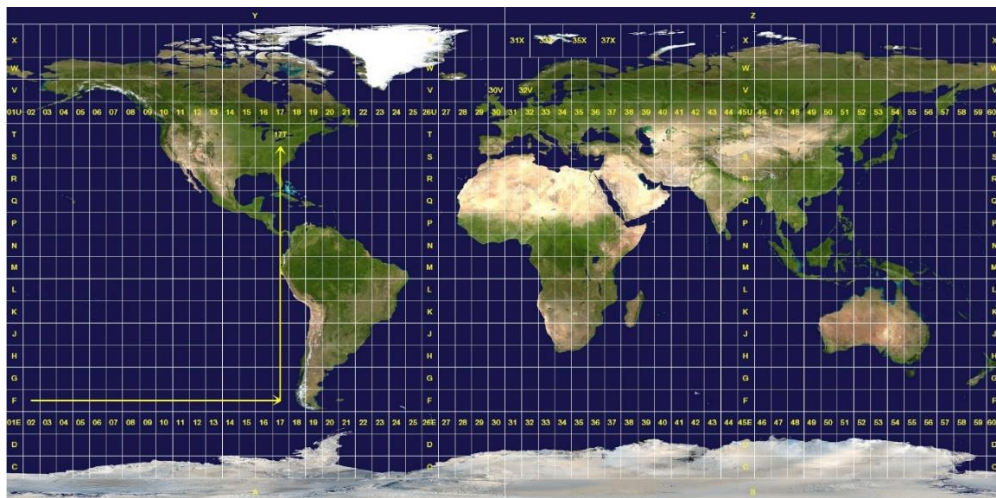
Como se observa en la figura 13, al estar más cerca del centro de cada zona, el factor de escala es mínimo (casi 0.9999) pero al estar más afuera de la zona el factor crece (no más de 1.0001).

Figura 13. Factor de escala



Fuente: Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors*.

Figura 14. Zonas UTM



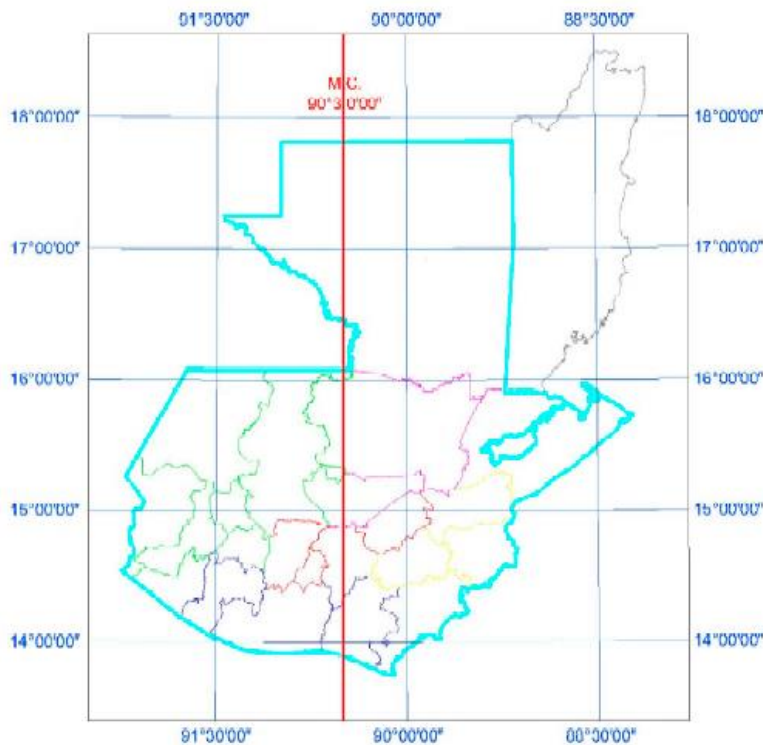
Fuente: Gerardus Mercator. (2019). *Sistema de coordenadas universal transversal de Mercator*.

Recuperado de <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ed/Utm-zones.jpg>.

2.2.5. Sistema de coordenadas de referencia, GTM

Guatemala se encuentra ubicada entre 2 zonas de UTM, zona 15 y zona 16. Por tal motivo, el Instituto Geográfico Nacional, realizó una adaptación del Transversa de Mercator con un factor de escala de 0.9998, para crear un sistema local de coordenadas denominado Guatemala Transverse Mercator – GTM - (Resolución Normativa IGN-01/99) con un meridiano central de 90°30' longitud Oeste y un falso este en 500,000 m. el cual fue oficializado por la Comisión de Normas COGUANOR del Ministerio de Economía (COGUANOR NTG 211001) (Castillo García, 2017, p.3).

Figura 15. Datum WGS84, proyección GTM



Fuente: Castillo García. (2017). *Breve explicación del sistema de coordenadas GTM v.2.0.*

Esta proyección es de carácter obligatoria para la geo-referencia de los proyectos viales, indicada por la Dirección General de Caminos y donde deben utilizarse factores de escala para realizarse los levantamientos topográficos y replanteo de los diseños realizados en CAD.

2.2.6. Proyección local transversal mercator (LTM)

En años recientes, el Ministerio de Obras Públicas de Chile, a través de la Dirección de Vialidad ha incluido dentro de sus manuales de diseño de carreteras, los beneficios del uso de una proyección local transversal mercator, para evitar los errores de proyección utilizando la UTM, o en nuestro caso la GTM. Esta nueva proyección local hace que el factor de escala sea igual a 1, por lo que las medidas tomadas en los levantamientos, serán las mismas que veremos en el software que utilicemos para diseño. Esta TM genérica o local, tendrá nuevos parámetros más restrictivos evitando deformaciones. (Dirección de Vialidad, 2018, p.24).

Este sistema local si se utiliza para proyectos viales de no más de 35 kilómetros se obtienen precisiones de alrededor de 1:100,000 y si el proyecto es de hasta 50 km precisiones de 1:33,000.

2.2.6.1. Definición de planos topográficos locales (PTL)

En el Manual de procedimientos geodésicos y topográficos, de la Dirección de Vialidad de Chile, se recomienda que para utilizar la LTM, como un plano topográfico local georreferenciado se utilice el factor de escala la altura del PTL (Kh) en el MCL, es decir, se debe ubicar el plano de proyección LTM a la altura del PTL.

Esto no significa que se modificarán las cotas SNM, pero debe dejarse constancia que en el proyecto está referido a otro plano PLT.

El factor de escala K, se calculará por la siguiente ecuación (Comisión Nacional de Riego, 2014, p.25).

$$K_H = \frac{R \times h_{PTL}}{R}$$

Donde:

- KH: factor de escala por efecto de la altura, a la cota hPTL
- R: radio medio terrestre (6,378,000 m)
- hPTL: altura del plano PTL (planos topográficos locales)

Debe además colocarse en los equipos los siguientes parámetros:

Tabla VI. **Parámetros del sistema LTM con altura PTL**

Sistema	LTM – PTL
Ancho de huso	1°
Meridiano Central Local (MCL)	Longitud geodésica definida en 0.25°
Factor de escala (KH)	Obtenido de la ecuación anterior
Falso Este Local (FEL)	200,000 m
Falso Norte Local (FNL)	7,000,000 m

Fuente: Dirección de Vialidad. (2018). *Procedimientos de estudios viales*.

2.2.6.2. Relación de distancias en terreno y PTL

Este método requiere que para calcular la distancia horizontal entre dos puntos a partir del PTL se debe aplicar la siguiente corrección Δs

$$DH_m = DPLT + \Delta s$$

Donde:

- DH_m: distancia media horizontal en terreno
- DPLT: distancia plana de PTL

Sabiendo que:

$$\Delta s = (C_M \times [(DP)_{PTL}]) / R$$

Donde:

- Δs : corrección distancia horizontal
- C_m: cota media de la línea base respecto al PTL
- R: radio medio, 6,378,000 m

3. SISTEMA DE POSICIONAMIENTO GLOBAL

El sistema de posicionamiento global, GPS, es ahora parte de una red de crecimiento internacional GNSS, sistema global de navegación por satélite. Esta red abarca cualquier satélite que provee señales desde el espacio que facilitan la navegación en una escala global. Además del GPS existe otro sistema creado por la federación rusa denominado GLONASS, que es un acrónimo de Global'naya Navigatsionnaya Sputnikovaya Sistema. Hay otros sistemas como el Sistema Galileo, administrado por la Unión Europea; BDS Sistema de Navegación por Satélite BeiDou, administrado por China; IRNSS Sistema Regional de Navegación por Satélite de la India; QZSS Sistema Satelital Quasi-Zenith, administrado por Japón. Dichos sistemas a diferencia de GPS y GLONASS no son considerados por muchos como parte de la red GNSS (Van Sickle, 2015, p.14).

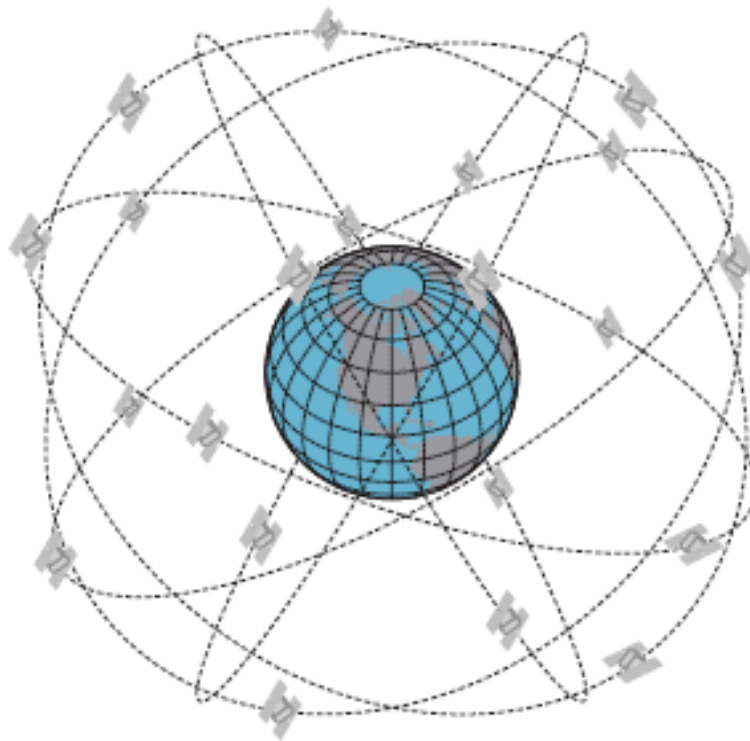
El sistema GNSS ha permitido el avance y desarrollo de tecnologías como la LiDAR. El sistema de posicionamiento global, fue desarrollado por la marina de EEUU denominado como TRANSIT, también conocido como NAVSAT (Sistema de Navegación Satelital de la Marina), cuyo fin original era conseguir información precisa para lanzamiento de misiles submarinos.

Se componía originalmente de solamente 5 satélites lanzados en la década de 1960. Ya en 1963, la fuerza aérea estadounidense mejoró la tecnología, dando origen al sistema actual (Van Sickle, 2015, p.14), aunque NAVSAT siguió mejorándose para otras aplicaciones como sistemas de estabilización, conocimientos del campo gravitacional de la Tierra, aplicaciones biomédicas

(marcapasos recargables o desfibriladores, etc.), pero al final dejó de funcionar en el año 1996.

La constelación de 24 satélites está ubicada en 6 planos (4 por órbita), ubicados de tal manera que una persona pueda recibir información en cualquier parte de la Tierra de al menos 6 satélites el 100 por ciento del tiempo. Cada uno de los satélites tienen 2 relojes atómicos, uno de cesio y otro de rubidio muy precisos y sincronizados. La estabilidad de la red de satélites depende de la frecuencia de estos relojes, por lo que deben ser corregidos diariamente con el fin acumular como máximo 1 a 10 nanosegundos por día.

Figura 16. **Constelación de satélites GPS**



Fuente: Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors*.

En general, con 4 satélites se puede calcular las coordenadas (x,y,z) en cualquier punto sobre la Tierra y en el datum WGS 84 (Diaz Villarraga y Galindo Y., 2018, p.45).

3.1. Métodos de posicionamientos

Dependiendo el tipo de levantamiento que deseamos hacer, así será el método de posicionamiento que se usan con el GPS.

Los tipos conocidos son los siguientes:

3.1.1. Método estático relativo estándar

El método estático sirve para la colocación de puntos de control de gran precisión (5 mm + 1 ppm) utilizando vértices con datos conocidos como por ejemplo estaciones CORS, para determinar un único trío de coordenadas (x,y,z) directamente o diferenciales de una antena a partir de una serie de observaciones realizadas durante un período de tiempo dado. La distancia entre las bases puede ser mayores a 20 km (Farjas Abadía, 2006, p.16).

Normalmente los tiempos de observación de este método es mínimo de media hora, una o dos (o más), según la redundancia y precisión necesarias, y en función de la configuración de la constelación local y distancia a observar.

Se utiliza en:

- Redes geodésicas
- Redes nacionales y continentales
- Redes para seguimiento de fallas o movimientos tectónicos

- Redes de gran precisión

3.1.2. **Método estático relativo rápido**

Es el método estático relativo estándar con la variante en los tiempos de observación. Mientras que en el primero se utilizan tiempos de 30 min hasta 2 horas, en este método se limita a 5 a 10 min, aunque su precisión es muy similar, de 5 mm – 10 mm + 1 ppm.

Utiliza un algoritmo para la resolución estadística de las ambigüedades que permiten la disminución de los tiempos de observación. (González Alcaraz, 2015, p.35).

Se utiliza en:

- Redes topográficas locales
- Redes de control
- Apoyo fotogramétrico

3.1.3. **Método GPS en tiempo real (RTK)**

Cuando se desea realizar mediciones en movimiento se utiliza este sistema, el cual obtiene coordenadas en tiempo real con precisión centimétrica (1 – 2 cm + 1 ppm). Este es un método diferencial o relativo. El receptor fijo o referencia está en modo estático en un punto con coordenadas conocidas, mientras el receptor móvil (*rover*) determinará las coordenadas solicitadas. Utiliza comunicaciones a través de radio, modem, GSM, GPRS, etc.

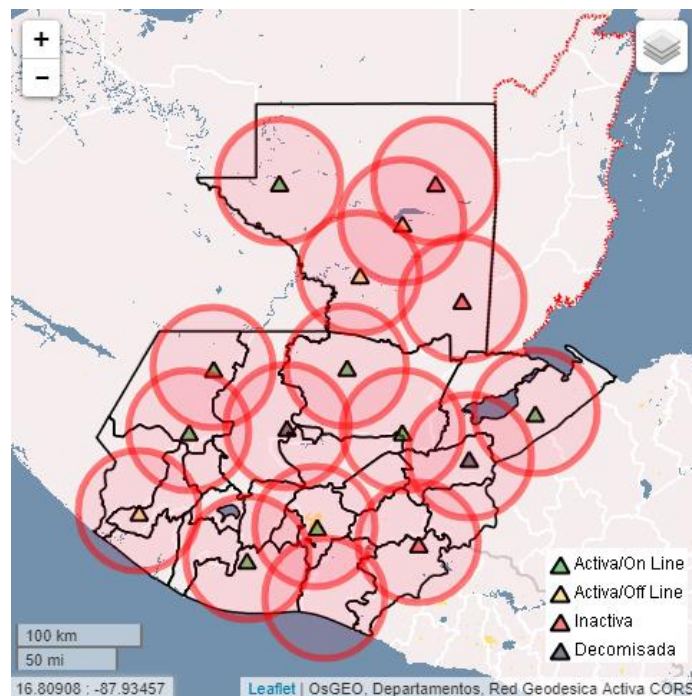
3.1.4. Método diferencial en tiempo real (RTDGPS)

Es un método con precisión métrica. Se usa donde la precisión no es tan importante, como levantamientos GIS, actualizaciones de cartografía (pequeña escala) y en navegaciones (automóvil, celular, etc.).

3.2. Estaciones de operación continua (CORS)

La red CORS es una red geodésica de estaciones de referencia de operación continua, o CORS por sus siglas en inglés (Continuously Operating Reference Station).

Figura 17. Red CORS de Guatemala



Fuente: Instituto Nacional Geográfico. (2019). *Red CORS de Guatemala*. Recuperado de <http://www.ign.gob.gt/>.

Una estación CORS se compone básicamente de un receptor GPS estático que se posiciona de manera permanente en una localidad geográfica conocida, y recolecta datos las 24 horas del día, 7 días a la semana. Estos datos son transmitidos por medio de una red de computadoras hacia un servidor central, en donde estos son almacenados para su uso posterior.

Como se mencionó anteriormente, la Red CORS ha pasado a formar parte de la Red SIRGAS de operación continua SIRGAS-CON, la cual es el sistema de referencia de América Latina y el Caribe.

4. FOTOGRAMETRÍA

La fotogrametría afirma Buill Núñez, y Rodríguez (2003) “es el conjunto de técnicas, instrumentales y matemáticas que permiten obtener coordenadas tridimensionales de un objeto a partir de la información bidimensional extraída de una o varias fotografías, mediante el uso de transformaciones derivadas de la geometría en la cual intervienen parámetros como: ángulos de giro, factores de escala, vectores de translación, alturas entre otro”. (p.56)

Es un método de medición indirecta ya que la medición no se realiza sobre el objeto directamente sino sobre imágenes apoyadas en relaciones matemáticas y la visión estereoscópica que posee el ser humano por naturaleza (Galindo y Villarraga, 2017, p.53).

Según indica Sánchez Sobrino (2006) en los años 90 aparecen los primeros restituidores digitales con el desarrollo de la informática. Se empiezan a usar cámaras digitales aerotransportadas, multiespectrales y combinación de sensores de teledetección con técnicas de fotografía digital, la cual está bien generalizada.

4.1. Fotogrametría digital

La imagen digital es un arreglo de números enteros, denominados comúnmente como píxeles, (unidad de elementos pictóricos) la cual presenta muchas ventajas ya que pueden ser manipuladas radiométricamente y geométricamente mediante software (Galindo y Villarraga, 2017, p.59).

Según lo indica Galindo y Villarraga, (2017) “el sistema de coordenadas de la imagen digital difiere del sistema cartesiano en que su origen se ubica en el primer pixel del sensor. Esta diferencia entre ambos sistemas se debe al propio carácter numérico de la imagen, lo que hace que el primer pixel sea el primer elemento” (p.59).

4.2. Productos fotogramétricos

De la fotogrametría se pueden obtener productos según el proceso y su forma final, entre los más importantes están:

4.2.1. Mapa de líneas

Es el producto por excelencia de la fotogrametría. Se tienen los tradicionales y los numéricos (Jauregui, 2012, p.9).

4.2.2. Puntos de control

Por medios fotogramétricos se pueden determinar las coordenadas de puntos sobre el terreno para densificar los puntos que ya se conocen y son obtenidos por medio de topografía (Jauregui, 2012, p.10).

4.2.3. Fotomosaico

Es un mosaico de dos o más fotografías que presentan entre ellas un área en común. Los hay controlados, semicontrolados y no controlados (Jauregui, 2012, p.10).

4.2.4. Ortofotos

Es una fotografía cuyas imágenes se encuentran en posición planimétrica. Para conseguir este producto se utiliza un proceso denominado rectificación diferencial en el cual se eliminan los efectos de inclinación y del desplazamiento por relieve, propios de las fotografías aéreas. Las ortofotos son equivalentes a mapas de líneas en lo que respecta a su precisión geométrica. (Jauregui, 2012, p.10).

Figura 18. Ortofoto del proyecto Ca-2 Occidente, km 145



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2011). *Informe técnico del proyecto Ca-2*.

- Procedimiento para la obtención de ortofotos a partir de fotografías aéreas

La Ortofoto es una de las piezas importantes en los levantamientos LiDAR ya que además de mejorar la generación de MDT ayudará en el proceso de diseño para identificar más fácilmente los obstáculos existentes (casas, líneas de transmisión eléctrica, ríos, bosques, etc.); por tal motivo, es importante conocer en una forma general como se obtienen.

- Entrada de datos

Ya que la fotografía se tomará como apoyo del levantamiento LiDAR, esta será aerotransportada.

- Orientación interna

Consiste en el cambio de coordenadas pixel, es decir de filas y columnas, a coordenadas imagen, usualmente en milímetros, referidas a un sistema de ejes coordenados cuyo origen está en el centro de proyección, por lo que se trabajan con las marcas fiduciales (marcas ubicadas en las esquinas o parte media de los bordes de la fotografía), las cuales se identifican y localizan (Galindo y Villarraga, 2017, p.61).

- Orientación externa

Para esto se utilizan puntos de apoyo, colocados por medios topográficos y de los cuales se conocen sus coordenadas. Se dejan marcas visibles las cuales sean fácil de identificar cuando se esté realizando la orientación.

Los Puntos de control se dividen en 1. puntos de control terrestre: los cuales son puntos que perteneces al terreno con coordenadas conocidas obtenidas en campo y perfectamente y los 2. puntos de enlace: son puntos identificados en las imágenes de los que no se conocen las coordenadas del terreno. Su función en el proceso consiste en introducir 2 ecuaciones por cada imagen en la que se mida frente a las 3 incógnitas de las coordenadas de terreno (Soria Molina, 2014, p.48).

- Métodos de ortorectificación digital

Básicamente son los métodos que permiten transformar una imagen cónica a ortogonal, eliminando el desplazamiento producido por la inclinación del eje de la toma y, en caso rectificarse conjuntamente con un modelo digital del terreno, se elimina también el efecto ortográfico (Soria Molina, 2014, p.66).

- Rectificación polinómica
- Rectificación proyectiva
- Rectificación diferencial

- Técnicas de remuestreo

Al realizar la rectificación la posición de los píxeles proyectados no coincide con la posición de los originales, por lo que debe de utilizarse un método de remuestreo, entre ellos están (Soria Molina, 2014, p.69):

- Vecino más próximo
- Interpolación bilineal
- Interpolación bicúbica

- Ajuste radiométrico

Para que al realizar el mosaico las ortofotos muestren una uniformidad, es importante realizar este ajuste que equilibre las diferencias de brillo y contraste. Estas diferencias dependen de factores ambientales y de luz durante la toma de la fotografía (Soria Molina, 2014, p.70).

- Análisis estadísticos e histogramas

Este proceso se realiza para verificar el nivel de radiancia de una banda ya esa ésta blanco y negro o RGB y analizar el grado de homogeneidad existente entre los pixeles que la componen.

Se hace además una valoración del histograma que permite determinar la tonalidad dominante en cada banda y su anchura está relacionada con el contraste (Soria Molina, 2014, p.71).

- Ajuste del histograma

Cada ortofoto tendrá un histograma diferente, por lo que se debe realizar un ajuste y que todas tengan el mismo. Para eso puede utilizarse una de base o tomar el promedio de las distintas ortofotos (Soria Molina B., 2014, p.71).

- Confección del ortomosaico

Dado que las ortofotos que se toman para proyectos viales son varias, es necesario realizar un mosaico. Para ello es necesario tener ya las fotografías georeferenciadas y en la misma escala.

Dentro de los métodos utilizados para realizar mosaicos están:

- Mezclando el valor de los pixeles coincidentes
- Dándole mayor peso al pixel más claro
- Dándole mayor peso al pixel más oscuro
- Según la proximidad al centro de la ortofoto
- Según la distancia a los límites de la ortofoto
- Según la distancia al centro de la ortofoto y a sus límites (Soria Molina, 2014, p.73).

4.3. Tolerancias

El volumen 2 de los procedimientos de estudios viales del manual de carreteras del Ministerio de Transporte de Chile recomienda las siguientes tolerancias:

Tabla VII. **Tolerancia en restituciones aerofotogramétricas**

Escala del plano	Puntos Estereoscópicos				Verificación en Campo ¹		Aplicación en proyectos viales, según el nivel de Estudio
	Etapa en campo		Etapa en gabinete		Altimetría	Planimetría	
	Altimetría	Planimetría	Altimetría	Planimetría			
1:500 Curvas a 0.5 m	0.06	0.085	0.083	0.17	0.25	0.25	Anteproyecto
1:1,000 Curvas a 1.0 m	0.11	0.17	0.17	0.33	0.50	0.50	Anteproyecto
1:2,000 Curvas a 2.0 m	0.22 – 0.25	0.34	0.34	0.67	1.0	1.0	Anteproyecto/ Factibilidad
1:5,000 Curvas a 5.0 m	0.60	0.85	0.85	1.70	2.5	2.5	Estudio preliminar/ Pre factibilidad / Perfil
1:10,000 Curvas a 10.0 m	1.20	1.70	1.70	3.40	5.0	5.0	Idea / Perfil

Fuente: Dirección de Vialidad (2018). *Procedimientos de estudios viales.*

5. DIFERENCIAS ENTRE MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT), MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN (MDE) Y MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (MDS)

Este es uno de los conceptos que debe quedar claros para trabajar con un modelo digital. Aunque el concepto es bastante sencillo, es importante saber de dónde se obtienen y cuál es su función.

Los 3 modelos más conocidos son:

- Modelo digital de superficie (MDS)
- Modelo digital de elevación (MDE)
- Modelo digital de terreno (MDT)

5.1. Modelo digital de superficie

Como lo describe GIS Geography, (2018) en un sistema LiDAR, los pulsos de luz viajan a la tierra. Cuando la luz alcanza el objetivo retorna al sensor, dando un rango (una variable en la distancia) a la Tierra. De allí el nombre de LiDAR.

Al final el LiDAR genera una gran cantidad de puntos o nube de puntos. Esta altura puede provenir de la parte alta de los edificios, copa de los árboles, líneas eléctricas de transmisión, etc.

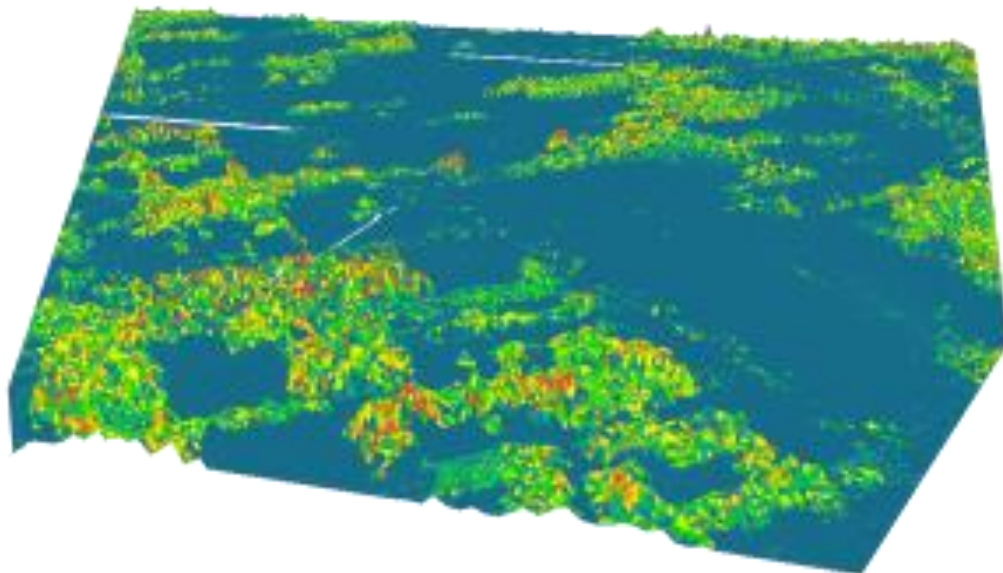
Esta nube de puntos puede genera un modelo digital de la superficie de la Tierra, incluyendo todo lo que encontró a su paso. El MDS es de mucha utilidad

en diseño de telecomunicación, planificación urbana, aviación, agronomía, manejo de bosques, etc.

Como puede verse en las s siguientes, los MDS muestran imágenes sorprendentes de estructuras existentes, por lo que son de gran utilidad en presentaciones.

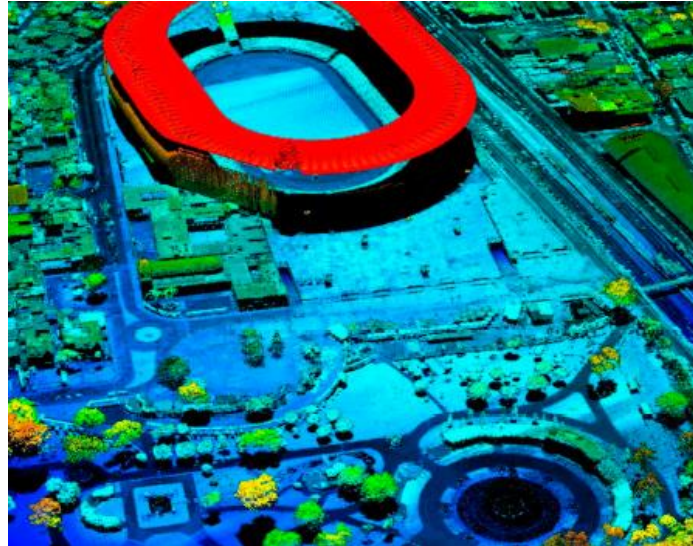
Toda esta información que está sobre la superficie del terreno puede filtrarse y generar modelos específicos.

Figura 19. **Modelo digital de superficie**



Fuente: GIS Geography. (2019). *DEM, DSM & DTM Differences, a look at elevation models in GIS*. <http://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>.

Figura 20. **Modelo digital de superficie, estructuras existentes**



Fuente: GIS Geography. (2019). *DEM, DSM & DTM Differences, a look at elevation models in GIS*. Recuperado de <http://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>.

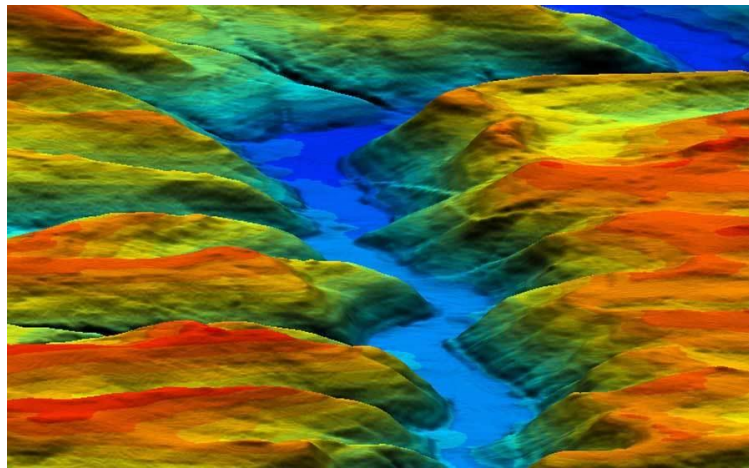
5.2. Modelo digital de elevación (MDE)

Los modelos digitales de elevación (MDE) son un tipo de capa GIS ráster. En este modelo, cada celda de la capa GIS ráster tiene un valor correspondiente a su elevación (valores z a intervalos regularmente espaciados). Los archivos de datos contienen la elevación del terreno sobre un área específica, generalmente en un intervalo de cuadrícula fijo sobre la tierra desnuda.

Los intervalos entre cada uno de los puntos de la grilla siempre estarán referenciados a algunos sistemas de coordenadas geográficas (latitud y longitud o sistemas de coordenadas UTM (Universal Transverse Mercator) (este y norte). Para obtener una información más detallada en el archivo de datos MDE, es necesario que los puntos de la cuadrícula estén más cerca. Los detalles de los

picos y valles en el terreno se modelarán mejor con un espaciado de cuadrícula pequeño que cuando los intervalos de la cuadrícula son muy grandes (Spatial Media and Services Enterprises, 2018, p.1).

Figura 21. **MDE para usos hidrológicos**



Fuente: GIS Geography. (2019). *DEM, DSM & DTM Differences, a look at elevation models in GIS*. Recuperado de <http://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>.

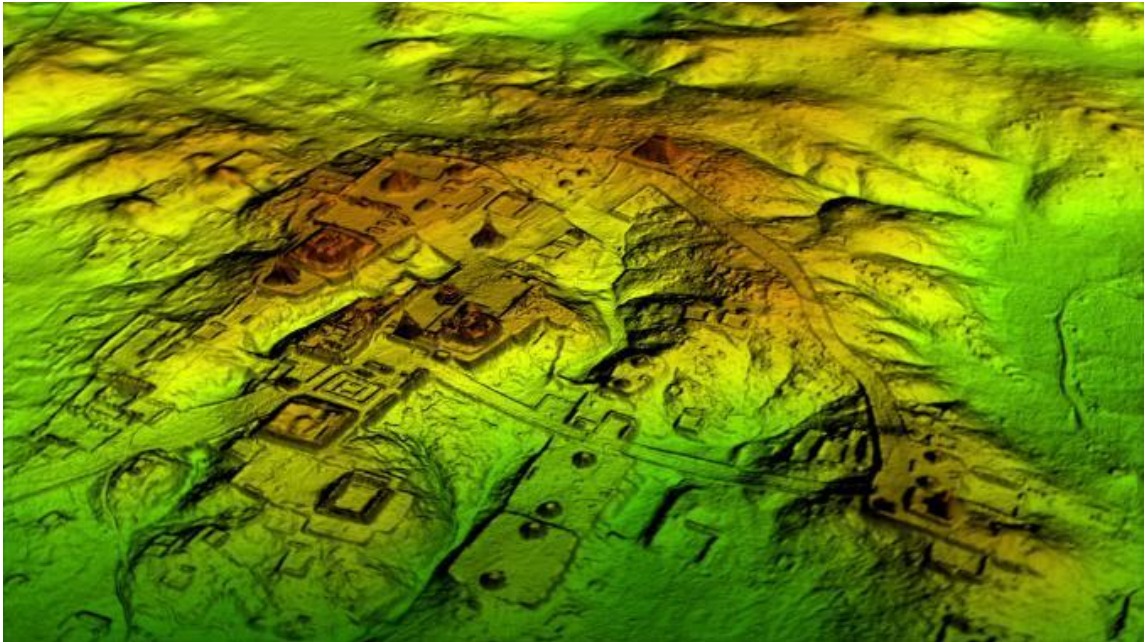
Es útil en hidrología, suelos y planificación del uso de éste. Los hidrólogos utilizan MDE para definir cuencas hidráulicas y para calcular la acumulación del flujo y su dirección (GIS Geography, 2018, p.1).

Sirve además a los geólogos para definir zonas sin estabilidad y con riesgo de desprendimientos (aludes). Estos modelos ayudan a mapear los suelos.

En Guatemala se han realizado estudios en la zona boscosa en el departamento de Petén, utilizando LiDAR para generar MDE cuyo propósito es poder encontrar ciudades perdidas de la cultura maya. (National Geographic,

2018, p.1). De los datos filtrados, al quitar la vegetación se ha descubierto estructuras nuevas que puede observarse en la figura siguiente.

Figura 22. **MDE en una ciudad Maya, Petén, Guatemala**



Fuente: National Geographic. (2019). *Laser scans reveal Maya megalopolis below guatemalan jungle*. Recuperado de <http://news.nationalgeographic.com/2018/02/maya-laser-lidar-guatemala-pacunam/>.

5.3. Modelo digital de terreno (MDT)

En algunos países al modelo digital de terreno también se le denomina modelo digital de elevación. Esto es porque el MDT muchas veces solo representa la elevación del terreno con un datum vertical. En EE.UU. por ejemplo, el MDE es ligeramente diferente a un MDT.

Un concepto técnico para definirlo sería, un MDT es un conjunto de datos vectoriales compuestos por puntos regularmente espaciados y características naturales tales como crestas y líneas de corte. Un MDT aumenta un MDE al incluir características lineales del terreno de tierra desnuda (GIS Geography, 2018, p.1).

Los MDT se crean a partir de datos obtenidos por topografía, fotogrametría estéreo, LiDAR y su función es la de representar la superficie de la tierra sin incluir ninguna estructura creada por el ser humano como casas, edificios, etc., eliminan vegetación y cuerpos hídricos.

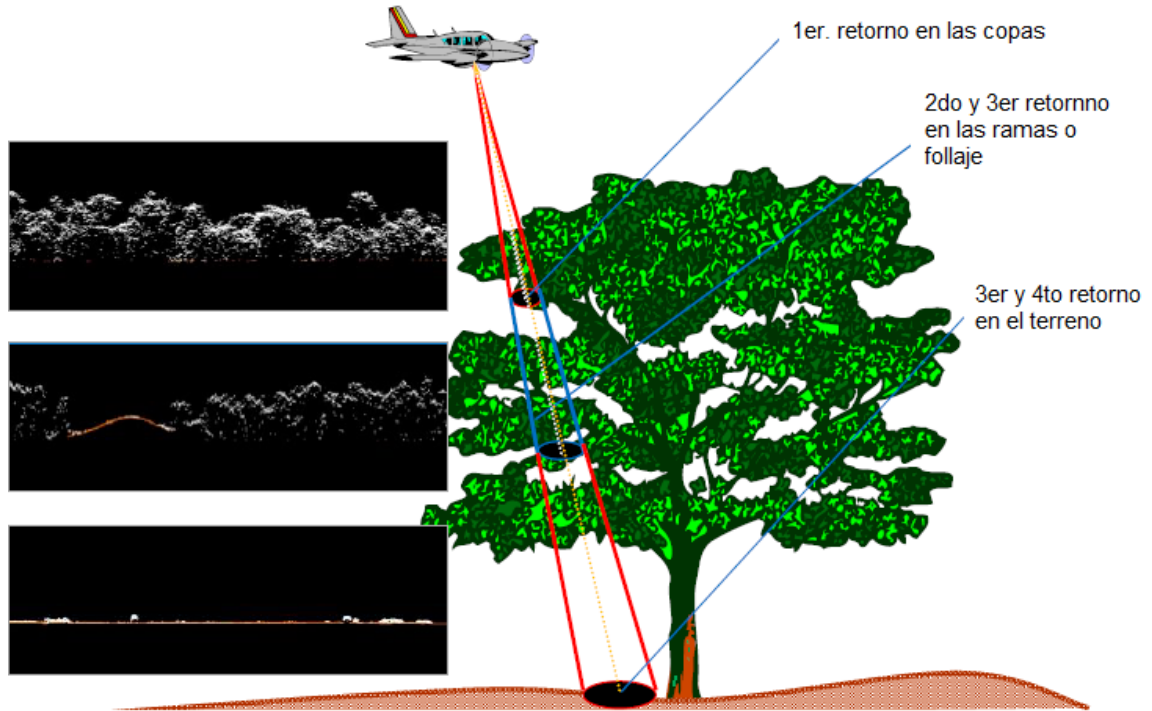
En el caso de los MDT obtenidos a partir de la metodología LiDAR son necesarias las siguientes etapas (Galindo y Villarraga, 2017, p.65):

- Generación del MDE
- Filtrado de los datos que pertenecen a la superficie
- Visualización del modelo en 3D para evitar errores
- Análisis y aplicación del MDT

Como se observa en la figura 23, para poder obtener los datos de terreno, se deben filtrar los primeros retornos obtenidos ya que si hay vegetación, estructuras, etc.; estos pertenecerían a aquellos.

Quizás esto haga de que el postproceso sea un punto determinante para la obtención de modelos de terreno correctos.

Figura 23. Datos obtenidos mediante metodología LiDAR



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2011). *Presentación información geoespacial para el desarrollo del proyecto.*

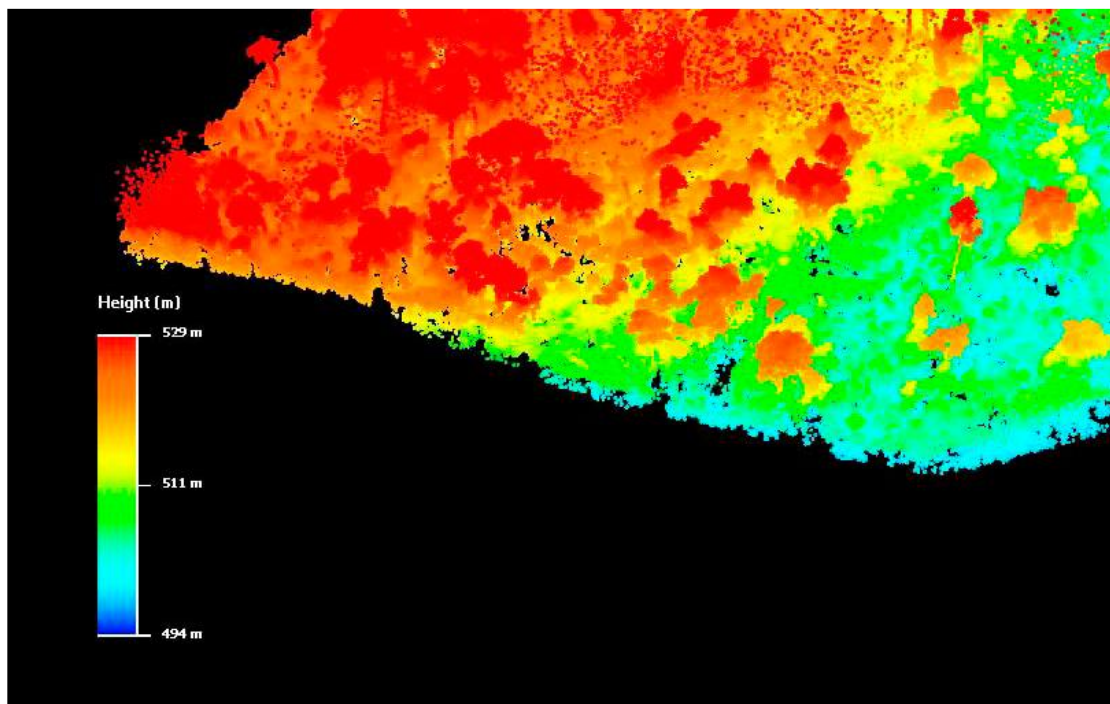
Un ejemplo claro del filtrado se muestra en las siguientes imágenes, donde se obtuvo los datos de la vegetación de un área determinada y luego se eliminaron mediante procesos de filtrado para crear el MDT.

De esta información se crean los datos que servirán para la generación de las curvas de nivel que servirán para realizar los estudios de ingeniería posteriores.

A través de este filtrado se puede simplificar la codificación del terreno. Dentro de los métodos más utilizados para representación están los siguientes (Galindo y Villarraga, 2017, p.65):

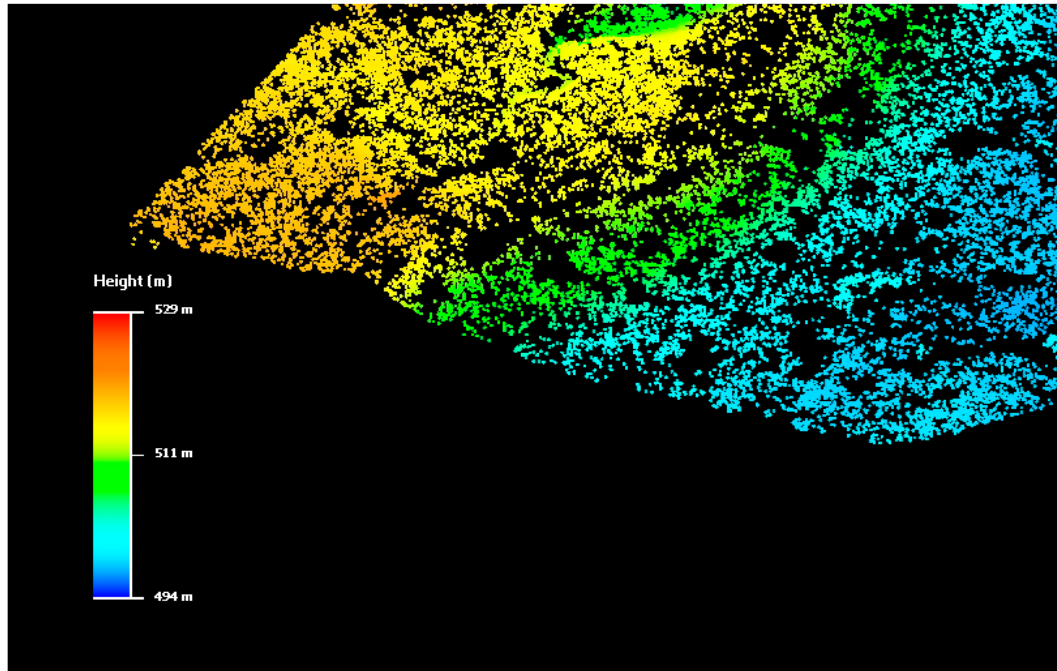
- Red irregular de triángulos (TIN)
- Curvas de nivel
- Pendientes

Figura 24. **MDE incluyendo vegetación**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2011). Presentación información geoespacial para el desarrollo del proyecto.

Figura 25. **MDT al filtrar la vegetación**

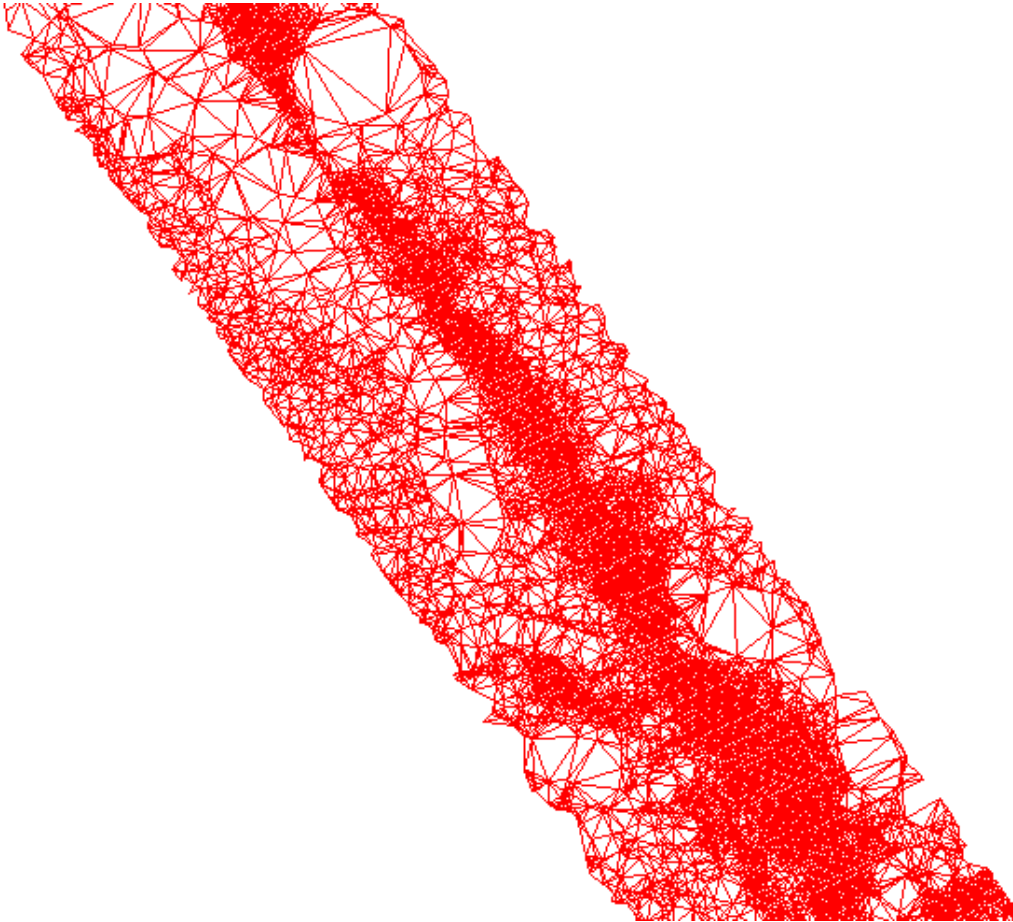


Fuente: Horizons South America S.A.C. (2011). Presentación información geoespacial para el desarrollo del proyecto.

5.3.1. **Red irregular de triángulos (TIN)**

A partir del filtrado de datos obtenido del levantamiento obtenido mediante la tecnología LiDAR se traza un conjunto de triángulos que se forman por 3 puntos con alturas conocidas. Esta red se adapta bien a las irregularidades del terreno. (Galindo y Villarraga, 2017, p.65).

Figura 26. **Modelo TIN.**



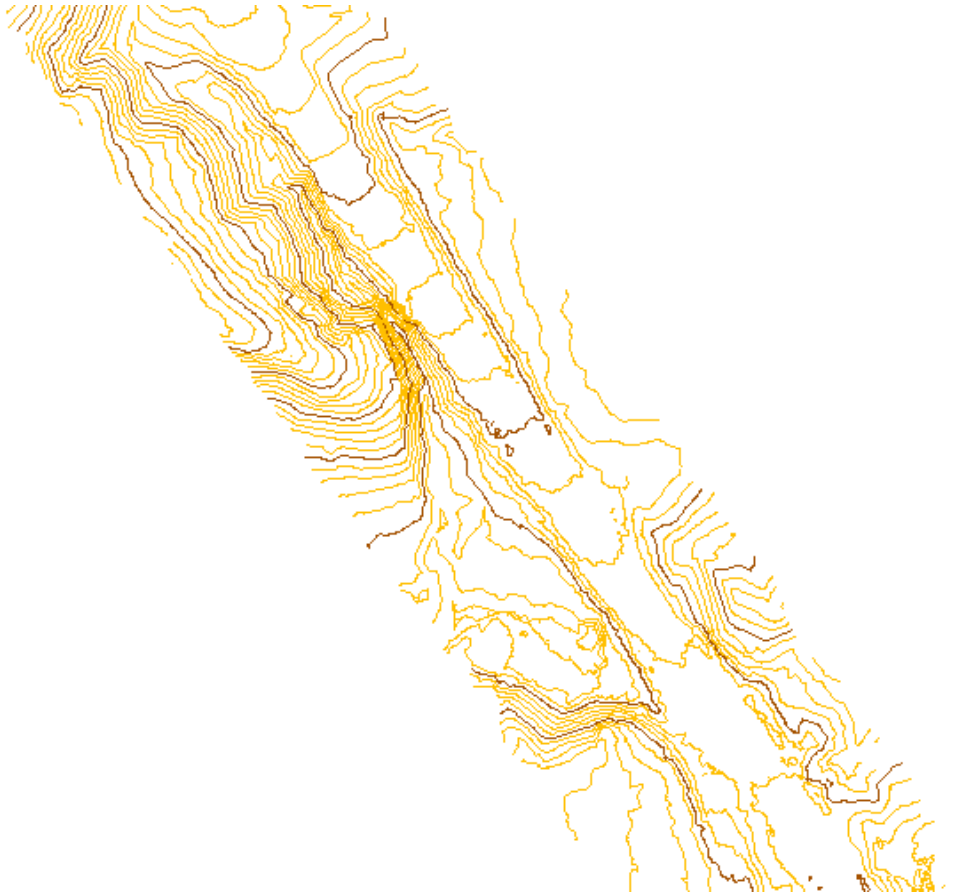
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

5.3.2. **Curvas de nivel**

Son representaciones tipo vectorial compuesta por un conjunto de líneas a las cuales se asocia un valor de altura concreto (Galindo y Villarraga, 2017, p.66).

Normalmente las curvas de nivel se pueden generar a partir de otras curvas de nivel, de archivos DEM, o también de la TIN (descrita anteriormente).

Figura 27. **Curvas de nivel**



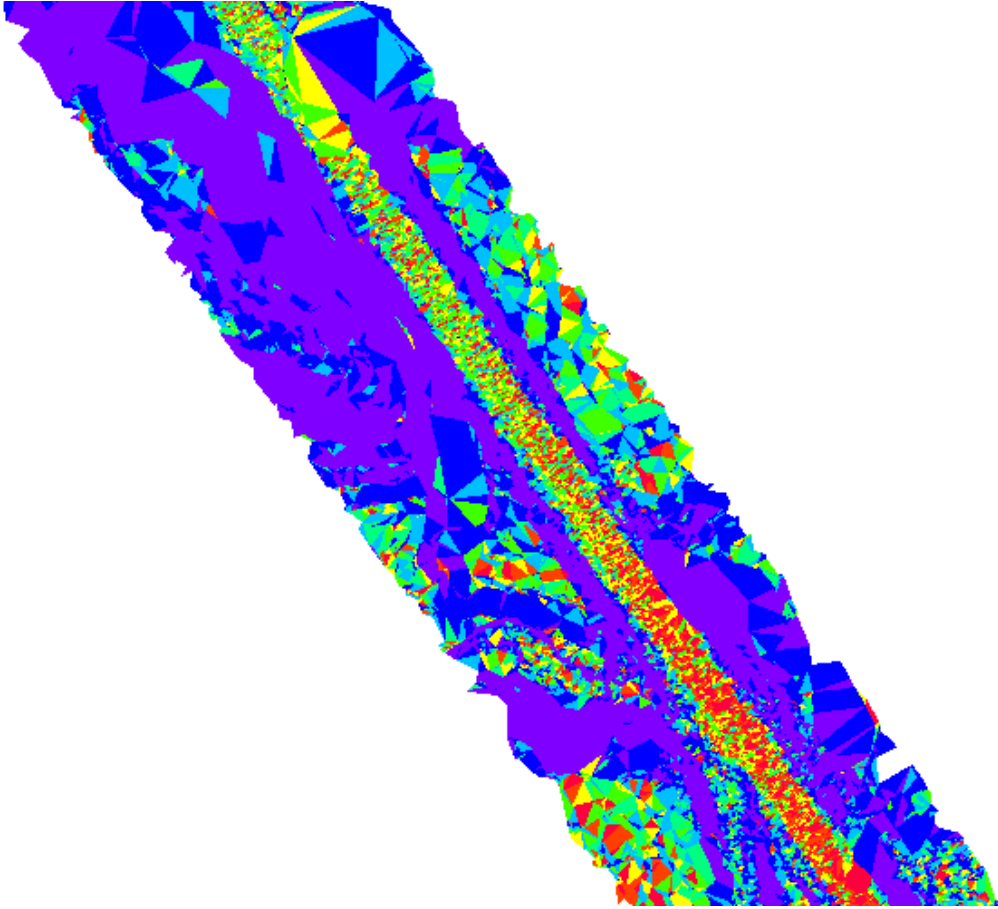
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

5.3.3. **Pendientes**

Una pendiente se define como el ángulo existente entre el vector normal a la superficie en ese punto y la vertical (Galindo y Villarraga, 2017, p.66).

Este sirve cuando se desea obtener una perspectiva de las alturas en terrenos montañosos. Es de gran utilidad cuando se está buscando una selección de ruta. Estos modelos son para estudios preliminares.

Figura 28. **Modelo de pendientes**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

6. DESARROLLO DE LA INVESTIGACIÓN

6.1. Generalidades

Uno de los proyectos adecuados para la aplicación de la tecnología LiDAR consistió en la obtención de datos de terreno para el diseño de ingeniería de detalle de la ampliación de 2 a 4 carriles de la ruta CA-2 Occidente, una de las carreteras más importantes del país. Esta ruta, además de la CA-1 Occidente, une la parte norte de América con el resto de Centroamérica.

El TDPA de dicha ruta es de aproximadamente 15 mil vehículos por día, muchos de los cuales son de transporte pesado. Por tal motivo, la Dirección General de Caminos decidió aumentar la capacidad de la ruta con 2 carriles más a los existentes, lo cual permitirá elevar la categoría de la ruta de una vía principal a una autopista, según las normativas de diseño creadas y avaladas para Centroamérica, por la SIECA.

Para realizar un estudio para realizar el diseño del mejoramiento y ampliación de la ruta, debido a que es importante aprovechar la ruta existente, realizando las mejoras al alineamiento horizontal y vertical, para aumentar la velocidad de diseño de 60-80 a 90 kph. Dicha ampliación debería de tomar en cuenta la disponibilidad de ampliar hacia la derecha o izquierda dado la ocupación e invasión al derecho de vía de la ruta.

Siempre que se realiza una ampliación y mejoramiento, los diseños deben partir de un modelo digital. Normalmente, se mandan cuadrillas de topografía, las cuales crean mucha expectación en los pobladores, lo que algunas veces

dificultan para dar permisos de toma de datos. Estos datos tomados por las cuadrillas de topografía son muy limitados, ya que no pueden tomarse más que las franjas permitidas sin traspasar los límites de las propiedades.

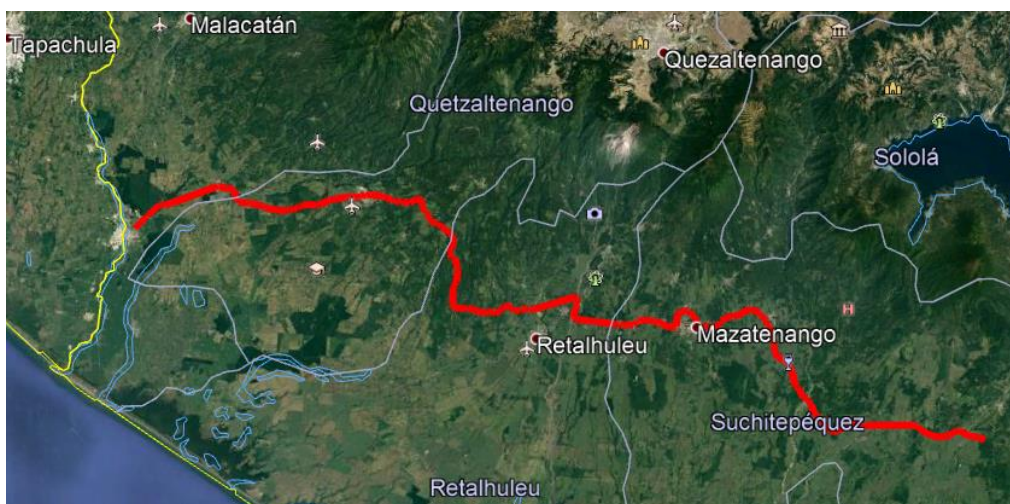
Esto es una de las ventajas que tiene el uso de LiDAR, ya que se tomaron los datos sin interferir las actividades de las personas, tránsito, etc.; y sin crear demasiada expectación en la población.

Otra de las ventajas del LiDAR es innecesario limitar su uso de día, también, puede realizarse de noche.

6.2. Tramo analizado

El estudio del LiDAR tuvo lugar de la aldea Cocal, Suchitepéquez, km 110, a Tecún Umán, San Marcos, km 250, sobre la ruta CA-2 Occidente.

Figura 29. **Tramo de la carretera CA-2, analizado con LiDAR**



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

Dicho estudio se realizó en una franja promedio de 400 m, 200 a cada lado del eje existen, la cual permite suficientes datos para poder realizar diseños de ejes preliminares para cambios de línea considerando: orografía, ríos, quebradas, cultivos, líneas de transmisión, etc.

En la siguiente ortofoto se obtuvieron datos para la generación del MDT. Como se observa, la cantidad de información en una franja de 400 m permite obtener datos de las condiciones reales del terreno topográfico, que permita al diseñador que tenga más criterios. Además de los datos de MDT, se puede contar también con datos del uso del suelo, y realizar las adaptaciones o mejoras a los estudios aprobados del EIA.

Figura 30. **Ortofoto de 400 m de búfer**

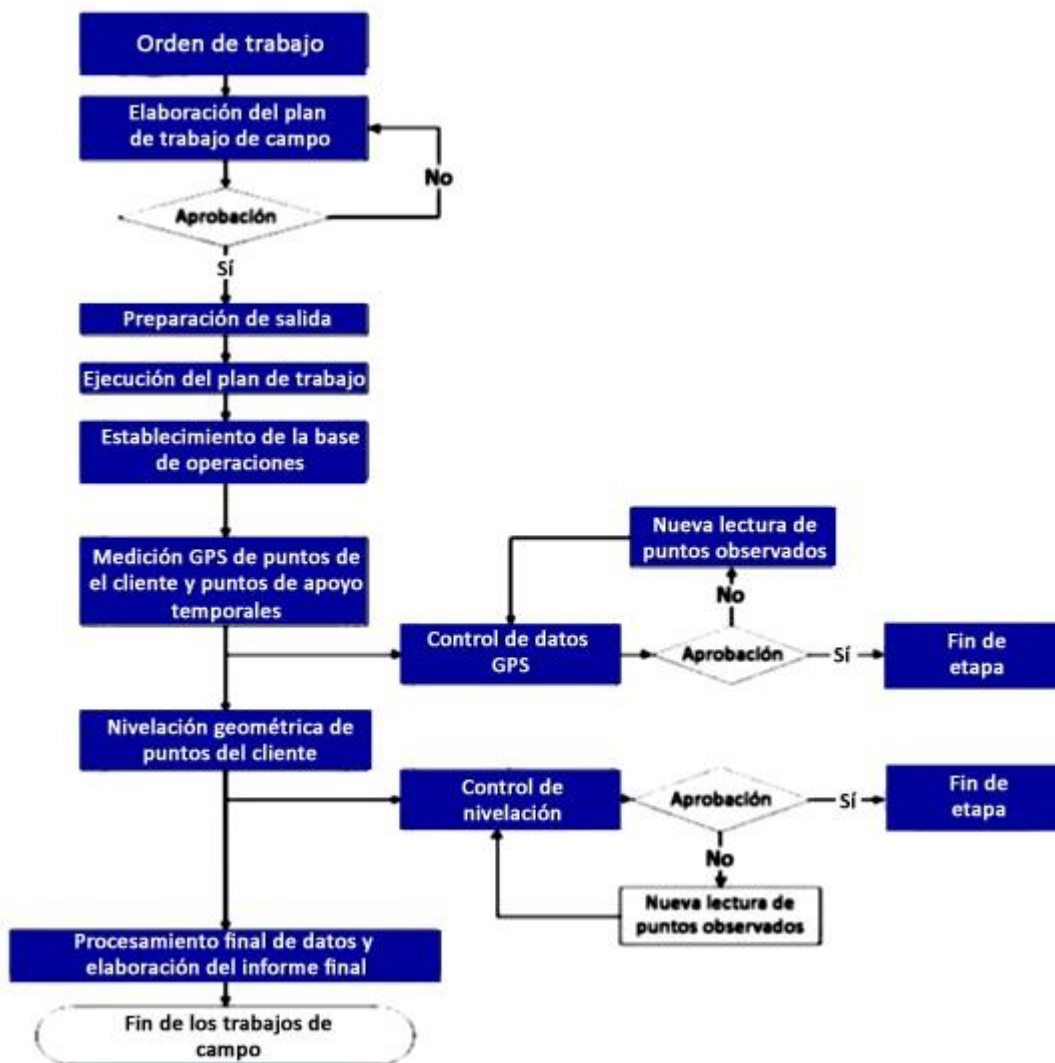


Fuente: Horizons South America S.A.C. (2011). *Levantamiento topográfico láser aerotransportado y fotogramétrico digital del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.3. Metodología de trabajo

Para realizar el levantamiento con LiDAR se utilizó el siguiente flujo de trabajo:

Figura 31. Flujo de trabajo implementado



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.4. Actividades previstas a los trabajos de campo

Las actividades previstas son las siguientes:

6.4.1. Elaboración del plan de trabajo

Según la figura anterior, al momento de tener la orden de trabajo o las indicaciones para la ejecución de los trabajos de campo, se asignó un técnico responsable, el cual se encarga de elaborar el plan de trabajo de campo, con la siguiente información:

- Orden de trabajo
- Área para realizar el estudio
- Ubicación referencial de ubicación de puntos de red
- Solicitud de puntos de línea base topográfica (LBT)
- Información histórica de salidas de campo

Con la información histórica, el técnico responsable realizó un análisis de la zona del proyecto, ubicándose y documentándose sobre las condiciones y características de la misma; analizó los requerimientos de logística y de personal necesario para los trabajos solicitados; así mismo, desarrolló un cronograma preliminar de labores, teniendo en consideración las condiciones climatológicas y de acceso a la zona de trabajo.

Una vez elaborado el plan de trabajo de campo, el mismo es revisado y aprobado en primera instancia por el jefe del departamento de geodesia y en segunda instancia por la gerencia de proyectos. De ser observado, es devuelto para la subsanación de las observaciones formuladas; y en el caso de ser

aprobado, el responsable técnico queda pendiente de la orden de proceder para pasar a la siguiente etapa.

6.4.2. Coordinación de recursos

Aprobado el plan de trabajo de campo se realiza la coordinación con el área de logística para la asignación, revisión y preparación de los equipos y materiales a ser empleados en el proyecto.

Para el presente proyecto se realizaron las siguientes tareas:

- Recepción, asignación y comprobación de cuatro (04) equipos gps geodésicos marca Topcon modelo GR5/GNSS con sus respectivos accesorios
- Recepción, asignación y comprobación del estado de cuatro (04) niveles electrónicos marca Topcon con accesorios
- Solicitud de presupuesto operativo
- Solicitud, asignación y revisión de los equipos de protección personal.
- Coordinación con el mandante para el apoyo de las movilidades requeridas para el proyecto

6.4.3. Asignación y revisión de recursos

Con la aprobación del plan de trabajo de campo, se procede a la asignación del personal para las labores encomendadas. La selección del personal se realiza de acuerdo a los requerimientos físicos de la zona y a los establecidos en las normas de internacionales.

Para el presente Proyecto se realizaron las siguientes tareas:

- Designación del personal de acuerdo a los requisitos establecidos
- Verificación de documentos al día: vacunas, exámenes médicos, entre otros solicitados
- Instrucción al personal sobre el trabajo a realizar
- Instrucción sobre la disposición del tiempo, que incluyó las directrices sobre el traslado, la alimentación y horas de descanso
- Instrucción sobre lectura, guardado, descarga y revisión de la información
- Asignación de las tareas y actividades a realizar antes, durante y después de ejecutados los trabajos
- Terminadas estas actividades la brigada queda expedita para la ejecución de los trabajos de campo.

6.5. Ejecución de trabajos de campo

Los equipos fueron configurados según el sistema de referencia WGS84, empleando los siguientes parámetros:

- Máscara de elevación de 10 grados con respecto al horizonte
- Intervalo de toma de data de 0.5 s
- PDOP menor o igual a cuatro (04)
- SVS mayor o igual a cuatro (04) satélites

Se definieron como Indicaciones Técnicas para las sesiones de lectura GPS lo siguiente:

- Sesión GPS simultánea.
- Método de toma de data estático diferencial a postproceso con ajuste por los puntos solicitados.

- Sesiones de medición no menores a seis (06) horas continuas para los puntos red solicitados.
- Sesiones de medición no menores a dos (02) hora continua para los puntos de líneas bases topográficas (LBT) solicitados.
- Verificación antes del inicio de sesión de lectura, de la disponibilidad de satélites y de su adecuada geometría, con PDOP menor a 4.

Los puntos monumentados tienen las siguientes características físicas:

- Hitos de concreto armado
- Ubicados en zonas estratégicas y accesibles del proyecto, monumentados
- Libre de obstrucciones y alejado de fuentes eléctricas

Las especificaciones técnicas que se usaron para realizar la nivelación geométrica fueron las siguientes:

- Nivelación geométrica recíproca cerrada compuesta de 3er. Orden.
- Lecturas directas y lecturas inversas.
- Cálculo de error de cierre al finalizar cada circuito de 500 m aproximadamente.

6.6. Inicio de operaciones

Para la realización de los trabajos de campo se eligió como centro de operaciones el hotel Sibilia, ubicado en el municipio de Retalhuleu. Desde este punto se coordinó el despliegue y repliegue diario de la brigada de levantamiento a cargo, realizándose los enlaces y reportes al final del día con los responsables.

Para el desarrollo de los trabajos se contó con seis (06) vehículos para el traslado del personal.

6.7. Control horizontal

En esta etapa se realizaron los trabajos de campo referidos al control posicional empleando el sistema de posicionamiento global o GPS, con la finalidad de obtener el marco geodésico de referencia con la precisión requerida para el proyecto; para ello se realiza el control horizontal de:

- Medición con gps diferencial a siete (07) puntos red solicitados por el proyecto, enlazados a la red activa de Guatemala: Coatepeque (Coat), Cotzumalguapa (Cotz), Guatemala (Guat), Huehuetenango (Hueh) ubicado en la capital de Guatemala y en las ciudades del mismo nombre.
- Establecimiento y medición con GPS diferencial a treinta y seis (36) puntos de línea de base topográfica (LBT).
- Nivelación geométrica o diferencial a los cuarenta y tres (43) puntos solicitados (red LBT).

Para la medición de los puntos se empleó como sistema de coordenadas el WGS-84 y como método de medición se utilizó el estático diferencial a post-proceso, con ajuste por s para los puntos.

Figura 32. Ubicación de puntos de red y LTB, en el proyecto Ca-2



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.7.1. Datum horizontal

Como datum horizontal del proyecto se empleó la red SIRGAS en las que se incluyen las estaciones de la red geodésica activa (RGA) de Guatemala (GUAT), Coatepeque (COAT), Cotzumalguapa (COTZ), Huehuetenango (HUEH), ubicadas en la capital de Guatemala y en las localidades del mismo nombre cuya recolección de data GPS es administrada por el Instituto Geográfico Nacional de Guatemala (IGN); lugar donde se adquiere la misma para el proceso realizado.

De esta manera se dio origen a los puntos red y puntos LBT. Las cuales fueron enlazadas y medidas con equipo GPS de manera simultánea.

Figura 33. **Posicionamiento GPS en el punto red OC01**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*


Figura 34. **Esquema de la antena de la estación CORS**




Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 35. Formulario de estaciones permanentes del IGN

FORMULARIO DE ESTACIONES PERMANENTES



INSTITUTO GEOGRÁFICO NACIONAL
INGENIERO ALFREDO OBOLS GÓMEZ



FORMULARIO DE INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN CORS

0 FORMULARIO

Preparado por:	Instituto Geográfico Nacional - División de Geodesia
Creado:	Abril de 2013
Actualizado:	

1 INFORMACIÓN DE LA ESTACIÓN GPS

Nombre de la estación:	GUATEMALA
Código de identificación:	GUAT
Número de punto IERS	#09015001
Inscripción del monumento:	No tiene
Institución a cargo del mantenimiento:	Instituto Geográfico Nacional
Responsable del mantenimiento:	Instituto Geográfico Nacional
E-mail	
Institución propietaria del instrumento	Instituto Geográfico Nacional
Orden de la Estación:	
Información adicional:	Esta estación forma parte de la red activa de Control Geodésico y del futuro marco de referencia oficial. Estación Certificada por la NOAA.

2 INFORMACIÓN SOBRE LA LOCALIZACIÓN

Departamento:	Guatemala
Municipio:	Guatemala
Localidad:	Instalaciones del Instituto Geográfico Nacional

3 COORDENADAS DE LA ESTACIÓN

A Coordenadas Geodésicas

A - 1 Sistema de Referencia Utilizado

IGS 08

A - 2 Latitud (N)

°	'	"
14	55	25.45575

A - 3 Longitud (W)

°	'	"
90	51	12.65871

A - 4 Altura Elipsoidal

metros
1519.8539

B Coordenadas Cartesianas

X (m)	Y (m)	Z (m)
-56063.5405	-6174978.6443	1596665.2895

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 36. **Formulario de estaciones permanentes del IGN**

C Coordenadas UTM

Norte (m)	Este (m)	Zona
1,614,460.8356	767,172.9248	15 Norte

D Coordenadas GTM

Norte (m)	Este (m)	Zona
1,613,546.5371	497,825.7175	15.5 Norte

4 CROQUIS DE LA ESTACIÓN



5 INFORMACIÓN SOBRE EL EQUIPO GPS

A Receptor

Tipo:	LEICA GRX1200PRO
No. de Serie:	355606
Versión de Firmware:	3.2/IME3.019
Fecha de instalación:	18/09/2008

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.7.2. Control horizontal de los puntos solicitados

En esta etapa se realizaron los trabajos de campo referidos al control horizontal de posición de los siete (07) puntos red y los treinta y seis (36) puntos LBT, Los cuales servirán como puntos de partida para futuros trabajos de topografía local; así mismo, permitirá apoyar los trabajos complementarios para los ajustes de los productos cartográficos solicitados.

Tabla VIII. **Coordenadas de las estaciones de la red geodésica de Guatemala**

NOMBRE	COORDENADAS GEOGRAFICAS						HAE (m)	UTM ZONA 15N		ZONA GTM LOCAL	
	LATITUD			LONGITUD				ESTE	NORTE	ESTE	NORTE
	°	'	"	°	'	"		(m)	(m)	(m)	(m)
Coatepeque	14	42	6.7036	91	53	4.2540	428.153	620094.166	1625647.769	350907.520	1626133.480
Cotzumalguá	14	20	4.7037	91	3	29.3779	304.453	709429.171	1585615.240	439799.170	1585126.007
GUAT	14	35	25.4558	90	31	12.6587	1519.85	767172.877	1614480.835	497825.669	1613346.537
Huehuetena	15	19	5.3127	91	30	9.6932	1878.18	660747.115	1694069.422	392337.800	1694102.179

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Para el presente proyecto se procedió a la medición con GPS diferencial a los cuarenta y tres (43) puntos, los cuales fueron enlazados a las cuatro estaciones de la red geodésica activa de Guatemala.

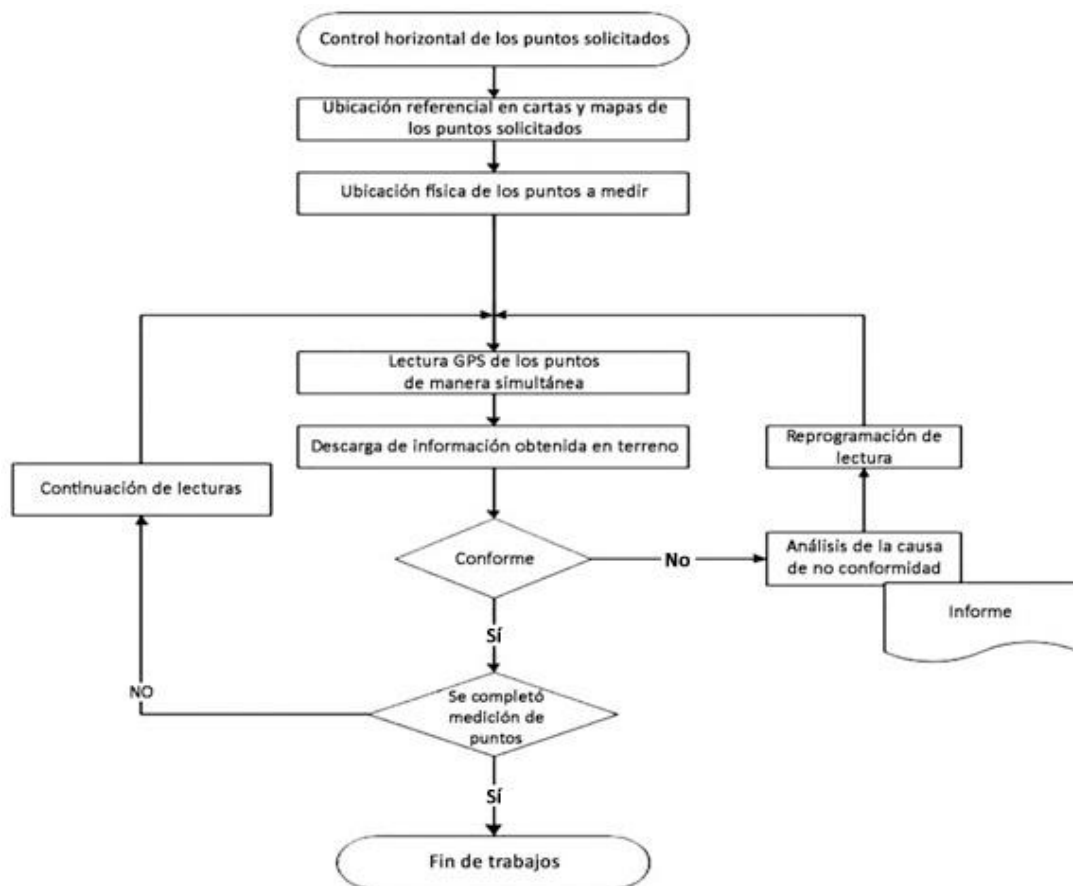
Los trabajos de esta etapa se realizaron siguiendo la figura 37.

Las mediciones GPS de los puntos se realizaron según lo indicado en el plan de trabajo. Una vez ubicados, se procedió a obtener una ubicación referencial con GPS navegador y la toma de las fotografías de la zona para la

realización de las fichas descriptivas del punto medido. Las sesiones de medición de los puntos tuvieron los parámetros siguientes:

- 1 segundo de intervalo de toma de data
- 10° de elevación de máscara
- PDOP menor a 4

Figura 37. **Diagrama de trabajo y control horizontal de los puntos solicitados**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Las mediciones GPS de los puntos se realizaron según lo indicado en el plan de trabajo. Una vez ubicados, se procedió a obtener una ubicación referencial con GPS navegador y la toma de las fotografías de la zona para la realización de las fichas descriptivas del punto medido.

Figura 38. Postproceso de los puntos de red



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Las sesiones de medición de los puntos tuvieron los parámetros siguientes:

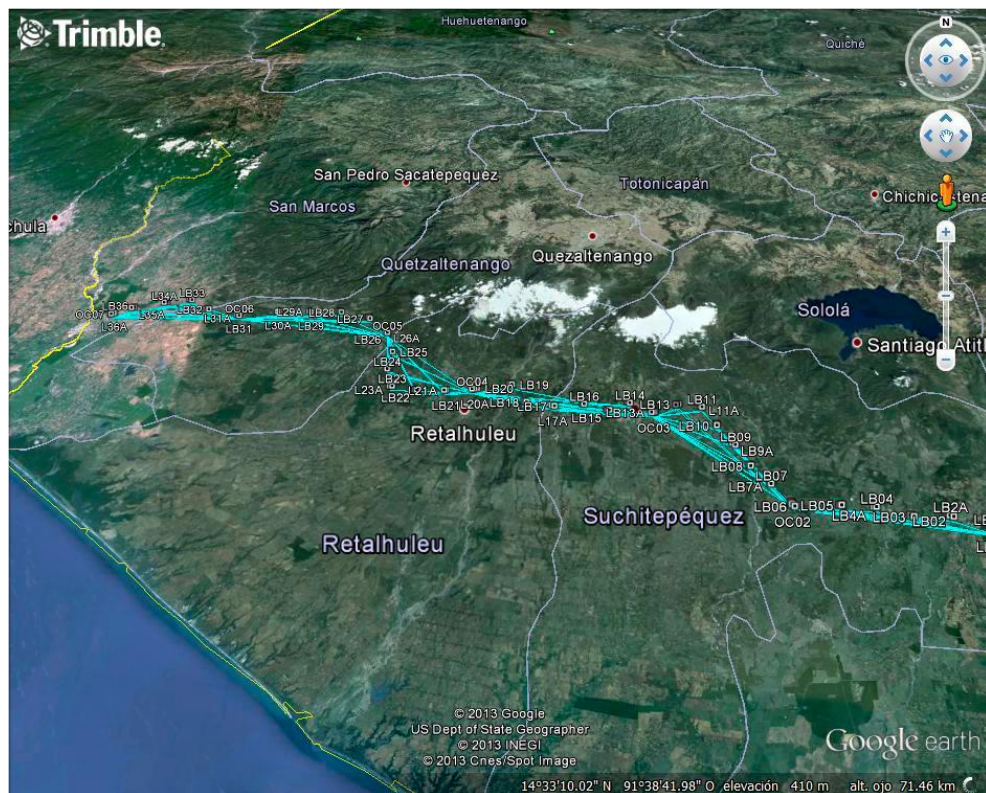
- 1 segundo de intervalo de toma de data

- 10° de elevación de máscara
- PDOP menor a 4

Los equipos utilizados fueron GPS geodésicos de doble frecuencia y antenas *multipath* marca Trimble, modelo 5700 y R7.

Se revisaron los receptores cada 5 minutos por control de calidad.

Figura 39. Postproceso de puntos, líneas de bases topográficas (LBT)



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.8. Control vertical

La fase de control vertical tiene por finalidad llevar el valor altimétrico desde un punto de cota conocida hacia los puntos LBT; se realiza para ello una nivelación geométrica de 3er. orden partiendo de un punto BM C90A de 1er. orden del Instituto Geográfico Nacional de Guatemala.

6.8.1. Datum vertical

Como punto de partida vertical se ha utilizado el valor altitudinal del BM-C90A (227.7091 msnm) de 1960, ubicado en la zona del proyecto, a partir del cual se dio valor altimétrico con cota referida al nivel medio de bajamares de Sicigias ordinarias (NMBSO) a los otros puntos mediante una nivelación geométrica. Se hizo además el reconocimiento de campo identificando puntos *bench mark* en toda la línea de la vía (C89A, C86A, C82B, C79A, C73A, C70A, C38A, C31A, C21A, C10A, C5A) Los cuales fueron ocupados en la nivelación geométrica.

La nivelación está compuesta por un circuito de 1 km y un avance de 500 m tomando en cuenta como datum vertical el BM del IGN, de no ser viable se utilizará un datum empleando el modelo geoidal EGM 96 sobre la red geodésica básica.

6.8.2. Nivelación geométrica

El objetivo principal de la nivelación geométrica es el de establecer un sistema de control vertical de precisión para todos los puntos LBT, para lo cual se procede a trasladar el valor de cota desde un punto conocido (BM C90-A) a

los demás puntos, mediante el uso de equipos de medición apropiados tales como los niveles electrónicos marca Topcon modelo DL-503.

Figura 40. **Benchmark (BM) C90A**



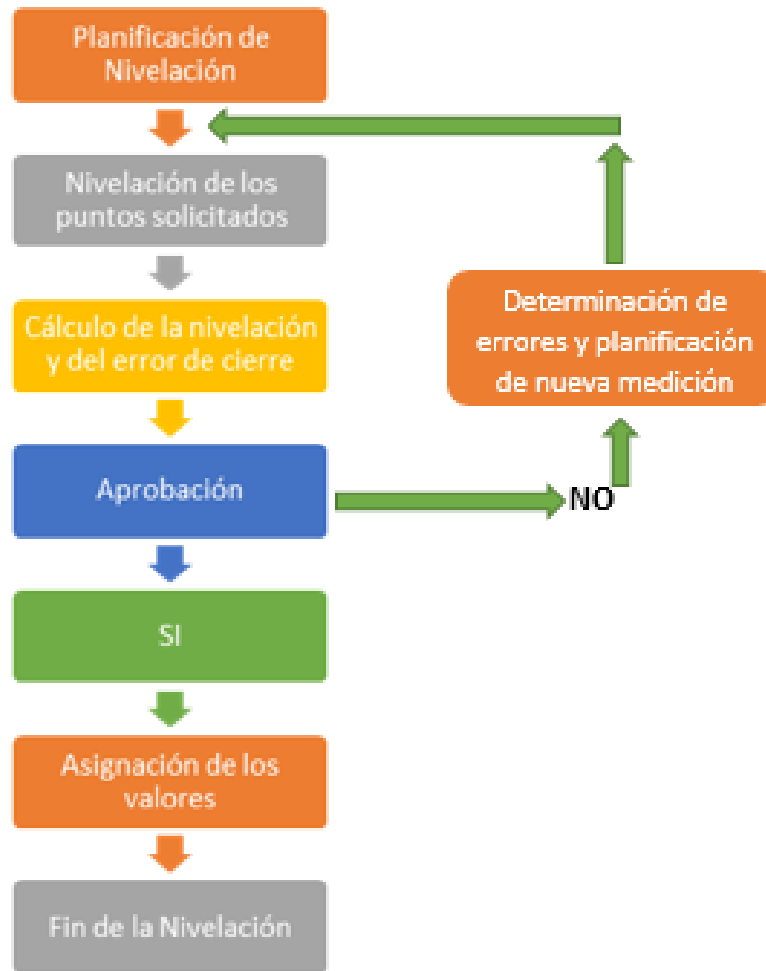
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Los equipos usados fueron:

- Cuatro (04) niveles electrónicos marca Topcon Modelo DL-503 y accesorios
- Cuatro (04) trípodes de aluminio
- Cuatro (04) miras de aluminio

Cada nivel electrónico es cuidadosamente transportado para evitar que pueda perderse la calibración de fábrica.

Figura 41. Diagrama de procedimientos de nivelación geométrica



Fuente: elaboración propia, empleando Photoshop.

Cada procedimiento anteriormente descrito, debe de tener su propio control de calidad, que permita depurar errores humanos o de calibración del equipo. Normalmente se deben calibrar los equipos cada 3 meses o cuando se considere que debido a su manipulación se tenga alguna duda de su precisión.

Tabla IX. Nivelación geométrica

NOMBRE	COTA NIVELACION (m)	NOMBRE	COTA NIVELACION (m)	NOMBRE	COTA NIVELACION (m)
OC01	269.287	LB13A	369.416	LB29A	423.763
OC02	112.244	LB14	423.642	LB30	348.387
OC03	369.226	LB14A	436.523	LB30A	342.403
OC04	288.068	LB15	374.721	LB31	238.314
OC05	697.756	LB15A	373.250	LB31A	237.954
OC06	235.589	LB16	369.497	LB32	140.968
OC07	30.178	LB16A	371.655	LB32A	137.825
LB01	271.353	LB17	332.347	LB33	102.912
LB01A	271.190	LB17A	336.324	LB33A	102.424
LB02	226.423	LB18	320.637	LB34	61.802
LB02A	233.053	LB18A	308.818	LB34A	64.152
LB03	237.231	LB19	354.352	LB35	37.834
LB03A	239.664	LB19A	353.100	LB35A	36.662
LB04	227.217	LB20	302.633	LB36	23.266
LB04A	229.211	LB20A	293.330	LB36A	23.403
LB05	170.154	LB21	271.688	C10A	104.048
LB05A	172.612	LB21A	274.154	C21A	494.280
LB06	113.184	LB22	240.349	C31A	494.208
LB06A	113.505	LB22A	249.654	C36A	220.254
LB07	153.893	LB23	219.746	C37A	223.963
LB07A	150.316	LB23A	232.838	C38A	240.562
LB08	209.637	LB24	393.495	C46A	353.025
LB08A	224.135	LB24A	398.293	C51B	319.531
LB09	241.670	LB25	501.570	C70A	241.687
LB09A	254.832	LB25A	494.172	C79A	170.101
LB10	311.345	LB26	698.661	C82B	196.949
LB10A	316.297	LB26A	699.172	C86A	224.774
LB11	404.550	LB27	705.113	C90A	227.709
LB11A	412.435	LB27A	712.541	C-5A	33.105
LB12	430.395	LB28	581.312	C-73	165.777
LB12A	427.521	LB28A	559.310		
LB13	373.239	LB29	430.140		

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Después de realizar las correcciones a los datos obtenidos por los niveles de precisión se determinaron las diferencias entre las cotas indicadas por el IGN y la nivelación geométrica, según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla X. **Diferencias entre cotas del IGN y la nivelación geométrica**

NOMBRE	COTA TARJETA IGN (m)	COTA NIVELACION (m)	DIFERENCIA COTAS (m)
C10A	104.028	104.048	-0.020
C21A	494.363	494.280	0.083
C31A	494.290	494.208	0.082
C36A	220.312	220.254	0.058
C46A	353.095	353.025	0.069
C51B	319.579	319.531	0.048
C70A	241.689	241.687	0.002
C79A	170.115	170.101	0.014
C82B	196.954	196.949	0.005
C86A	224.771	224.774	-0.003
C90A	227.709	227.709	0.000
C-5A	33.060	33.105	-0.045
C-73	165.750	165.777	-0.027

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.9. Puntos de apoyo fotogramétrico de control de calidad

Para apoyar la fotogrametría se colocaron puntos de apoyo fotogramétrico PAF, en zonas específicas, definidos para aerotriangular, distribuidos a lo largo del proyecto. Estas señales tienen forma de cruz con dimensiones de 1 m de largo por 40 cm de ancho.

6.10. Modelo geoidal local

Para el cálculo del modelo geoidal local desarrollado para el presente proyecto, se empleó la ecuación general de la serie de Taylor, la cual nos permite interrelacionar dos sistemas de medidas. En este caso nos permite correlacionar:

- Coordenadas geográficas con altura elipsoidal (sistema WGS84) medidos con GPS
- Cotas sobre el nivel medio del mar de los mismos que tienen coordenadas geográficas

Con estos valores, y empleando la ecuación citada, podemos determinar los 7 parámetros del modelo de transformación de Helmert, que permite correlacionar ambos sistemas de referencia a través de tres traslaciones, tres rotaciones y un factor de escala. Estos parámetros se convierten en constantes que permiten determinar la ondulación de los nuevos puntos medidos que este dentro del área de cobertura del modelo.

El área de cobertura del modelo ondulatorio, estará en función de la ubicación de los puntos que participan en la determinación de citados parámetros.

El modelo ondulatorio es generado con base en la ecuación de la serie de Taylor:

$$N = N_0 + A \times X + B \times XY + C \times XY^2 + D \times X^2Y^2 + E \times XYZ + F \times X^2Y^2Z^2$$

Donde:

Esta serie Polinómica calcula la Ondulación; la que se define como la distancia que existe entre el elipsoide y el geoide tal como se muestra en el gráfico.

Para determinar la ondulación se tiene que resolver la ecuación de la serie de Taylor para determinar las constantes (A, B, C, D, E, F y No) con las cuales se calcula la Ondulación (N) para cada punto.

6.11. Procesamiento y resultado de las mediciones

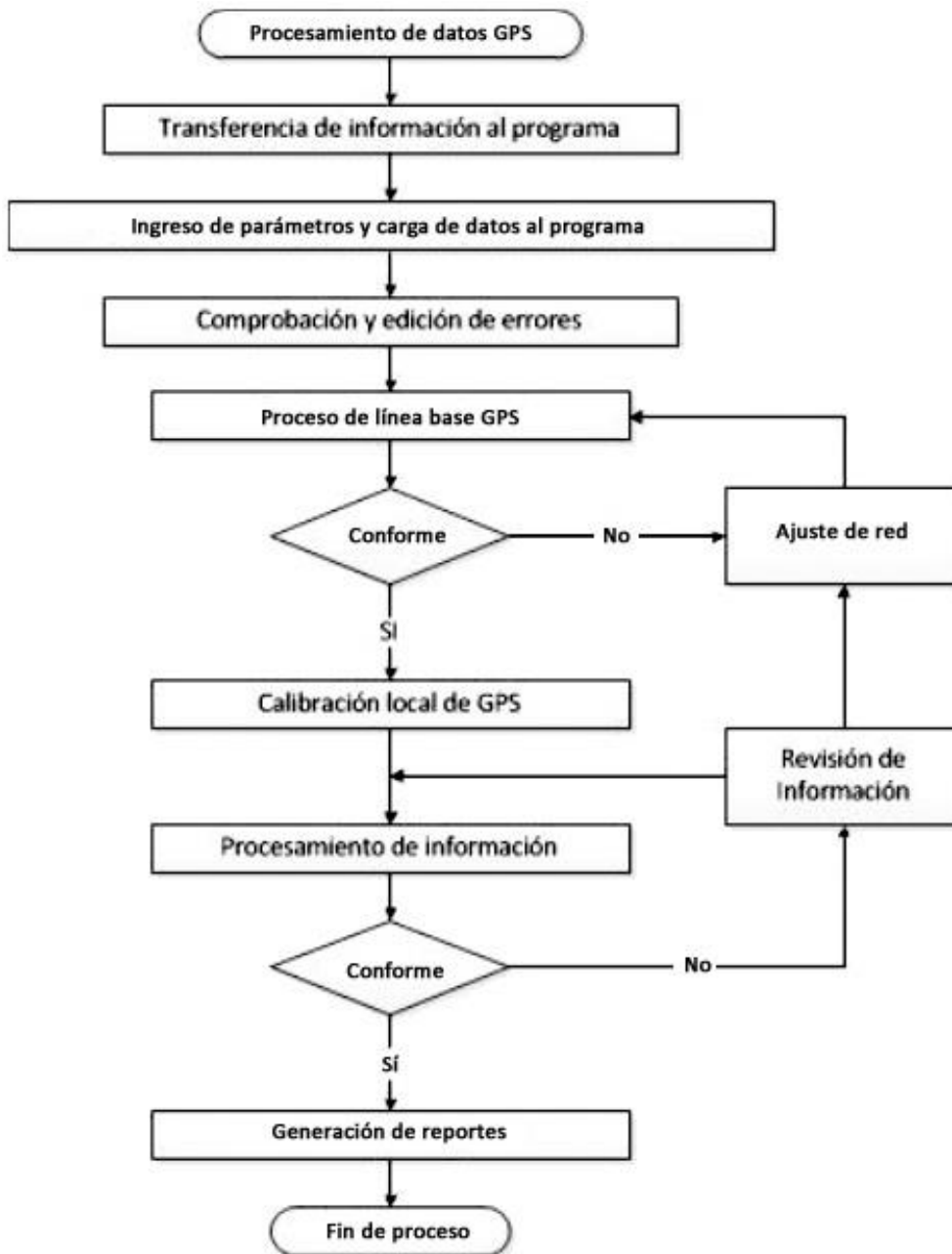
La información recolectada de la data GPS, es transferida a una computadora empleando el software Trimble Business Center, realizándose luego su proceso para obtener los valores de coordenadas UTM, georeferenciados al datum WGS-84 y proyecciones UTM zona 15N, GTM local 15.5N.

Para obtener, los resultados de las coordenadas de los puntos, se siguió todo el flujo de procedimientos de cálculos de post proceso tal como se muestra en la figura 42.

Los resultados obtenidos son dados a través de un proceso por método vectorial o radial; uno de los elementos que ayudan a determinar la calidad de los resultados estadísticamente es el RMSE (*root mean square* o error medio cuadrático); cada RMSE en cada caso se encuentra en el reporte de post proceso de cada punto.

La precisión está dada por la calidad de equipos que se utilizaron en este proyecto, en este caso de la marca TOPCON en los modelos GR5/GNSS

Figura 42. **Secuencia del proceso de datos GPS**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 43. Especificaciones técnicas de los GPS GR-5

ESPECIFICACIONES DEL GR-5	
SEGUIMIENTO	
Número de Canales	216 Canales Universales
Señales Rastreadas	Tecnología G3 – GPS, GLONASS y GALILEO*
WAAS/EGNOS/MSAS	Si
Tipo de Antena	Antena Receptora™ Integrada Micro-Centrada con Plano de Tierra
PRECISIÓN	
RTK	H: 10 mm + 1 ppm V: 15 mm + 1 ppm
Estático/Estático rápido	H: 3mm + 0.5ppm V: 5mm + 0.5ppm
COMUNICACIONES	
Tipo de Radio Opcional	UHF TX/RX Integrado, o 915 MHz de Espectro Ensanchado
Base de Salida de Radio	0.01 - 1.0W, seleccionable por el usuario
Comunicación Celular	GSM/GPRS Integrado o CDMA
Comunicaciones Inalámbricas	Bluetooth® Integrado compatible 2.0
DATOS Y MEMORIA	
Memoria	Interna, Tarjeta de Memoria SD/SDHC Extraible
Data Update/Output Rate	1Hz – 100Hz Seleccionable
Salida de Datos en Tiempo Real	TPS, RTCM SC104, CMR, CMR+
Salida ASCII	NMEA 0183 version 2.x y 3.0
AMBIENTE	
Carcasa	Cubierta en Aluminio I-Beam
Temperatura de Operación	De -40 a +70°C**
Protección de Agua y Polvo	IP66
Resistencia a Caídas	caída sobre el concreto desde 2 metros en el jalón IEC 60068-2-29, IEC 60068-2-27
Rango de vibración	SAE J1211, Sección 4.7 MIL-STD 202G, Método 214A
<small> † Pendiente de patente. Múltiples patentes se relacionan con la tecnología de la Antena Receptora™. *GIOVE A/B satélites de prueba están disponibles para la evaluación de la señal y propósitos de prueba. **De -30 a +60°C con baterías integradas. </small>	

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Tabla XII. **Parámetros para proyectar a GTM local 15.5**

PARAMETROS PARA PROYECTAR A GTM LOCAL	
Proyección:	Transversa de Mercator (tipo Gauss Kruger) en una zona única local.
Esferoide:	WGS 84, Datum: World Geodetic System 1984 (WGS 84)
Longitud de origen:	90° 30' (Meridiano central de la proyección)
Latitud de origen:	0° (el Ecuador)
Unidades:	metros
Falso norte:	0 metros
Falso este:	500,000 metros en el meridiano central.
Factor de escala en el meridiano central:	0.9998
Numeración de las zonas:	No está dentro de la numeración normal de zonas UTM. Se le puede llamar zona 15.5
Límite de latitud del sistema:	No es aplicable.
Límite de las zonas:	No es aplicable.

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

Tabla XIII. **Coordenadas de la línea base LBT**

NO.	HAE (m)	UTM ZONA 15N		ZONA GTM LOCAL		COTA (m)
		ESTE (m)	NORTE (m)	ESTE (m)	NORTE (m)	
BASE	263.183	643,696.547	1,608,600.963	374,325.758	1,608,823.883	
OC01	268.446	697,212.763	1,590,695.196	427,641.582	1,590,336.544	269.287
OC02	110.776	676,773.676	1,593,996.620	407,242.546	1,593,859.039	112.244
OC03	368.985	663,812.895	1,607,193.590	394,426.945	1,607,196.087	369.226
OC04	287.030	642,691.211	1,610,931.177	373,345.901	1,611,165.319	288.068
OC05	697.358	631,623.888	1,620,960.065	362,387.658	1,621,317.309	697.756
OC06	233.687	611,822.223	1,624,658.509	342,622.447	1,625,235.578	235.589
OC07	27.101	594,851.920	1,625,094.158	325,651.081	1,625,859.328	30.178
LB01	270.530	696,593.292	1,591,001.666	427,025.602	1,590,649.644	271.353
LB01A	270.372	696,445.326	1,591,079.040	426,878.515	1,590,728.601	271.190

Continuación de la tabla XIII.

LB02	225.619	693,174.712	1,592,520.327	423,624.379	1,592,204.985	226.423
LB02A	232.266	692,826.776	1,592,664.245	423,278.091	1,592,352.642	233.053
LB03	236.256	689,066.686	1,592,514.553	419,517.255	1,592,243.786	237.231
LB03A	238.722	688,735.696	1,592,672.878	419,188.055	1,592,405.667	239.664
LB04	226.179	685,546.851	1,593,740.463	416,011.462	1,593,507.646	227.217
LB04A	228.157	685,284.180	1,593,742.107	415,748.861	1,593,512.143	229.211
LB05	168.930	681,962.685	1,593,942.139	412,430.152	1,593,748.208	170.154
LB05A	171.413	681,759.224	1,593,967.719	412,227.004	1,593,775.993	172.612
LB06	111.748	677,006.671	1,593,745.983	407,472.787	1,593,605.906	113.184
LB06A	112.069	676,659.651	1,594,169.269	407,130.413	1,594,032.902	113.505
LB07	152.718	675,156.318	1,596,707.215	405,654.871	1,596,586.853	153.893
LB07A	149.172	675,102.719	1,596,880.122	405,603.161	1,596,760.321	150.316
LB08	208.702	673,487.886	1,599,182.982	404,013.601	1,599,080.481	209.637
LB08A	223.188	673,313.702	1,599,307.895	403,840.798	1,599,207.277	224.135
LB09	241.104	672,375.847	1,602,246.265	402,935.099	1,602,155.543	241.670
LB09A	254.290	672,116.672	1,602,522.142	402,678.965	1,602,434.219	254.832
LB10	311.063	670,813.535	1,605,171.749	401,404.918	1,605,097.789	311.345
LB10A	316.057	670,787.031	1,605,367.514	401,380.558	1,605,293.825	316.297
LB11	404.795	669,595.034	1,608,075.733	400,218.323	1,608,014.831	404.550
LB11A	412.694	669,464.302	1,608,204.473	400,089.014	1,608,144.992	412.435
LB12	430.497	666,925.500	1,608,484.173	397,553.488	1,608,452.488	430.395
LB12A	427.599	666,585.298	1,608,392.778	397,212.309	1,608,364.828	427.521
LB13	373.007	663,956.560	1,607,203.428	394,570.710	1,607,204.351	373.239
LB13A	369.147	663,605.795	1,607,161.389	394,219.504	1,607,166.155	369.416
LB14	423.494	661,235.222	1,608,678.095	391,865.654	1,608,708.765	423.642
LB14A	436.400	661,009.205	1,608,902.437	391,642.104	1,608,935.577	436.523
LB15	374.244	658,720.660	1,607,472.295	389,337.951	1,607,530.552	374.721

Continuación de la tabla XIII.

LB15A	372.705	658,478.897	1,607,482.219	389,096.302	1,607,543.123	373.250
LB16	368.983	655,877.872	1,608,456.469	386,505.977	1,608,545.862	369.497
LB16A	371.140	655,724.481	1,608,497.738	386,353.039	1,608,588.812	371.655
LB17	331.480	652,405.263	1,608,134.800	383,029.808	1,608,262.247	332.347
LB17A	335.441	652,122.257	1,608,239.036	382,747.937	1,608,369.586	336.324
LB18	319.648	649,150.834	1,608,763.461	379,782.163	1,608,926.598	320.637
LB18A	307.820	648,872.283	1,608,822.688	379,504.248	1,608,988.882	308.818
LB19	353.681	647,450.051	1,611,698.664	378,113.503	1,611,880.607	354.352
LB19A	352.421	647,155.221	1,611,815.655	377,819.942	1,612,000.842	353.100
LB20	301.644	643,297.492	1,611,074.785	373,953.809	1,611,302.283	302.633
LB20A	292.310	642,965.853	1,610,980.274	373,621.105	1,611,211.405	293.330
LB21	270.456	639,601.919	1,610,731.642	370,254.120	1,610,999.677	271.688
LB21A	272.905	639,381.093	1,610,722.810	370,033.173	1,610,993.268	274.154
LB22	238.907	636,145.267	1,610,740.126	366,797.152	1,611,046.107	240.349
LB22A	248.257	635,914.502	1,610,774.167	366,566.730	1,611,082.685	249.654
LB23	218.211	633,127.222	1,611,434.544	363,786.309	1,611,773.759	219.746
LB23A	231.299	632,857.275	1,611,435.468	363,516.332	1,611,777.648	232.838
LB24	392.281	632,252.665	1,614,312.592	362,943.253	1,614,661.859	393.495
LB24A	397.112	632,422.972	1,614,504.260	363,115.696	1,614,851.684	398.293
LB25	500.728	632,638.027	1,617,365.862	363,362.297	1,617,711.357	501.570
LB25A	493.326	632,585.440	1,617,526.964	363,311.478	1,617,873.063	494.172
LB26	698.255	631,655.094	1,621,022.095	362,419.554	1,621,379.005	698.661
LB26A	698.823	631,409.717	1,621,258.840	362,176.753	1,621,618.498	699.172
LB27	704.886	629,096.399	1,623,774.663	359,890.863	1,624,160.320	705.113
LB27A	712.308	628,865.125	1,624,045.087	359,662.541	1,624,433.351	712.541
LB28	580.770	625,194.732	1,625,115.981	356,003.309	1,625,545.080	581.312
LB28A	558.781	624,943.966	1,625,283.744	355,754.350	1,625,715.655	559.310

Continuación de la tabla XIII.

LB29	429.197	621,144.201	1,625,179.774	351,952.614	1,625,653.747	430.140
LB29A	422.812	620,900.538	1,625,310.201	351,710.340	1,625,786.902	423.763
LB30	347.045	617,048.798	1,625,412.032	347,858.793	1,625,931.422	348.387
LB30A	341.016	616,788.257	1,625,278.295	347,596.704	1,625,800.537	342.403
LB31	236.410	611,747.307	1,624,764.650	342,548.684	1,625,342.579	238.314
LB31A	236.015	611,524.271	1,624,791.490	342,325.880	1,625,371.897	237.954
LB32	138.879	607,512.695	1,625,985.599	338,326.306	1,626,610.811	140.968
LB32A	135.660	607,199.304	1,626,036.020	338,013.374	1,626,664.721	137.825
LB33	100.677	604,738.388	1,628,008.862	335,573.524	1,628,665.502	102.912
LB33A	100.176	604,381.839	1,628,090.877	335,217.765	1,628,751.501	102.424
LB34	59.282	601,555.276	1,627,567.160	332,384.405	1,628,258.962	61.802
LB34A	61.615	601,181.226	1,627,446.816	332,008.886	1,628,142.724	64.152
LB35	34.980	597,499.647	1,626,453.620	328,314.918	1,627,189.984	37.834
LB35A	33.781	597,146.357	1,626,355.110	327,960.399	1,627,095.353	36.662
LB36	20.228	595,238.619	1,625,368.645	326,040.976	1,626,129.642	23.266
LB36A	20.352	595,146.764	1,625,271.454	325,948.007	1,626,033.429	23.403

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.12. Levantamiento con tecnología LiDAR

Como ya fue expuesto en los capítulos anteriores, la tecnología LiDAR transmite pulsaciones de luz que reflejan al terreno y otros objetos de altura. La pulsación es convertida de fotones a impulsos eléctricos y colectada por un registro de datos de alta velocidad.

Dependiendo del modelo del dispositivo LiDAR, así serán los retornos que tendrá para permitir determinar diferentes alturas en el terreno, la vegetación y otros elementos.

Para el proyecto CA-2 se alcanzó un promedio de 1 punto/m², que permite soportar curvas de nivel con intervalos de 1 m.

Para mejorar la calidad del DTM y a la cantidad de puntos obtenidos, se requiere que se realicen ediciones con líneas de quiebre o *brakelines* para mejorar las definiciones de las curvas de nivel.

El procesamiento y verificación de los datos obtenidos se realizada en 3D a través de un software.

6.12.1. **Equipo utilizado**

Los equipos utilizados para realizar el levantamiento LiDAR son de última generación tipo ALS60 con MPIA de Leica, con 200 Hz (200,000 pulsaciones por segundo) 4 retornos por pulsación y FOV variable. Cámara fotogramétrica digital de medio, formato RCD105.

6.12.2. **Precisiones**

La precisión de los datos obtenidos está en función de la altura de vuelo, diámetro del rayo láser, calidad de datos GPS/IMU y el post-proceso. El control de calidad esperado es de 30 cm en X, Y 15 cm en Z.

6.12.3. Líneas de vuelo

Para la planificación de las líneas de vuelo se utilizará el software FPES (*flight planning and evaluation software*) de Leica, que permite ingresar los parámetros solicitados para el proyecto Ca-2.

Figura 44. **Plan de vuelo**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.12.4. Calibración

Como parte del control de calidad del levantamiento LiDAR se debe realizar un vuelo de calibración sobre un área de control, con el fin de establecer los parámetros de corrección *roll*, *pitch* y *heading*, además de rangos de corrección altimétricos por retorno y torsión.

El vuelo de calibración se caracteriza por tener dos líneas a la misma altura, pero en diferente dirección (opuestas) sobre el mismo eje o en la misma trayectoria. De igual forma, se requiere una línea perpendicular que atraviesa las dos líneas mencionadas. (Horizons South America, 2011, p.33).

Figura 45. **Vuelo de calibración (imágenes de intensidad)**

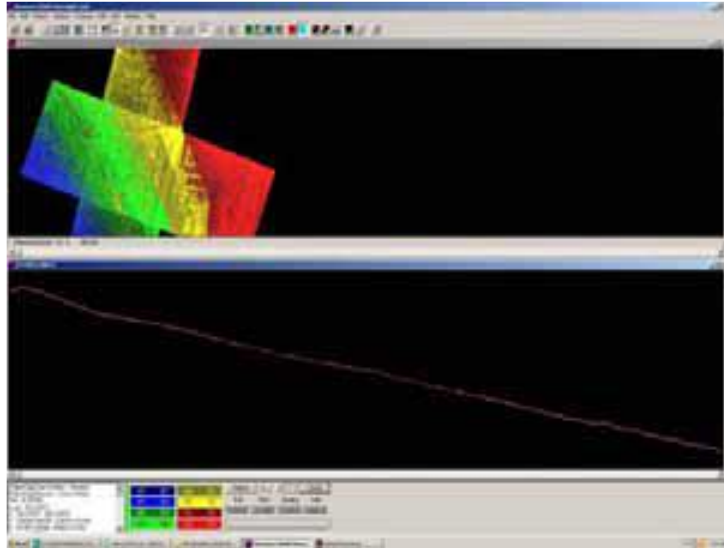


Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.12.5. **Vuelo LiDAR**

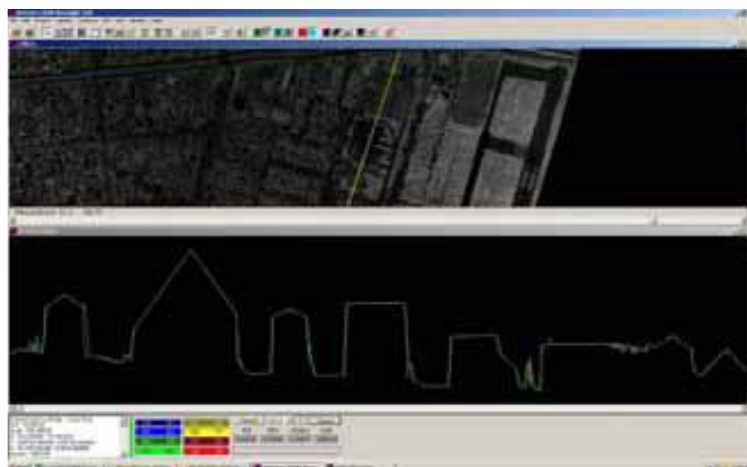
Para la toma de datos se utilizó un equipo aerotransportado en un avión adaptado para tal trabajo. Durante la ejecución del vuelo, el operador puede realizar un control directo en tiempo real de los datos obtenidos a través del software TracGUI de Leica.

Figura 46. **Calibración del *heading***



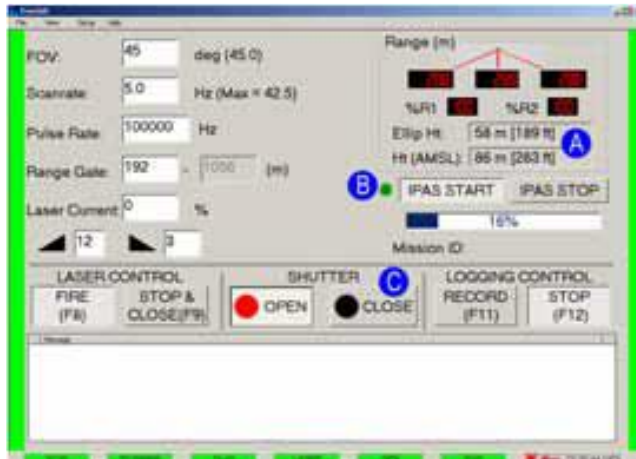
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 47. **Calibración del *pitch***



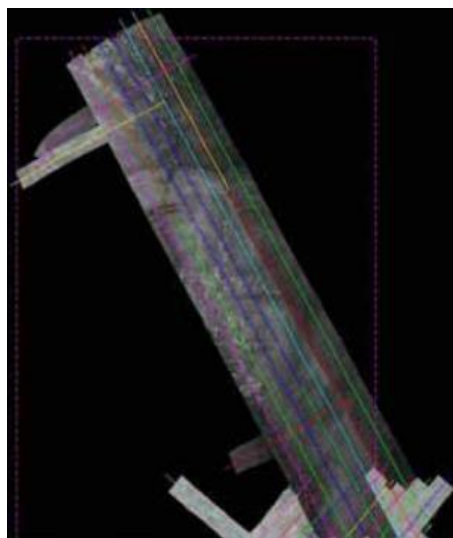
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 48. **Software utilizado TracGUI**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 49. **Vuelo LiDAR**



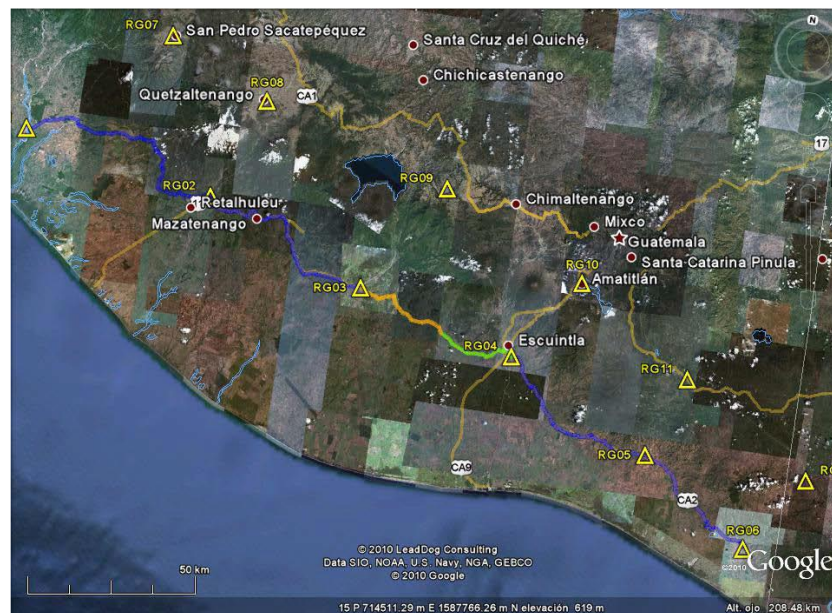
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.12.6. Base estación de GPS

El control de calidad se realizó teniendo una estación GPS base en comunicación con el equipo LiDAR aerotransportado a una distancia máxima de 40 km de operación, con un intervalo de toma de datos de 0.5 segundos.

Estas estaciones bases se colocaron en puntos estratégicos como se puede ver en la siguiente imagen.

Figura 50. **Ubicación de los puntos de la red geodésica básica**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.12.7. Procesamiento de los datos obtenidos por LiDAR

Para poder obtener el MDT se trabajarán los datos obtenidos en 2 fases:

- Etapa de preprocesamiento

Los datos de LiDAR, GPS y del IMU, se procesan utilizando el software LiDAR. Para cada línea de vuelo se verificó el alcance del área del proyecto y el espaciamiento de los puntos LiDAR. Se toman además los parámetros obtenidos de la calibración del equipo, previo al levantamiento. Imágenes de intensidad generadas registran cada punto obtenido de LiDAR. Estos puntos son transformados al sistema WGS-84.

Para hacer la corrección de desviación vertical, se utilizan los datos de control de campo, obtenido del área del proyecto. Con ello pueden compararse los datos LiDAR obtenidos según el valor RMSE (se analizará con mayor detalle en el próximo capítulo).

- Generación del MDT

Todos los datos obtenidos en áreas de superposición de las líneas de vuelo son removidos para obtener un solo conjunto de información.

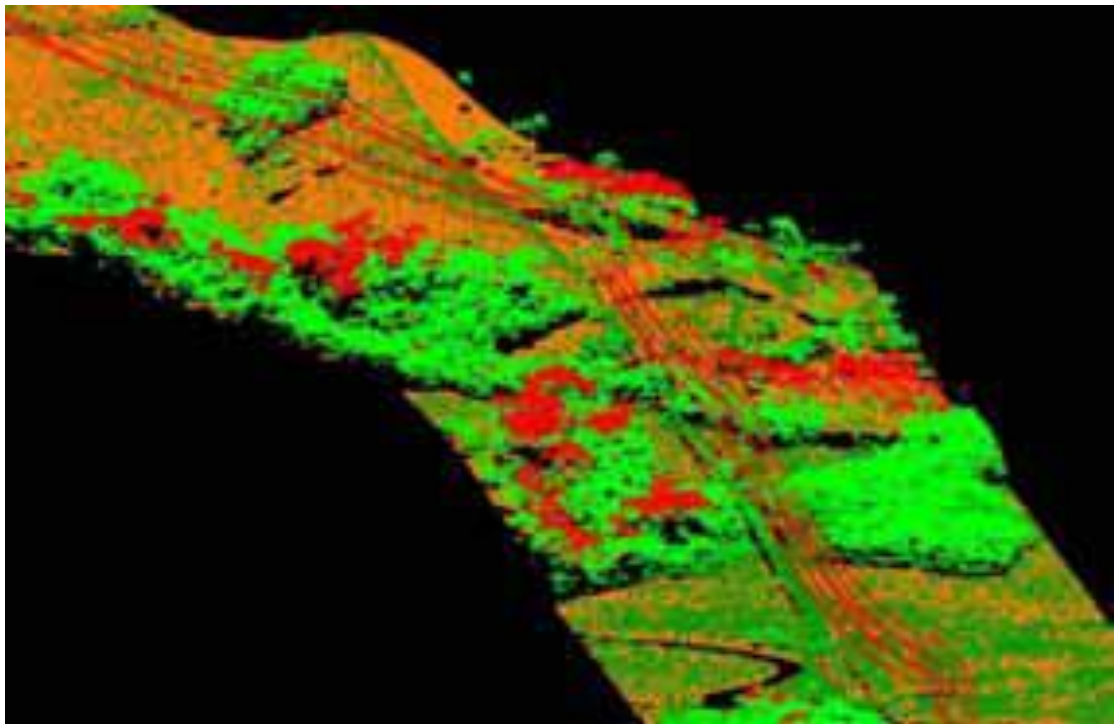
Estos datos son recortados a la frontera digital del proyecto, inclusive en una zona de amortiguamiento adicional. Los datos resultantes se denominan datos crudos LiDAR.

Estos datos obtenidos se clasifican en datos *ground* y *no ground*, Para eso se utilizan filtros especiales que distinguen en qué tipo de retorno es cada dato.

Después de filtrar los datos se editan en 2D. Los editores utilizan una combinación de imágenes, la intensidad del reflejo del LiDAR y software de edición de puntos.

Los datos filtrados son los que se utilizan para generar los modelos digitales de terreno, sobre los que se generan las curvas de nivel, que servirán para el diseño del proyecto a nivel factibilidad.

Figura 51. **Información LiDAR editada y filtrada**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.13. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se realiza lo siguiente:

6.13.1. **Postproceso de datos obtenidos con GPS**

Toda la información obtenida en los puntos de la red geodésica de apoyo para el vuelo LiDAR es transformada a formato *rinex* para su post-proceso en el software TGOoffice v.162, para lograr precisiones de ± 5 mm más 1 ppm.

6.13.2. **Postproceso de datos GPS, LiDAR e IMU**

Para manipular la información obtenida por el GPS LiDAR se utiliza el formato GravNav de Novatel, *waypoint* para lo cual se tomará como punto de referencia el establecido por la base GPS.

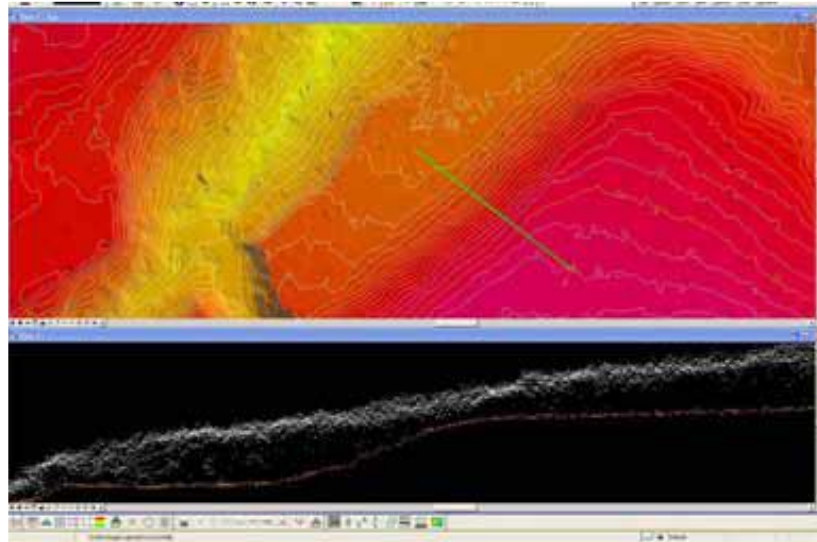
6.13.3. **Modelo digital de terreno y generación de las curvas de nivel**

Todo el proceso realizado tiene como fin obtener un MDT para poder generar las curvas de nivel que son las utilizadas para los softwares de diseño a utilizarse en el diseño geométrico, hidráulico, etc., de la carretera.

Estas curvas de nivel estarán a un intervalo de 1 metro.

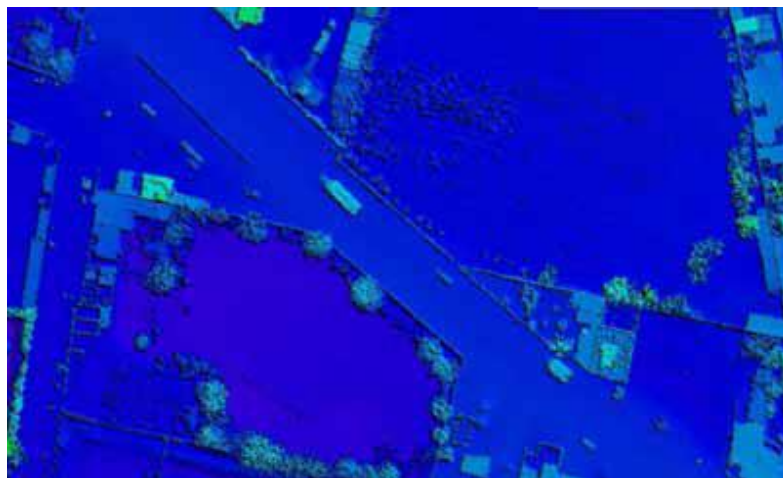
Utilizando las ortofotos tomadas durante el levantamiento LiDAR y como apoyo a la edición y mejora de datos del MDT se procedió a rectificar la información sobre las curvas de nivel como: ríos, caminos existentes, líneas de transmisión existentes, quebradas, áreas urbanas, zonas de áreas boscosas, áreas de cultivo, vías férreas, áreas construidas en zonas urbanas, espejos de agua, etc.

Figura 52. **Superficie del MDT**



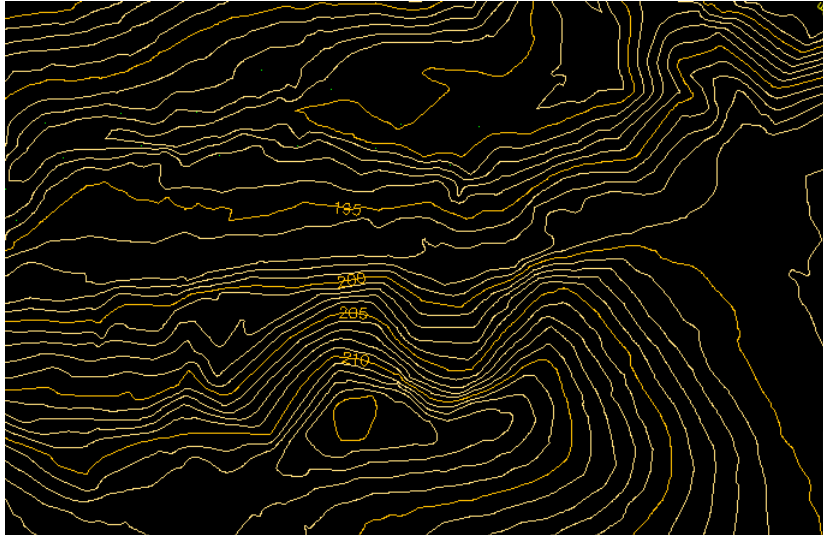
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 53. **Modelo digital de elevación (MDE)**



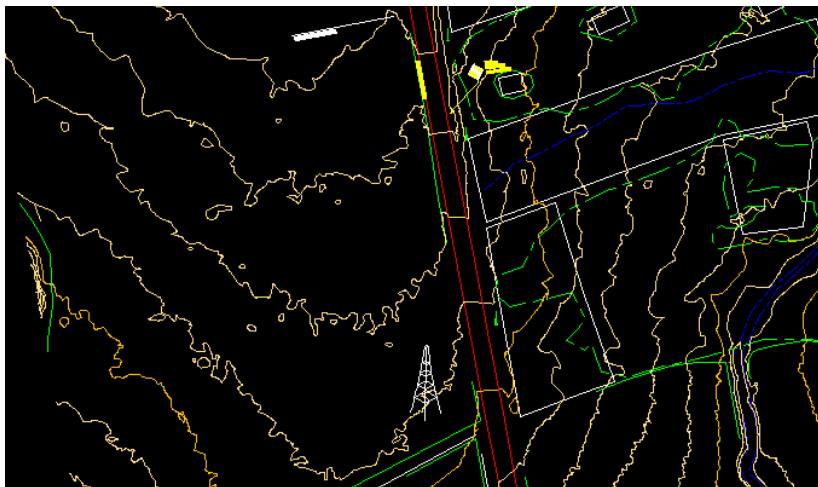
Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Propuesta técnica del proyecto CA-2 Guatemala.*

Figura 54. **Curvas de nivel generadas a partir del MDT**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Figura 55. **Información agregada por rectificación utilizando ortofoto**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

6.13.4. Ortofotos

A través de las imágenes digitales obtenidas mediante el vuelo realizado se procedió a elaborar las ortofotos digitales con un tamaño de píxel de 25 cm, empleando el software Socet Set de LH Systems.

El procedimiento efectuado es el siguiente (Horizons South America, 2011, p.34):

- Rectificación diferencial geométrica píxel/píxel con interpolación bicúbica
- Mejoramiento del aspecto visual a través de Adobe Photoshop
- Homogeneidad en el contraste entre imágenes para su legibilidad según análisis de los histogramas de cada fotograma y aplicando algoritmos correspondientes para corrección y balance de las zonas de alto contraste

Figura 56. **Ortofoto obtenida para el proyecto CA-2**



Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Anexos del informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

6.13.5. Levantamiento de secciones transversales con topografía convencional

Para realizar el análisis de los datos obtenidos durante el levantamiento LiDAR, fue necesario realizar un levantamiento con topografía convencional.

Este levantamiento partió de la red auxiliar del proyecto, amarrada a la red geodésica local del proyecto CA-2.

El levantamiento convencional fue realizado utilizando estaciones totales marca Topcon, modelo ES105, con todo su equipo auxiliar (prismas, bastones, etc.).

Todo el equipo fue calibrado previo a realizar la colocación de la red auxiliar de donde se realizará el levantamiento de secciones transversales a cada 10 m con un ancho promedio de 50 a 60 m.

En la siguiente imagen puede notarse que el equipo de topografía convencional no pudo acensar a las propiedades adyacentes a la carretera ya que están fuera del derecho de vía de la CA-2, que es de 12.50 m a cada lado del eje central.

Para realizar el levantamiento convencional se tomó en cuenta que los datos de las bases geo posicionadas incluyendo el Factor de Escala de cada base.

Figura 57. **Secciones transversales con topografía convencional**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Tabla XIV. **Red de puntos de la poligonal del proyecto CA-2**

EST.	NORTE	ESTE	ELEV.	DESCRITOR	OBS.
	FACTOR DE ESCALA = 0.999822799 DE OC01 A LB01				
	PPM = 24				
1	1590336.5436	427641.5821	269.2870	OC01	BASA CENT.ARRIATE
2	1590386.2581	427523.7174	265.1590	LB1-3M	CLAV EN HOMBRO LI
3	1590487.4567	427335.9316	262.7060	LB1-2M	CLAV EN HOMBRO LI
4	1590572.2091	427176.2178	266.9380	LB1-1M	CLAV EN HOMBRO LI
5	1590649.6439	427025.6019	271.3530	LB01	BASA IZQ

Fuente: Horizons South America S.A.C. (2013). *Anexos del informe técnico de campo del levantamiento laser del proyecto CA-2 Guatemala.*

7. PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

Aunque se tienen los 140 km levantados mediante la tecnología LiDAR, se seleccionó el sub-tramo entre el km 137+900 al km 141+160 para no extender demasiado el presente estudio comparativo, además de que este sub-tramo puede evaluarse la calidad de la información obtenida por poseer:

- Terreno montañoso con vegetación densa (bosques) km 137+900 a km 138+800.
- Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar, km 139+100 a km 139+320
- Terreno plano con poca vegetación km 139+500 a km 140+300.
- Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones) km 140+500 a km 141+120.

Figura 58. Red de puntos de la poligonal del proyecto



Fuente: elaboración propia, empleando Google Earth.

Estos 4 subtramos, o segmentos, serán evaluados mediante las metodologías recomendadas para la precisión de datos mediante las normativas de la ASPRS (American Society of Photogrammetry and Remote Sensing), normas técnicas colombianas NTC 5205, manual de carreteras, volumen 2 para levantamiento mediante láser transportado de la Dirección de Vialidad de Chile, la cual permite determinar la confiabilidad del dato obtenido por LiDAR en el presente estudio.

7.1. Grilla de comparación

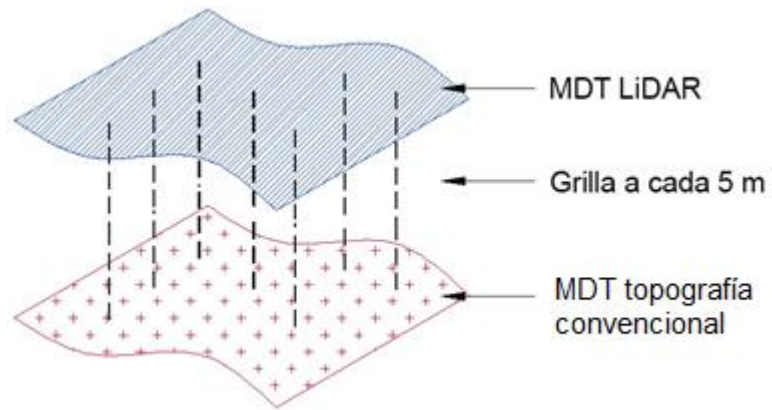
Para realizar la comparación de los datos obtenidos mediante el método LiDAR y por la topografía convencional, se siguió el método recomendado por (Galindo y Villarraga, 2017) para los 2 MDT desarrollados. Esto fue necesario para tener un marco real de comparación, porque, aunque se tomó una gran cantidad de puntos, no hay certeza de que la captura del mismo punto se encuentre en los 2 MDT realizado.

Por tal motivo, tomando como base la frontera creada a partir de la intersección de las 2 superficies, se generó una grilla de nodos equidistantes norte-este con una distancia fija de 5 m.

Debe hacerse notar que esta grilla generada sobre los 2 MDT (LiDAR y Topografía Convencional) busca tomar un mismo punto de comparación descartando los errores propios de cada metodología.

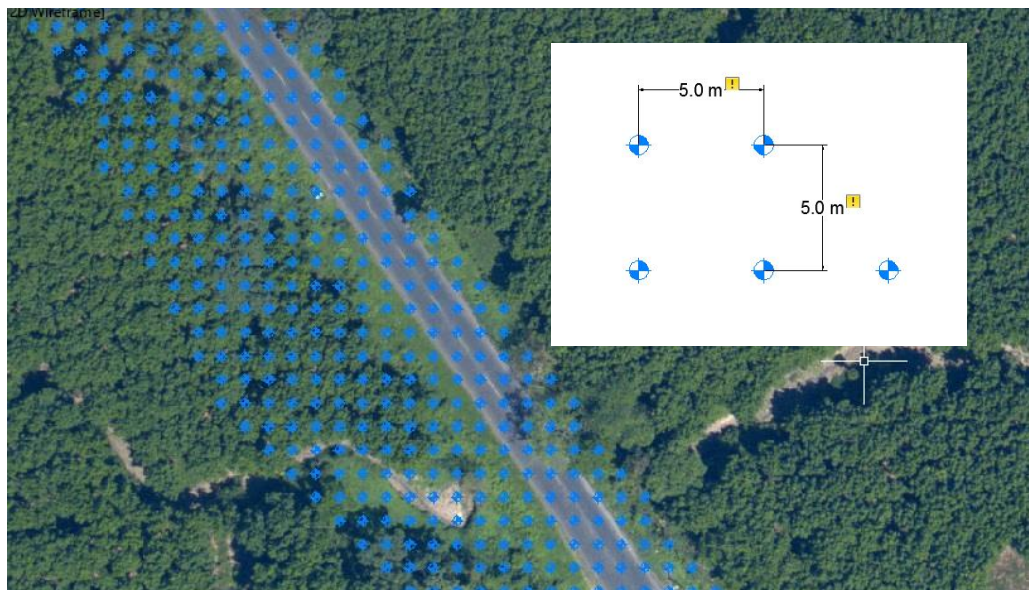
Al generar cada nodo, se utilizó el mismo software para la generación de los modelos digitales de terreno para obtener el dato de cota correspondiente a cada superficie. Es decir, cada nodo tendrá el mismo valor para X, Y, pero tendrá valores diferentes para Z.

Figura 59. **Comparación entre 2 superficies por medio de una grilla**



Fuente: elaboración propia, empleando Photoshop.

Figura 60. **Comparación de la grilla a cada 5 m**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

Estos datos fueron exportados y trasladados a un software para crear tablas de comparación como se muestra a continuación:

Tabla XV. **Ejemplo de las coordenadas obtenidas de la grilla de puntos**

NO	Tecnología LiDAR			Levantamiento Topográfico		
	Y	X	Cota	Y	X	Cota
1	1599302.1262	403774.9298	242.6914	1599302.1262	403774.9298	240.6392
2	1599307.1262	403774.9298	243.9103	1599307.1262	403774.9298	239.7348
3	1599312.1262	403774.9298	244.3673	1599312.1262	403774.9298	239.0815
4	1599292.1262	403779.9298	235.8582	1599292.1262	403779.9298	238.0723
5	1599297.1262	403779.9298	239.4423	1599297.1262	403779.9298	238.2610
6	1599302.1262	403779.9298	240.9348	1599302.1262	403779.9298	240.4810
7	1599307.1262	403779.9298	241.4439	1599307.1262	403779.9298	238.1017
8	1599312.1262	403779.9298	242.0259	1599312.1262	403779.9298	235.8006

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD.

7.2. Evaluación cuantitativa

Para comparar los dos MDT generados a partir de datos de cada método, y poder con ello localizar, cuantificar, analizar y concluir con los errores se utilizarán 3 metodologías de comparación, como lo indica Ibañez Martínez (2007) y también Galindo y Villarraga (2017) en sus respectivos estudios.

Las metodologías a utilizar son:

- Punto a punto
- Superficie a superficie
- Segmento a segmento

Como se indicó anteriormente, para validar el trabajo realizado, se tomarán como base las especificaciones de la ASCE, ASPRS, NTC Colombia y el Manual chileno de especificaciones para el levantamiento de estudios para carreteras.

7.2.1. Metodología punto a punto

Este método es el más directo, ya que se compararán los datos extraídos a partir de la grilla generada para cada MDT. Según lo indica Galindo y Villarraga (2017) para el análisis estadístico se debe utilizar el estudio clásico exploratorio de diferencias donde se debe obtener los datos estadísticos de la muestra y las diferencias para realizar la depuración de errores considerables, según la norma NTC 5025 (precisión de datos espaciales) que recomienda evaluar los datos espaciales por medio de la RMS (raíz media cuadrática) y presentar el nivel de confianza del 95%. La norma 2014 de la ASPR considera evaluar además el 95 percentil en zonas boscosas. Para el primer segmento se evaluaron un total de 1,930 puntos donde se compararon las cotas de cada MDT. En la siguiente tabla se muestra un ejemplo de los datos obtenidos y las cotas por método de levantamiento.

Tabla XVI. **Ejemplo de los datos obtenidos del segmento a**

NO	Y	X	Cota LIDAR	Cota TOPOGRAFÍA CONVENCIONAL
16	1599352.1262	403779.9298	240.6499	230.5073
17	1599357.1262	403779.9298	239.4728	229.8560
18	1599362.1262	403779.9298	239.1726	229.2046
19	1599367.1262	403779.9298	238.8101	228.7996
20	1599287.1262	403784.9298	230.8513	235.1034
21	1599292.1262	403784.9298	235.4627	234.3280
22	1599297.1262	403784.9298	237.7755	236.3209

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

En la tabla anterior se muestra un ejemplo de las cotas calculadas para el segmento a) terreno montañoso y con vegetación. Esta misma comparación se realizó para los segmentos b) terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar; c) terreno plano con vegetación densa y d) terreno plano con zona con construcciones (poblaciones).

En estas tablas comparativas de las cotas de los 2 MDT comparados se obtienen las discrepancias, es decir:

$$e_i = \text{Cota MDT Topografía convencional} - \text{Cota MDT LiDAR}$$

Estos resultados deben ser absolutos por lo que se eleva al cuadrado para poder determinar la Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE), así:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum e_i^2}{n}}$$

Donde:

- e_i^2 = diferencia entre cotas al cuadrado
- N= número de datos de la muestra

A continuación, se calcula el RMSE según la fórmula descrita anteriormente para cada segmento, y según los parámetros establecidos por la ASPRS, ASCE y American Congress on Surveying and Mapping y también indicados por la Normativa Colombiana NTC 5205, la precisión se presenta en distancias terrestres al 95% del nivel de confianza.

Tabla XVII. Ejemplo de la comparación de cotas del segmento a

NO	Tecnología LiDAR			Levantamiento topográfico			Diferencia cotas (ei)	ei ²
	Y	X	Cota	Y	X	Cota		
1	1599302.1262	403774.9298	242.6914	1599302.1262	403774.9298	240.6392	-2.0522	4.2115
2	1599307.1262	403774.9298	243.9103	1599307.1262	403774.9298	239.7348	-4.1755	17.4348
3	1599312.1262	403774.9298	244.3673	1599312.1262	403774.9298	239.0815	-5.2858	27.9397
4	1599292.1262	403779.9298	235.8582	1599292.1262	403779.9298	238.0723	2.2141	4.9022
5	1599297.1262	403779.9298	239.4423	1599297.1262	403779.9298	238.2610	-1.1813	1.3955
6	1599302.1262	403779.9298	240.9348	1599302.1262	403779.9298	240.4810	-0.4538	0.2059
7	1599307.1262	403779.9298	241.4439	1599307.1262	403779.9298	238.1017	-3.3422	11.1703
8	1599312.1262	403779.9298	242.0259	1599312.1262	403779.9298	235.8006	-6.2253	38.7544
9	1599317.1262	403779.9298	242.6003	1599317.1262	403779.9298	235.2304	-7.3699	54.3154
10	1599322.1262	403779.9298	243.5063	1599322.1262	403779.9298	234.5224	-8.9839	80.7105
11	1599327.1262	403779.9298	244.2531	1599327.1262	403779.9298	233.7885	-10.4646	109.5079
12	1599332.1262	403779.9298	244.4654	1599332.1262	403779.9298	233.1188	-11.3466	128.7453
13	1599337.1262	403779.9298	244.3505	1599337.1262	403779.9298	232.4648	-11.8857	141.2699
14	1599342.1262	403779.9298	242.4599	1599342.1262	403779.9298	231.8108	-10.6491	113.4033
15	1599347.1262	403779.9298	241.3594	1599347.1262	403779.9298	231.1586	-10.2008	104.0563
16	1599352.1262	403779.9298	240.6499	1599352.1262	403779.9298	230.5073	-10.1426	102.8723
17	1599357.1262	403779.9298	239.4728	1599357.1262	403779.9298	229.8560	-9.6168	92.4828
18	1599362.1262	403779.9298	239.1726	1599362.1262	403779.9298	229.2046	-9.9680	99.3610
19	1599367.1262	403779.9298	238.8101	1599367.1262	403779.9298	228.7996	-10.0105	100.2101
20	1599287.1262	403784.9298	230.8513	1599287.1262	403784.9298	235.1034	4.2521	18.0804
21	1599292.1262	403784.9298	235.4627	1599292.1262	403784.9298	234.3280	-1.1347	1.2875

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El 95% de confianza significa que 95% de los datos tendrá un error con respecto a la posición verdadera en el terreno que es igual o menor que el valor de precisión informado. Este valor de precisión refleja todas las incertidumbres introducidas por las coordenadas del control geodésico, la recopilación y el cálculo final de los valores de coordenadas sobre el terreno (Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC) (2003). El valor al 95% de confianza se calcula de la siguiente manera:

$$\rho \text{ vertical} = 1.9600 \times \text{RMSE}$$

La norma ASPRS del 2014 indica que, en terrenos con vegetación, el parámetro de comparación debe ser el 95 percentil de las diferencias de datos analizados, donde:

$$95 \text{ Percentil} = \text{RMSEz} * 1.96 * 1.5$$

Tabla XVIII. **Datos comparativos para el segmento a**

Sumatoria e_i^2	5728.4729
Número de muestras (n)	1,930
Promedio	2.9681
Desviación estándar	12.4539
Raíz del Error Cuadrático Medio (RMSE)	1.7228
ρ vertical (95%)	3.376733967
95 Percentil	5.065100951

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XIX. **Datos comparativos para el segmento b**

Sumatoria e_i^2	64.96237555
Número de muestras (n)	223
Promedio	0.291311101
Desviación estándar	0.471173195
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0.539732435
ρ vertical (95%)	1.057875572
95 percentil	1.586813358

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XX. **Datos comparativos para el segmento c**

Sumatoria e_i^2	124.44897
Número de muestras (n)	810
Promedio	0.1536407
Desviación estándar	0.24972684
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0.39197028
ρ vertical (95%)	0.76826176
95 percentil	1.152392635

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Tabla XXI. **Datos comparativos para el segmento d**

Sumatoria e_i^2	143.140341
Número de muestras (n)	976
Promedio	0.14666019
Desviación estándar	0.16420555
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	0.38296238
ρ vertical (95%)	0.75060627
95 percentil	1.125909402

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

A continuación, se muestra el resumen de los datos obtenidos para los 4 segmentos:

Tabla XXII. **Resumen de los datos obtenidos**

Descripción de zonas analizadas	RMSE	ρ vertical (95%)	95 percentil
a) Terreno montañoso y con vegetación	1.72282345	3.376733967	5.06510
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	0.53973243	1.057875572	1.58681
c) Terreno plano con poca vegetación	0.39197028	0.768261756	1.15239
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	0.38296238	0.750606268	1.12591

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

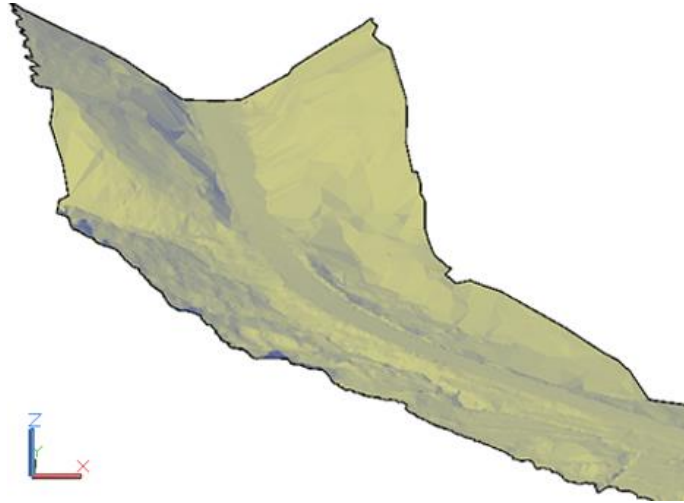
7.2.2. **Metodología superficie a superficie**

La segunda metodología de comparación utilizada está basada en la creación de superficies utilizando software como AutoCAD Civil 3D de AutoDesk. La idea general es generar 2 superficies con los datos obtenidos y poder comparar con ellas las diferencias de volúmenes entre las mismas.

Los procedimientos para generar cada superficie es la generación de una red TIN y partir de esta red la creación de las superficies.

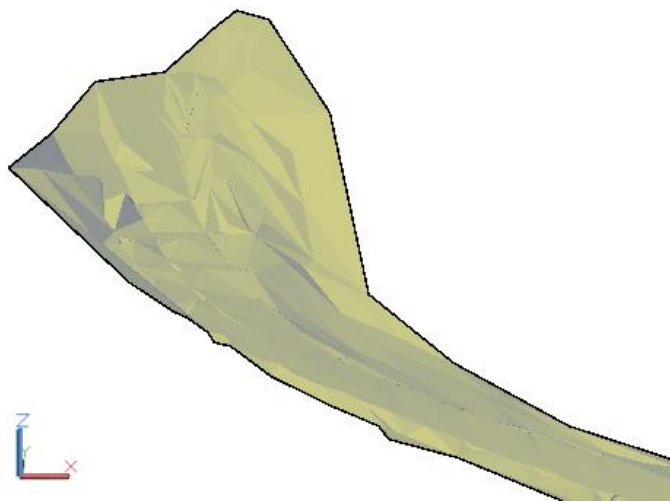
Para determinar la diferencia entre las superficies, es importante generar una superficie de diferencia entre los MDT LiDAR y de topografía convencional y asignarle un color para poder apreciar las precisiones obtenidas en campo, como se muestra en la figura 63.

Figura 61. **LiDAR, para el segmento a: zona montañosa y con vegetación**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Figura 62. **Topografía convencional para la zona a: montañosa y con vegetación**



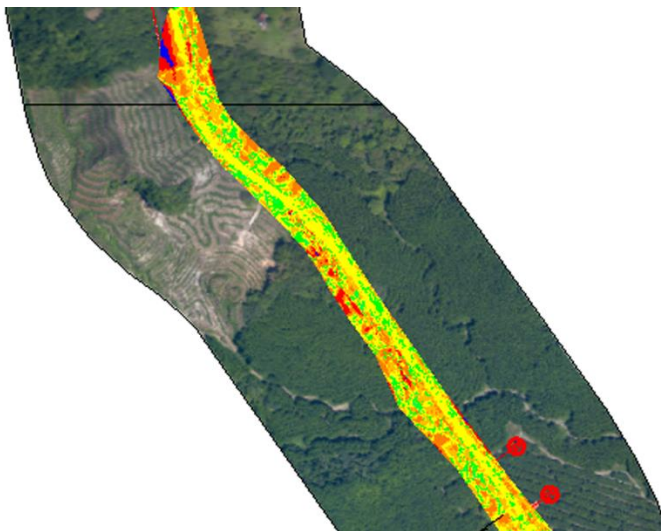
Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Figura 63. **Clasificación de diferencias entre métodos por color**

ID	Elevación mínima	Elevación máxima	ID Color
1	-9.146m	-5.000m	Blue
2	-5.000m	-2.000m	Red
3	-2.000m	-1.000m	Orange
4	-1.000m	-0.500m	Yellow-Orange
5	-0.500m	-0.250m	Yellow
6	-0.250m	-0.100m	Light Green
7	-0.100m	0.000m	Green
8	0.000m	0.100m	Light Green
9	0.100m	0.250m	Yellow-Green
10	0.250m	0.500m	Yellow
11	0.500m	1.000m	Orange
12	1.000m	5.000m	Red-Orange
13	5.000m	10.000m	Red
14	10.000m	12.242m	Blue

Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Figura 64. **Superficie de diferencias entre metodologías del km 137+900 al km 138+800**

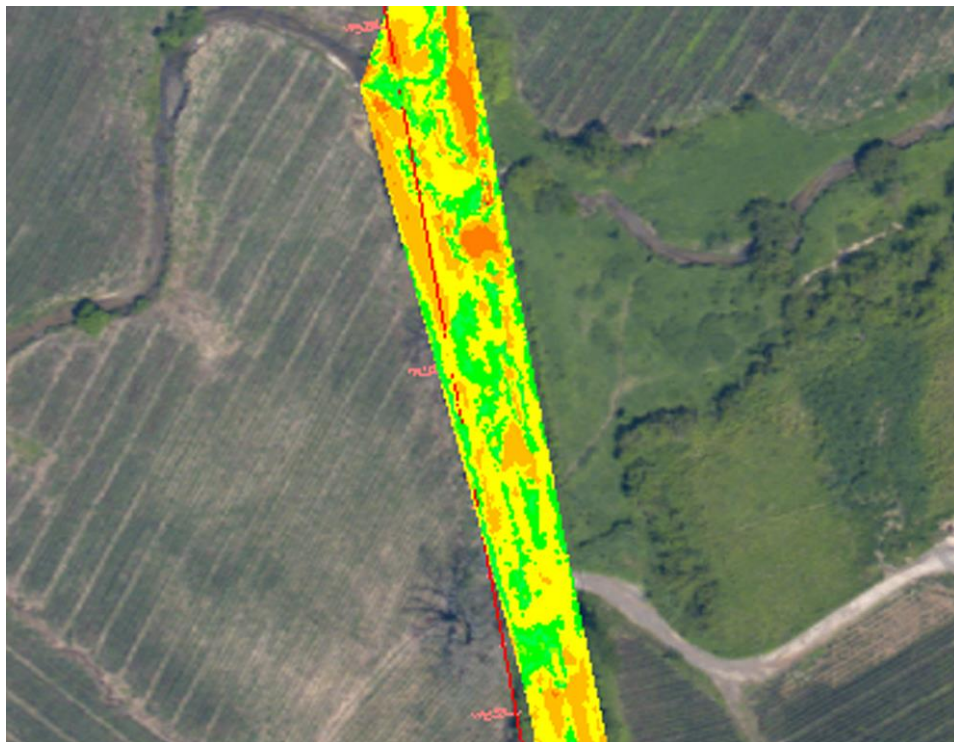


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

En la imagen anterior se muestra la superficie de diferencia generada para la zona a) la cual es más montañosa y con vegetación. En esta se puede ver que el color predominante es el amarillo es decir errores de 0.25 a 0.50 m. El siguiente color es el verde, presente más en zonas sin vegetaciones (en su mayoría) es decir errores de 0.00 a 0.25 m.

La siguiente imagen muestra la zona b) del km 139+100 al km 139+320, zona ondulada con vegetación, en la cual se muestra el color mayoría color verde y amarillo, es decir errores entre 0.50 a 0.00 m, respectivamente.

Figura 65. **Superficie de diferencias entre metodologías del km 139+100 al km 139+320**

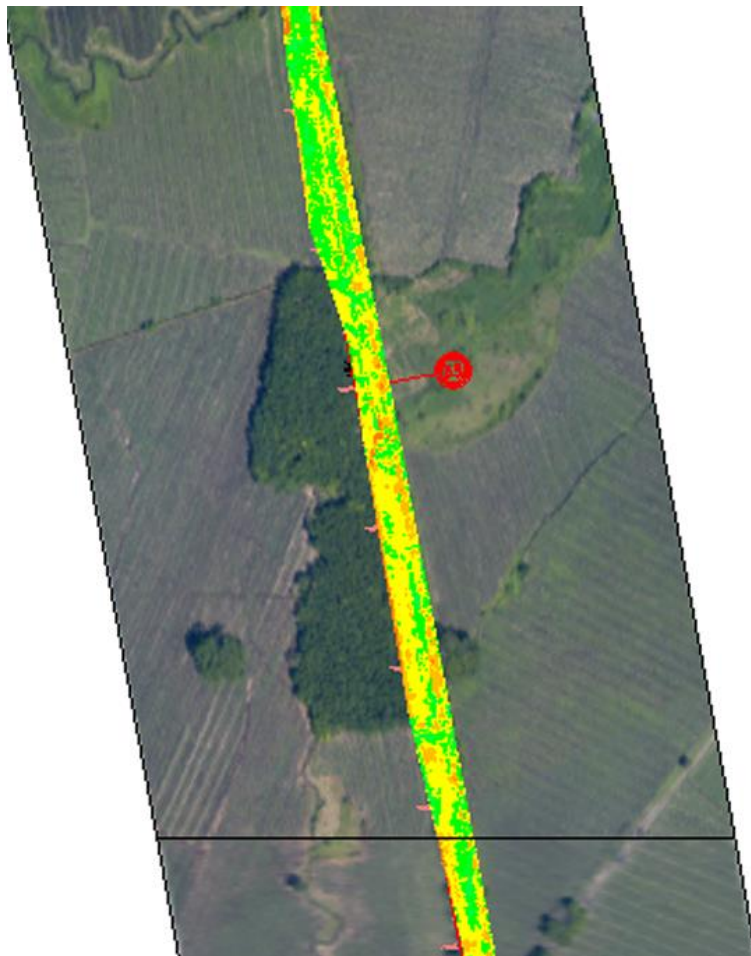


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Esta zona presenta menos vegetación que la anterior además de un terreno más plano con respecto al anterior de la zona a).

La siguiente figura de la superficie generada para una zona plana con poca vegetación, muestra mejores precisiones con el color verde con errores de 0.0 a 0.25 m.

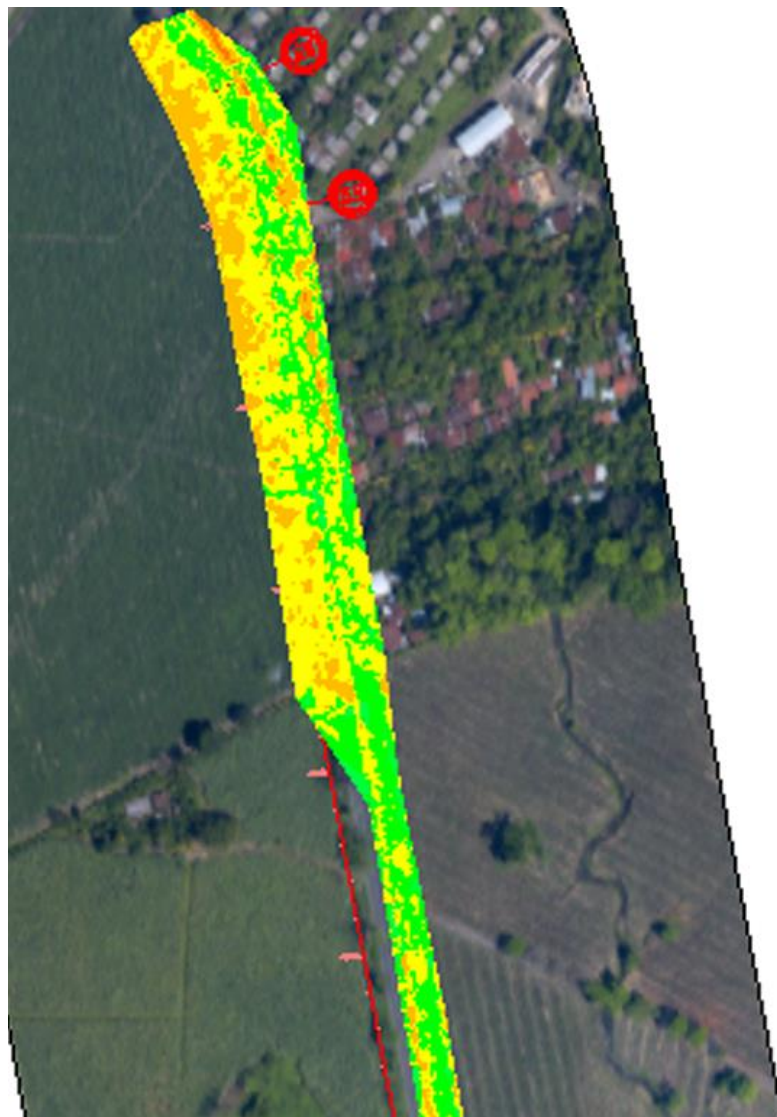
Figura 66. **Superficie de diferencias entre metodologías del km 139+500 a km 140+300**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

La última zona a revisar del km 140+500 a km 141+120, hay una mezcla de vegetación y un poblado. La zona que tiene menos obstáculos predomina el color verde es decir errores de 0.00 a 0.25 m.

Figura 67. **Superficie de diferencias entre metodologías del km 140+500 a km 141+120**

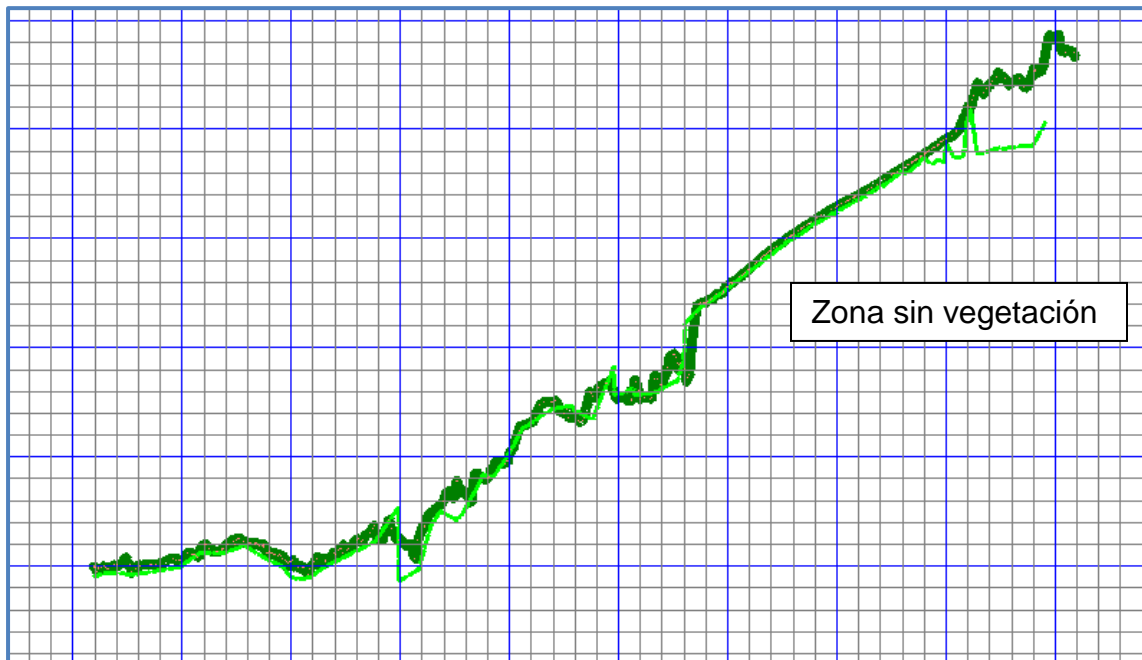


Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

7.2.3. Metodología segmento a segmento

En este método de análisis, para poder comparar los tramos, se tomó el alineamiento central para la ampliación de la Ruta CA-2 Occidente, generando perfiles para las 4 zonas en análisis, teniendo los siguientes resultados.

Figura 68. **Perfil longitudinal de diferencia de cotas entre el km 137+900 a km 138+720**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Se observa que los perfiles son muy similares; sin embargo, se muestran mejores valores cuando se acercan a la zona donde no existe demasiada vegetación, siendo esta, la carretera existente. La siguiente tabla muestra los valores analizados:

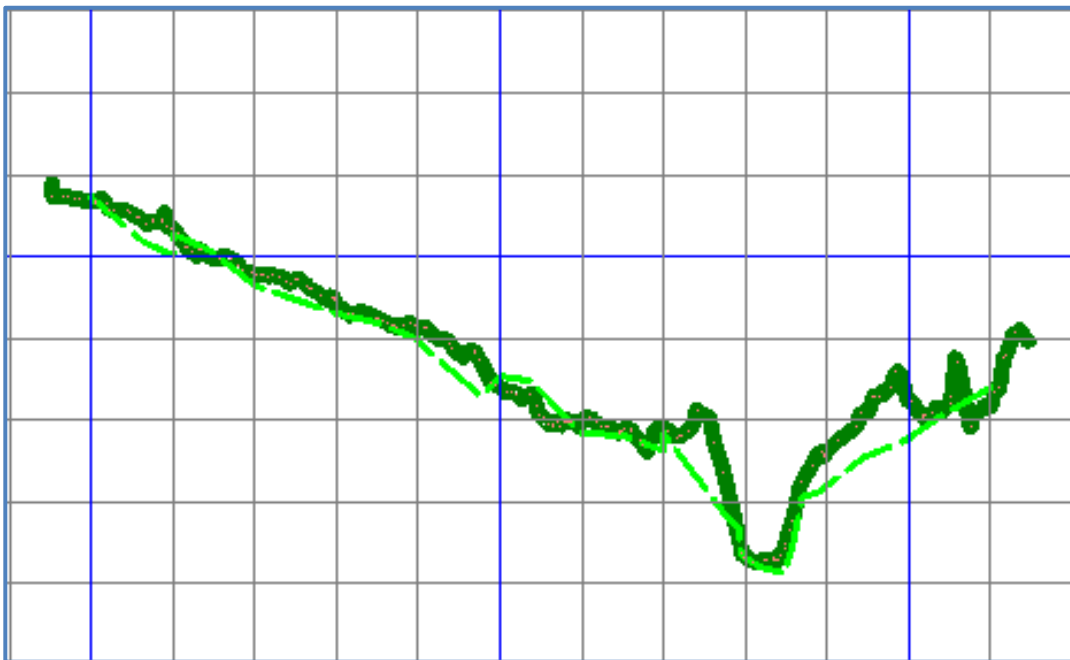
Tabla XXIII. **Subtramo a: del km 137+920 al km 138+720**

ID	Estación	e	e ²
1	137+920	0.77	0.5929
2	137+940	0.7	0.49
3	137+960	0.76	0.5776
4	137+980	0.61	0.3721
5	138+000	0.43	0.1849
6	138+020	0.72	0.5184
7	138+040	0.65	0.4225
8	138+060	0.28	0.0784
9	138+080	0.76	0.5776
10	138+100	1.27	1.6129
11	138+120	1.06	1.1236
12	138+140	0.71	0.5041
13	138+160	1.03	1.0609
14	138+180	0.16	0.0256
15	138+200	3.8	14.44
16	138+220	2.6	6.76
17	138+240	1.33	1.7689
18	138+260	1.25	1.5625
19	138+280	0.14	0.0196
20	138+300	0.19	0.0361
21	138+320	0.01	0.0001
22	138+340	0.69	0.4761
23	138+360	0.68	0.4624
24	138+380	1.57	2.4649
25	138+400	0.45	0.2025
26	138+420	0.44	0.1936
27	138+440	0.44	0.1936
28	138+460	1.68	2.8224
29	138+480	0.16	0.0256
30	138+500	0.17	0.0289
31	138+520	0.25	0.0625
32	138+540	0.42	0.1764
33	138+560	0.38	0.1444
34	138+580	0.36	0.1296
35	138+600	0.48	0.2304
36	138+620	0.45	0.2025
37	138+640	0.44	0.1936
38	138+660	0.41	0.1681
39	138+680	0.41	0.1681
40	138+700	0.66	0.4356
41	138+720	0.92	0.8464
Sumatoria ei²			42.3563
Número de muestras (n)			41
Promedio			1.0331
Desviación estándar			2.4440
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			1.0164
ρ vertical (95%)			1.99215511
95 percentil			2.988232672

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El siguiente subtramo muestra mejores valores que con el anterior. Ya que es un tramo con menor vegetación y con una topografía ondulada que muestra diferencias en el orden de 0.15 a 0.25 m.

Figura 69. **Perfil longitudinal de diferencia de cotas, para el subtramo b: del km 139+120 al km 139+340**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Normalmente, en los cauces o quebradas de ríos, el grado de error es normal que aumente ya que por las condiciones topográficas puede tenerse problemas en los retornos del láser del LiDAR.

La siguiente tabla muestra los errores encontrados a cada 20 m sobre el eje de alineamiento de la ampliación de la ruta CA-2 Occidente.

Tabla XXIV. **Subtramo b: del km 139+120 al km 138+340**

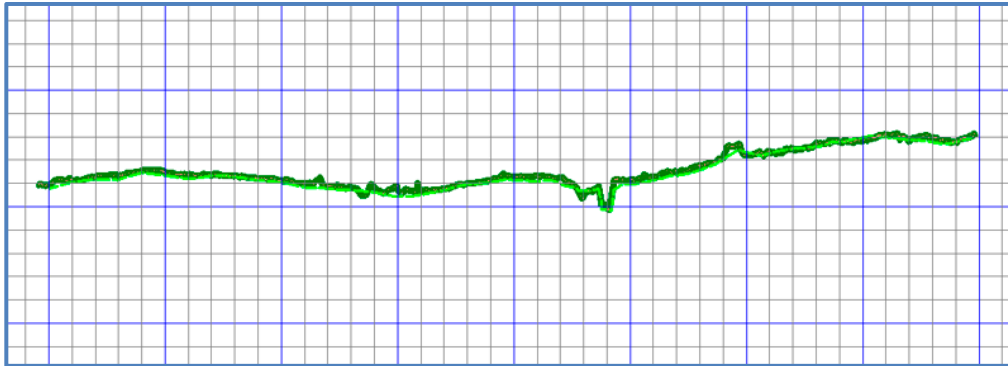
ID	Estación	e	e²
1	139+120		0
2	139+140	0.63	0.3969
3	139+160	0.28	0.0784
4	139+180	0.23	0.0529
5	139+200	0.27	0.0729
6	139+220	0.23	0.0529
7	139+240	0.25	0.0625
8	139+260	0.52	0.2704
9	139+280	0.03	0.0009
10	139+300	0.85	0.7225
11	139+320	0.93	0.8649
12	139+340	0.45	0.2025
Sumatoria e²			2.7777
Número de muestras (n)			11
Promedio			0.2525
Desviación estándar			0.2935
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			0.5025
ρ vertical (95%)			0.98492327
95 percentil			1.477384905

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El subtramo c) del 139+120 a km 138+340, donde la topografía es más plana y tiene poca vegetación ha mostrado mejores valores con respecto a la topografía convencional.

El comportamiento de las diferencias en el perfil es mayor en las zonas donde existen cauces de las alcantarillas, pero el error es mucho menor al encontrado en los dos subtramos analizados anteriormente.

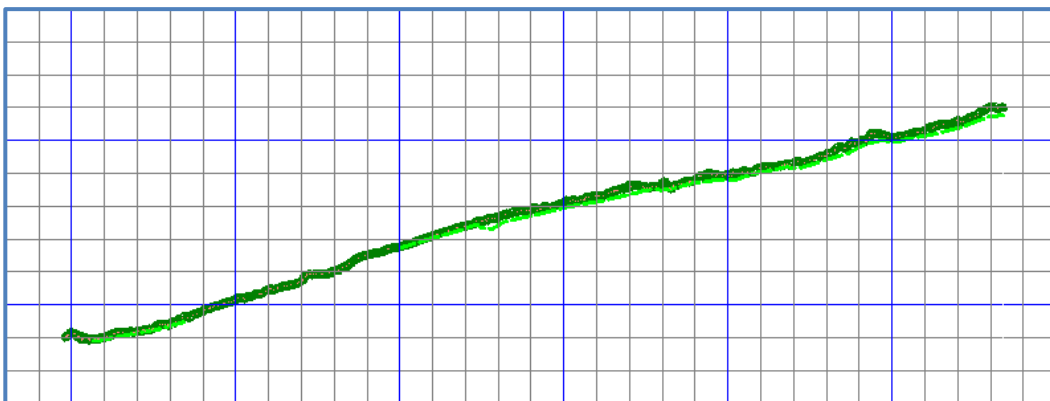
Figura 70. **Perfil longitudinal de diferencias de cotas en el subtramo c:
del km 139+520 al km 140+280**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Para el último tramo analizado donde se encuentra vegetación menos densa y construcciones de un poblado, muestra mejores condiciones, no importando las construcciones adyacentes al proyecto.

Figura 71. **Perfil longitudinal de diferencia de cotas para el subtramo d:
del km 140+520 al km 141+060**



Fuente: elaboración propia, empleando AutoCAD civil 3D.

Tabla XXV. **Subtramo c del km 139+520 al km 140+300**

ID	Estación	e	e²
1	139+520	0.19	0.0361
2	139+540	0.23	0.0529
3	139+560	0.35	0.1225
4	139+580	0.19	0.0361
5	139+600	0.26	0.0676
6	139+620	0.37	0.1369
7	139+640	0.03	0.0009
8	139+660	0.06	0.0036
9	139+680	0.10	0.0100
10	139+700	0.13	0.0169
11	139+720	0.34	0.1156
12	139+740	0.28	0.0784
13	139+760	0.26	0.0676
14	139+780	0.45	0.2025
15	139+800	0.61	0.3721
16	139+820	0.29	0.0841
17	139+840	0.10	0.0100
18	139+860	0.06	0.0036
19	139+880	0.19	0.0361
20	139+900	0.31	0.0961
21	139+920	0.44	0.1936
22	139+940	0.51	0.2601
23	139+960	0.42	0.1764
24	139+980	0.20	0.0400
25	140+000	0.39	0.1521
26	140+020	0.27	0.0729
27	140+040	0.34	0.1156
28	140+060	0.41	0.1681
29	140+080	0.15	0.0225
30	140+100	0.18	0.0324
31	140+120	0.00	0.0000
32	140+140	0.06	0.0036
33	140+160	0.33	0.1089
34	140+180	0.02	0.0004
35	140+200	0.26	0.0676
36	140+220	0.19	0.0361
37	140+240	0.10	0.0100
38	140+260	0.21	0.0441
39	140+280	0.04	0.0016
Sumatoria e²			3.0556
Número de muestras (n)			39
Promedio			0.0783
Desviación estándar			0.0820
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			0.2799
p vertical (95%)			0.54862048
95 Percentil			0.822930725

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Una tabla resumen muestra los valores encontrados al analizado ambos perfiles. Estos valores son ligeramente más altos que el tramo anterior pero mucho mejor que los datos obtenidos de los primeros dos subtramos analizados en este trabajo. La vegetación siempre ha sido menor que el subtramo a) y varían de plantaciones con árboles de hule a cañaverales.

Tabla XXVI. **Subtramo d: del km 140+500 al km 141+100**

ID	Estación	e	e ²
1	140+520	0.12	0.0144
2	140+540	0.06	0.0036
3	140+560	0.14	0.0196
4	140+580	0.14	0.0196
5	140+600	0.14	0.0196
6	140+620	0.14	0.0196
7	140+640	0.14	0.0196
8	140+660	0.14	0.0196
9	140+680	0.14	0.0196
10	140+700	0.14	0.0196
11	140+720	0.13	0.0169
12	140+740	0.15	0.0225
13	140+760	0.52	0.2704
14	140+780	0.36	0.1296
15	140+800	0.35	0.1225
16	140+820	0.38	0.1444
17	140+840	0.59	0.3481
18	140+860	0.44	0.1936
19	140+880	0.18	0.0324
20	140+900	0.27	0.0729
21	140+920	0.28	0.0784
22	140+940	0.31	0.0961
23	140+960	0.32	0.1024
24	140+980	0.35	0.1225
25	141+000	0.22	0.0484
26	141+020	0.33	0.1089
27	141+040	0.44	0.1936
28	141+060	0.52	0.2704
Sumatoria ei²			2.5488
Número de muestras (n)			28
Promedio			0.0910
Desviación estándar			0.0920
Raíz del error cuadrático medio (RMSE)			0.3017
p vertical (95%)			0.59135045
95 Percentil			0.887025682

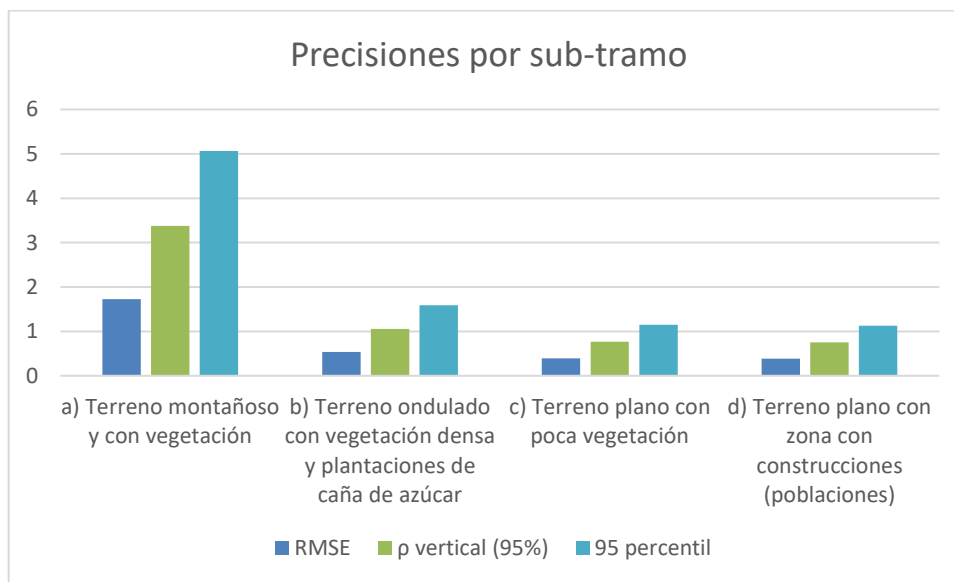
Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

8. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De las 3 metodologías utilizadas y mostradas anteriormente para analizar los datos LiDAR contra la topografía convencional, el primero, punto a punto utiliza conceptos recomendados en las normativas de la ASPRS, normas técnicas colombianas del ICONTEC, Manual de carreteras de Chile, entre otros.

Al graficar cada uno de los subtramos analizados con su correspondiente valor de raíz del error cuadrático medio (RMSE) y su correspondiente valor al 95% de confianza se obtiene la siguiente gráfica.

Figura 72. **Precisiones por cada subtramo analizado**



Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Los valores encontrados en las 4 zonas muestran una relación directa entre la cantidad y tipo de vegetación encontrada. Las zonas con construcciones muestran mejores resultados que los donde el terreno es montañoso y con vegetación. En este caso la vegetación del tramo a es plantaciones de hule y en las demás es una mezcla entre cañaverales y árboles dispersos.

Al realizar la revisión de estos valores con las normativas se tienen los siguientes resultados:

8.1. Análisis mediante estándares para precisión de datos geoespaciales de la ASPRS y normativa colombiana NTC 5205

Normativas aprobadas en el año 2014 muestran el tipo de clase que corresponde los datos obtenidos por los análisis de capítulo anterior:

Tabla XXVII. **Precisiones para datos geoespaciales**

Clase según precisión de datos verticales	RMSE _z en terrenos sin vegetación (cm)	Precisión en terreno Sin vegetación (PTSV) 95% nivel de confiabilidad (cm) RMSE _z * 1.96	Precisión en terreno con vegetación (PTCV) 95 percentil (cm) RMSE _z * 1.96 * 1.5
I	1	2	2.9
II	2.5	4.9	7.4
III	5	9.8	14.7
IV	10	19.6	29.4
V	12.5	24.5	36.8
VI	20	39.2	58.8
VII	33.3	65.3	98.0
VIII	66.7	130.7	196.0
IX	100	196	294.0
X	333.3	653.3	980.0

Fuente: ASPRS. (2014). *Estándares de precisión para datos geoespaciales*.

La norma de la ASPRS del 2014, clasifica por clases las precisiones obtenidas, haciendo una separación entre terrenos sin vegetación (PTSV) y terrenos con vegetación (PTCV).

Como se mencionó anteriormente, las normas de la ASPRS recomiendan que para terrenos sin vegetación se utilice la RMSE al 95% de confiabilidad mientras que para terrenos con vegetación el 95 percentil. Según el análisis anterior tenemos:

Tabla XXVIII. Análisis de los resultados obtenidos

Descripción de zonas analizadas	95 percentil
a) Terreno montañoso y con vegetación	5.06510
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	1.58681
c) Terreno plano con poca vegetación	1.15239
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	1.12591

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

La normativa de la ASPRS recomienda que en áreas con vegetación es necesario una mayor densidad de puntos LiDAR para mejorar la interpolación entre cada punto y mejorar la precisión de la superficie. En lugares montañosos es más crítico la precisión porque los retornos LiDAR no mostrarán los cambios de superficie.

Las precisiones verticales, están asociadas a la densidad de pulsos del LiDAR, siendo necesario tomar en cuenta si los terrenos a ser levantados con esta metodología, poseen vegetación para poder definir cuantos retornos serán necesarios para poder tocar el terreno. Además de eso la densidad está

relacionada directamente a los intervalos de curvas de nivel a ser creadas con el MDT. ASPR recomienda que para levantamiento LiDAR donde se necesitarán curvas de nivel a cada metro, como dicen las especificaciones de diseño de carreteras la clase de levantamiento debe ser como mínimo VII, son una densidad de 0.25 puntos/m².

Tabla XXIX. **Densidad nominal recomendada por clase**

Clase según precisión de datos verticales	RMSEz en terrenos sin vegetación (cm)	Precisión vertical en terrenos sin vegetación (PTSV) con 95% nivel de confianza (cm)	Precisión vertical terrenos con vegetación (PVTV) con 95 percentil (cm)	Valores apropiados para intervalos de curvas de nivelación según RMSEz	Densidad nominal (Puntos por metro cuadrado)/ recomendada según clase (pts./m ²)
I	1	2	2.9	3 cm	≥20
II	2.5	4.9	7.4	7.5 cm	16
III	5	9.8	14.7	15 cm (~6")	8
IV	10	19.6	29.4	30 cm (~1')	2
V	12.5	24.5	36.8	37.5 cm	1
VI	20	39.2	58.8	60 cm (~2')	0.5
VII	33.3	65.3	98.0	1-metro	0.25
VIII	66.7	130.7	196.0	2-metros	0.1
IX	100	196	294.0	3-metros	0.05
X	333.3	653.3	980.0	10-metros	0.01

Fuente: ASPRS. (2014). *Estándares de precisión para datos geoespaciales*.

Para el caso de las áreas analizadas en la CA-2 se tiene que los 2 primeros tramos analizados se pueden obtener curvas de nivel con intervalos de 2 a 10 metros. Esto ya nos da una referencia para saber qué grado de precisión tiene el levantamiento de datos LiDAR obtuvo con las condiciones por sub-tramo. Debe dejarse claro, que esto solo es un análisis particular para este proyecto y con las condiciones técnicas, topográficas utilizadas durante la metodología de obtención de datos y no una evaluación general al LiDAR.

Tabla XXX. **Intervalos de curvas de nivel según clase por subtramo**

Descripción de zonas analizadas	<u>95 percentil (metros)</u>	95 percentil (cm)	Clase	Intervalos de curvas de nivel recomendados
a) Terreno montañoso y con vegetación	5.06510	506.510	X	10 metros
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	1.58681	158.681	VIII	2 metros
c) Terreno plano con poca vegetación	1.15239	115.239	VIII	2 metros
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	1.12591	112.591	VIII	2 metros

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

8.2. Análisis mediante el manual de carreteras de Chile

Al revisar los datos analizados con la normativa del manual de carreteras de la Dirección de Vialidad de Chile, y tomando de base que la escala de los planos a presentar en diseños geométricos indicados por la DGC es 1: 1,000, con curvas de nivel a cada metro, la norma chilena indica que la altimetría debe estar de 0.25 a 0.50 m el 10% de la muestra.

Tabla XXXI. **Tolerancias según las normas chilenas**

Escala del Plano	Curvas de Nivel cada (m)	Verificación en Terreno	
		No más de 10% de la Muestra presentará un error mayor que	
		Planimetría (m)	Altimetría (m) ⁽¹⁾
1:500	0,50	0,15	0,15 – 0,25
1:1.000	1,00	0,25	0,25 – 0,50
1:2.000	2,00	0,50	0,50 – 1,00

⁽¹⁾: El rango de precisiones corresponde a tipos de superficies, considerando que para suelos descubiertos y planos se tienen los valores menores y los más altos, para tipos de suelos escarpados y con algún grado de vegetación.

Fuente: Dirección de vialidad. (2018). *Procedimientos de estudios viales*.

La norma indica que no más del 10% debe de estar fuera de estos valores, para el caso de los tramos analizados en la CA-2 se tiene lo siguiente:

Tabla XXXII. Número de muestras por tramo

Descripción de zonas analizadas	Número de muestras	10% según norma
a) Terreno montañoso y con vegetación	1930	193
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	223	22
c) Terreno plano con poca vegetación	810	81
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	976	98

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

De lo anterior tenemos que para cada caso se tiene un número de muestras que corresponden al 10% que, como máximo pueden pasar el valor indicado para la norma es decir 0.25 – 0.50 m la diferencia de cotas. Los tramos muestran los siguientes resultados:

Tabla XXXIII. Análisis de errores para curvas de nivel con intervalo de 1 m

Descripción de zonas analizadas	Datos dentro del rango	Porcentaje dentro del rango	Porcentaje fuera del rango	Análisis según normativa
a) Terreno montañoso y con vegetación	997	52%	48%	No cumple con la norma
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	156	70%	30%	No cumple con la norma
c) Terreno plano con poca vegetación	706	87%	13%	No cumple
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	824	84%	16%	No cumple

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

El análisis muestra que los datos no cumplen la normativa chilena para generar curvas de nivel de 1.0 de intervalo con el levantamiento LiDAR realizado, los tramos a y b tienen valores más elevados, considerando que son terrenos montañosos y con más vegetación. Los tramos c y d, muestran mejores datos, por ser zonas planas y con poca vegetación, pero aún están fuera del rango indicado.

Sin embargo, analizando el siguiente parámetro de la norma, para rangos de precisión de 0.50 a 1.0 de error, se tienen los siguientes resultados:

Tabla XXXIV. **Análisis de errores para curvas de nivel con intervalo de 2 m**

Descripción de zonas analizadas	Datos dentro del rango	Porcentaje dentro del rango	Porcentaje fuera del rango	Análisis según normativa
a) Terreno montañoso y con vegetación	1469	76%	24%	No cumple con la norma
b) Terreno ondulado con vegetación densa y plantaciones de caña de azúcar	208	93%	7%	Si cumple con la norma
c) Terreno plano con poca vegetación	796	98%	2%	Si cumple con la norma
d) Terreno plano con zona con construcciones (poblaciones)	968	99%	1%	Si cumple con la norma

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

En este sentido, los tramos b, c y d cumplen con lo indicado por la norma chilena para generar curvas de nivel con intervalos de 2.0 m. El tramo a, sigue sin cumplir la normativa.

CONCLUSIONES

1. Las comparaciones entre los dos modelos digitales de terreno (LiDAR y topografía convencional) mostraron diferencias considerables cuando los terrenos poseen vegetación densa. En zonas más montañosas, al comparar los datos, se muestran mayores errores que los encontrados en las zonas planas. Las diferencias se hicieron más pequeñas en zonas descubiertas o con plantaciones dispersas.
2. Ambos métodos presentan confiabilidades que dependen de diversos factores, como la calibración del equipo, la red base geoposicionada y la experiencia de los técnicos al momento de realizar las mediciones en campo. Contar con una red de puntos de apoyo aumentó la confiabilidad de los datos obtenidos en campo.
3. Las normativas de los países analizados, tienen variaciones en sus lecturas, debido a las condiciones propias de cada uno, por ejemplo, las de Colombia, Chile y las norteamericanas, tienen las mismas formas de evaluar las diferencias y clasificaciones de los datos obtenidos con tecnología LiDAR.
4. Una de las principales ventajas de estos métodos, es que permiten al profesional que lo utilizará, decidir qué tanta precisión espera obtener en el estudio a realizar. Ambos métodos brindan muchas ventajas, las cuales contribuirán a crear diseños más realistas.

RECOMENDACIONES

1. Realizar controles de calidad durante los levantamientos en campo. Esto se logrará mediante el uso de puntos de control, cuyo número dependerán de la extensión del proyecto y el nivel de exactitud que se desee obtener.

La siguiente tabla, muestra cuántos puntos deben colocarse según la extensión del proyecto:

Tabla XXXV. **Puntos de control recomendados por área del proyecto**

Área del Proyecto (kilómetros cuadrados)	Chequeo Horizontal	Chequeo vertical		
	Puntos de control horizontal estáticos	Puntos de control vertical estático para terrenos sin vegetación (TSV)	Puntos de control vertical estáticos para terrenos con vegetación (TCV)	Total de puntos verticales estáticos
≤500	20	20	5	20
501-750	25	20	10	30
751-1000	30	25	15	40
1001-1250	35	30	20	50
1251-1500	40	35	25	60
1501-1750	45	40	30	70
1751-2000	50	45	35	80
2001-2250	55	50	40	90
2251-2500	60	55	45	100

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

2. Utilizar el método que mejor resultados brinde, según la fase del proyecto que corresponda, tal como se muestra en la siguiente tabla:

Tabla XXXVI. **Recomendación de metodología a usar según la fase del proyecto**

Metodología	Fase 1 Prefactibilidad	Fase 2 Factibilidad	Fase 3 Ingeniería de detalle
Topografía convencional	No necesaria	Aplica	Aplica
LiDAR	Aplica	Aplica	No recomendada en zonas con vegetación (realizar estudios topográficos complementarios)

Fuente: elaboración propia, empleando Excel.

Pueden, además, utilizarse ambos métodos, con los respectivos controles de calidad en campo, previo a ser utilizados los datos finales para el diseño de la obra.

3. Se recomienda la tecnología LiDAR para la ubicación de quebradas y demás cuerpos hídricos en el diseño de drenaje menor como cunetas, disipadores de energía, etc. por el mayor detalle de información proporcionada durante sus lecturas.

BIBLIOGRAFÍA

1. (NGA), U. N.-I. (2018). U.S. *National Geospatial-Intelligence Agency (NGA)*. Recuperado de <http://earth-info.nga.mil/GandG/wgs84/>
2. Agencia Espacial Europea (ESA). (2011). Recuperado de https://m.esa.int/esl/ESA_in_your_country/Spain/
3. ASPRS. (2014). *New Standard for New Era: Overview of the 2015. Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. ASPRS. EE.UU.: ASPRS Standards.
4. Autodesk, Inc. (2018). *Manual del usuario*. San Rafael, California, EE.UU.: Autodesk, Inc.
5. Berg, R. y Ferguson, J. (2000). *Airbone Laser Mapping for Highway Engineering Applications*. Ontario: Ministry of Transportation Ontario.
6. Berrocoso, M. (2012). *Los sistemas GNSS: la última revolución geodésicas*. Sevilla: Universidad de Cádiz.
7. Buill, F., Núñez, A., y Rodríguez, J. (2003). *Fotogrametría analítica*. Barcelona: Ediciones UPC, S.L.
8. Castillo García, J. (2017). *Breve explicación del sistema de coordenadas GTM v.2.0*. Guatemala: Sin editorial.

9. Comisión Nacional de Riego. (2014). *Manual de procedimientos geodésicos y topográficos*. Santiago: División de Estudios, Desarrollo y Políticas. Chile.
10. Dirección de Vialidad. (2018). *Manual de carreteras*. Santiago: Ministerio de Obras Públicas. Chile.
11. ESRI. (2018). *El geoide, el elipsoide, el esferoide y el datum*. ArcGIS for Desktop. Recuperado de <http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/>
12. Farjas, M. (2006). *Aplicaciones topográficas del G.P.S.* (Tesis fin de grado). Universidad Politécnica de Madrid. España.
13. Fecilísimo, A. (2014). *Modelos digitales de terreno* (Tesis fin de grado). Universidad de Oviedo. España.
14. Galindo, Y., y Villarraga, J. (2017). *Comparación de la eficiencia lograda en el uso de modelos digitales de terreno generados a partir de topografía convencional y tecnología LiDAR en proyectos de Infraestructura vial* (Tesis fin de grado). Universidad de Santo Tomás de Aquino. Colombia.
15. GIS Geography. (2018). *GIS Geography*. Recuperado de <https://gisgeography.com/dem-dsm-dtm-differences/>
16. GISGEEK. (2014). *¿Qué es el Datum? ¿Usamos ITRF92 o WGS84?* Recuperado de <http://sig-geek.blogspot.com/>

17. González, P. (2015). *Levantamiento mediante GPS de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la Universidad en el mismo sistema de coordenadas* (Tesis fin de grado). Universidad Politécnica de Cartagena. Colombia.
18. Han, J. (2014). *Road Boundary Detection And Tracking For Structured And Tracking for Structured and Unstructured Roads using a 2D LiDAR*. Seúl: Seúl editions. Corea del Sur.
19. Horizons South America S.A.C. (2011). *Propuesta técnica autopista CA-2 Guatemala ver. A*. Lima: Horizons South America. Perú.
20. Ibañez Martínez, E. (2007). *Validación del modelo digital del terreno generado con Láser Escáner Aerotransportado (LiDAR) en zona de Matasgordas* (Tesis fin de grado). Politécnico de Cataluña. España.
21. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). (2003). *Precision of spacial data*. Bogotá: Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (ICONTEC). Colombia.
22. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2003). *Precisión de las redes geodésicas*. Bogotá: ICONTEC. Colombia.
23. International Earth Rotation and Reference Systems Service. (2013). *The International Terrestrial Reference System (ITRS)*. Recuperado de <https://www.iers.org/iers/EN/Science/ITRS/ITRS.html>
24. Jauregui, L. (2012). *Fotogrametría* (Tesis fin de grado) Universidad de los Andes. Colombia.

25. Jiménez-Perálvarez, J. (2012). *Movimientos de ladera en la vertiente meridional de Sierra Nevada* (Tesis fin de grado). Universidad de Granada, España.
26. Kaplan, E., y Hegarty, C. (2006). *Understanding GPS*. Londres: Artech House. EE.UU.
27. Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda. (2001). *Especificaciones generales para la construcción de carreteras y puentes*. Guatemala: Ingenieros Consultores de Centroamérica.
28. National Geographic. (febrero de 2018). *Exclusive: Laser Scans Reveal Maya "Megalopolis" Below Guatemalan Jungle*. Recuperado de <https://news.nationalgeographic.com/2018/02/maya-laser-lidar-guatemala-pacunam/>
29. National Imagery and Mapping Agency. (2000). *Department of Defense World Geodetic System 1984*. EE.UU.: NIMA.
30. Olaya, V. (2004). *Sistemas de información geográfica*. España: CreateSpace. Independent Publishing Platform.
31. Reddit. (2015). *Surveying*. Recuperado de <https://www.reddit.com/>
32. Rodríguez, J. (2014). *Geomática en proyectos viales* (Tesis fin de grado). Universidad de Quindío. Colombia.
33. Rodríguez, A. (2015). *Estudios de factibilidad del proyecto Bogotá - Girardot*. Bogotá: Sin editorial. Colombia.

34. Salinas, W., Paredes, C., Martínez, X., y Cortina, F. (2014). *Evaluación de la exactitud posicional vertical de una nube de puntos topográficos LiDAR usando topografía convencional como referencia*. México: Investigaciones Geográficas. México.
35. Sánchez, L. (2004). *Adopción del marco geocéntrico nacional de referencia MAGNA-SIRGAS como datum oficial de Colombia*. Bogotá: Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Colombia.
36. Sánchez, J. (2006). *Introducción a la fotogrametría* (Tesis fin de grado). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. España.
37. Sánchez, G. (2012). *Sistema de posicionamiento global (GPS) y las teorías de la relatividad* (Tesis fin de grado). Universidad de Madrid. España.
40. Sarría, F. (2006). *Sistemas de información geográfica* (Tesis fin de grado). Universidad de Murcia. España.
41. SIRGAS. (2018). *SIRGAS*. Recuperado de <http://www.sirgas.org/es/>
42. Soria, M. (2014). *Metodología para ejecución y control de calidad para ortofotos, mediante combinación de sensor digital con LiDAR en zonas rurales* (Tesis fin de grado). Universidad Politécnica de Madrid. España.

43. Spatial Media and Services Enterprises. (2018). *GIS Resources*. Recuperado de <http://www.gisresources.com/confused-dem-dtm-dsm/>
44. The American Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ASPRS). (2004). *Geospatial Data Accuracy and the New Mapping Accuracy Standard*. EEUU: ASPRS.
45. Tierra, A. (2009). *Evaluación del EGM08 Y EGM96 en el Ecuador a partir de datos GPS y nivelación geométrica*. Sangolquí: Centro de Investigaciones Científicas, Escuela Politécnica del Ejército.
46. Van Sickle, J. (2015). *GPS for Land Surveyors*. Boca Raton, Florida: Taylor y Francis Group, LLC.
47. Villarreal, A., y Hernández, S. (2010). *Herramienta de software para el diseño asistido de vías* (Tesis fin de grado). Universidad Industrial de Santander. Colombia.
48. Wolf, P., DeWitt, B., y Wilkinson, B. (2014). *Elements of Photogrammetry with applications in GIS*. Madison: McGraw-Hill Education.