



Generación de una metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR

mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE,

SANGOLQUÍ.

Vega Jaguaco, Johanna Carolina

Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del título de Ingeniera Geógrafa y del Medio

Ambiente.

Ing. Kirby Powney, Eduardo Patricio Msc.

09 de septiembre del 2021



Document Information

Analyzed document	TESIS_JOHANNA VEGA.pdf (D111834546)
Submitted	8/30/2021 3:35:00 PM
Submitted by	
Submitter email	biblioteca@espe.edu.ec
Similarity	5%
Analysis address	ibiblioteca.GDC@analysis.urkund.com

**EDUARDO
PATRICIO
KIRBY
POWNEY**

Firmado digitalmente por
EDUARDO
PATRICIO KIRBY
POWNEY.
Fecha: 2021.09.01
16:22:37 -05'00'

Sources included in the report

W	URL: https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12063/5/T-ESPE-049354.pdf Fetched: 11/20/2019 11:34:30 PM	10
W	URL: http://oa.upm.es/33673/1/PFC_MIGUEL_CREPO_MAZO.pdf Fetched: 2/8/2021 9:01:14 PM	3
W	URL: https://docplayer.es/88662556-Universidad-del-azuay-departamento-de-posgrados.html Fetched: 5/15/2021 1:55:20 PM	9
SA	TESIS_JIMENEZPEREZLIZBETH.pdf Document TESIS_JIMENEZPEREZLIZBETH.pdf (D77470960)	2
W	URL: https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/21429/2019jesusmarino.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 8/30/2021 3:37:00 PM	3
W	URL: https://icf.unse.edu.ar/wp-content/uploads/2014/07/SD-43-Drones-y-su-aplicacion-a-la-ingenieria-REUTER_r.pdf Fetched: 2/2/2021 12:11:22 AM	1
W	URL: https://docplayer.es/90096977-Facultad-de-ingenieria-t-e-s-i-s-que-para-obtener-el-titulo-de-ingeniero-geomatico-presenta-diego-ramirez-guerrero.html Fetched: 11/20/2019 11:28:22 PM	2
W	URL: https://www.oceandocs.org/bitstream/handle/1834/8155/Tesis%20Delgado.pdf?sequence=1&isAllowed=y Fetched: 12/22/2020 11:45:21 AM	1
W	URL: http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/Final_papers/Samberg_2007.pdf Fetched: 8/30/2021 3:37:00 PM	1
W	URL: https://docplayer.es/47380855-Master-en-ingenieria-de-los-recursos-naturales.html Fetched: 3/29/2021 11:10:42 AM	4
SA	19_C_3er_totalcorregido_VA_AE_corregido_LIZBETH JIMENEZ_FEBRERO2019_V2_CA_AGOSTO2019.doc.pdf Document 19_C_3er_totalcorregido_VA_AE_corregido_LIZBETH JIMENEZ_FEBRERO2019_V2_CA_AGOSTO2019.doc.pdf (D56764882)	2



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Generación de una Metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE, SANGOLQUI" fue realizado por la señorita Vega Jaguaco, Johanna Carolina; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además ha sido revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Sangolquí, 06 de septiembre de 2021

Firma:

EDUARDO
PATRICIO
KIRBY POWNEY

Firmado digitalmente
por EDUARDO PATRICIO
KIRBY POWNEY
Fecha: 2021.09.15
16:15:52 -0500'



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

Responsabilidad de Autoría

Yo, **Vega Jaguaco, Johanna Carolina**, con cédula de ciudadanía n° 1724510282, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **Generación de una Metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE, SANGOLQUÍ** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Sangolquí, 10 de septiembre de 2021

Firma:

Vega Jaguaco, Johanna Carolina

C.C.: 1724510282



Departamento de Ciencias de la Tierra y de la Construcción

Carrera de Ingeniería Geográfica y del Medio Ambiente.

Autorización de Publicación

Yo, **Vega Jaguaco, Johanna Carolina**, con cédula de ciudadanía n° 1724510282, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **Generación de una Metodología para el procesamiento de nubes de puntos LIDAR mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, UAV, en el campus ESPE, SANGOLQUÍ** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi/nuestra responsabilidad.

Sangolquí, 10 de septiembre de 2021

Firma:

Vega Jaguaco, Johanna Carolina

C.C.: 1724510282

DEDICATORIA

Quiero dedicar este trabajo a mi hijo, él se merece cada uno de mis logros por que fue el quién me devolvió las ganas de vivir y luchar. Estuvo día a tras día pendiente de mi tesis y limpiando mis lágrimas en cada caída: " Que dijimos, que ya no íbamos a llorar". Su ternura y dulzura permitieron que cada palabra fluya en esta tesis. Isaías me enseñó que cualquier momento es perfecto para ser valiente, y tal vez no lo comprende en su totalidad, pero espero que un día leas esto y te sientas orgulloso de la madre que tienes, que, aunque temerosa y llorona nunca se rindió gracias a tu apoyo.

Y así como a mi hijo a mi madre, Nelly Jaguaco, te dedico cada uno de mis días de llanto y estudio, porque solo tú sabes todo lo que hay detrás de estas páginas, por tu valentía y tenacidad, tus sonrisas y detalles llenos de amor, este logro es nuestra mami.

También a mi papi, Angel Vega, a mis hermanos, Cinthi y Miguel Vega, tíos; Mary Jaguaco, Fanny Jaguaco, Abelardo Flores y abuelitos, Sarita Espín y Miguel Jaguaco; les dedico mi investigación como homenaje a su amor. Todos son testigos del empeño y dedicación que le he puesto a mi carrera y quiero hacerlos participe de este logro, para ustedes con todo mi cariño y admiración.

Y por último a Pablito Pedraza, te dedico este trabajo porque eres mi compañero de tesis no oficial, pero sin toda tu ayuda esto hoy no sería posible.

Johanna Vega

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Dios por regalarme salud y vida; y por cada una de las personas que ha puesto en este camino.

Agradezco inmensamente a mi madre, Nelly Jaguaco, que con su infinito amor ha sido un ejemplo total de mujer, algún día espero ser un poco como ella. A mi padre, Ángel Vega, que me ha enseñado que ante la adversidad no queda más que seguir. Mis hermanos, Cinthi y Miguel, les agradezco por resistir cada batalla a mi lado y cuidar de mi pequeño.

A mis papitos, Sarita y Miguel por el amor que le dedican a cada uno de sus seres queridos y por alimentar mi alma cada día que viajaba a la Universidad, por estar con Isaías y ser unos padres para él también. Gracias por los detalles que hacen de nuestra casa un hogar y por las innumerables enseñanzas que me entregan, ellos son los pilares fundamentales en mi familia y son la ejemplificación de amor.

Al Ingeniero Eduardo Kirby, por tener fe en mí y cada una de las palabras de sabiduría compartidas en este largo camino, por ponerse en mi lugar y ser un amigo en este proceso.

Al cuerpo de bomberos, específicamente al escuadrón RPAS UIO; al coronel Vallejo a cargo de esta unidad y en especial a los bomberos: Ricardo, Ismael y Damaris que no dudaron en brindar su apoyo a esta investigación.

A la empresa Lutopsa, quien bien la dirige el Ingeniero Marcelo Tabango y un agradecimiento especial al Arquitecto Molina, Antonella y Diego que brindaron respuesta a cada una de mis dudas.

También a la Doctora Sandra Bujan que con su conocimiento me permitió incursionar en el mundo del LIDAR y compartió conmigo todo lo que se pudo en medio de las condiciones, muchísimas gracias.

Al Ingeniero Iván Pazmiño, que de igual manera en medio de todas sus ocupaciones se dio un tiempo para extender su apoyo en este proyecto, en colaboración con Jofre y Santi.

Por último, a cada uno de mis amigos que hicieron que la universidad sea una aventura con lágrimas, risas, madrugadas, chismes, bailes y bromas: Karysita, con ese corazón de oro; Krupsita, la vida a tu lado es una fiesta; mi Andre, eres la viva figura de lealtad; Alejita, gracias por los colores más lindos que vi durante años y Katty, por ser incondicional y detallista, las amo mujeres. Y aunque no eres del team de las chicas, Pablito eres el amigo más leal que conocí, gracias por nunca soltarme y por todos los momentos compartidos.

Al igual que mis compañeros de carrera y docentes del departamento de Ciencias de la Tierra y Construcción en el proceso de educación y en especial en el embarazo, nunca voy a olvidar el detalle y la comprensión que tuvieron en esa época tan difícil.

¡Gracias por ser, estar y existir!

Johanna Vega

ÍNDICE DE CONTENIDO

Urkund.....	2
Certificación.....	3
Responsabilidad de Autoría.....	4
Autorización de Publicación.....	5
Dedicatoria	6
Agradecimientos.....	7
Resumen.....	21
Abstract.....	22
Capítulo I.....	23
Aspectos Generales	23
Introducción	23
Planteamiento del problema	25
Justificación e importancia	26
Descripción del área de estudio	27
Objetivos.....	28
Objetivo General	28
Objetivos Específicos	28
Metas.....	28
Capítulo II.....	30
Marco Teórico	30

	10
Fundamentos de sensores remotos	30
Definición de teledetección	30
Fotogrametría de corto alcance	30
Espectro electromagnético	31
Plataformas y tipos de sensores en teledetección.....	32
Plataformas	32
Tipos de sensores	38
Tecnología LiDAR.....	38
Componentes LIDAR.....	40
Tipos de sensores LiDAR	40
Tipos de escaneado	43
Nube de puntos	47
Formato de los archivos	50
Planificación de vuelo	54
DJI PILOT	55
Ejecución del vuelo	56
VYO	56
Posicionamiento GNSS-GPS	56
Métodos de observación	56
Equipos y programas.....	57
Archivos LAS	58

Procesamiento de las nubes de puntos LiDAR	58
Depurado	58
Clasificación de las nubes de puntos.....	59
Filtrado	61
Modelos/VARIABLES LiDAR.....	61
Estadísticas y Control de Calidad	62
Estadísticos.....	62
Control de calidad	63
Capítulo III.....	65
Metodología	65
Generalidades	65
Recopilación de información secundaria.....	66
Obtención de datos LiDAR.....	67
Determinación de zonas de estudio piloto	67
Plan de vuelo	68
Ejecución del vuelo	69
Descarga de datos	70
Obtención del archivo LAS	72
Parámetros modificados en el plan de vuelo	73
Procesamiento de la información LiDAR.....	75
Reducción de la densidad de puntos.....	76

	12
Depuración de la nube de puntos	77
Clasificación Automática	79
Clasificación Manual.....	82
Obtención de Imágenes de Intensidad	85
Obtención de Modelos digitales (MDS/MDE)	85
Modelo digital de superficie	85
Modelo digital de elevación	86
Exactitud Posicional.....	87
Planificación puntos de control y puntos de evaluación	87
Exactitud posicional externa horizontal en infraestructura	92
Exactitud posicional externa vertical en infraestructura	94
Exactitud posicional externa horizontal en terreno.....	95
Exactitud posicional externa vertical en terreno.....	97
Capítulo IV	99
Resultados	99
Resultado del diseño de las zonas de estudio piloto	99
Resultados de la obtención del archivo. LAS	100
Resultados de la ejecución de los vuelos.....	102
Resultados reducción de la densidad de puntos	106
Resultados de la aplicación de la herramienta catalog	106
Resultados herramienta Thin Data,	107

Resultados de la depuración de la nube de puntos.....	110
Resultados depuración manual de errores groseros.....	110
Resultados depuración automática de puntos de ruido	111
Resultados clasificación nube de puntos Lidar.....	114
Resultados clasificación automática	114
Resultados clasificación manual.....	117
Resultados de obtención de Imágenes de Intensidad.....	120
Resultados de obtención de Modelos digitales (MDS/MDE)	123
Resultados de exactitud posicional	127
Resultados puntos de control y puntos de evaluación	127
Resultados de Exactitud posicional externa vertical en infraestructura.....	135
Resultados de Exactitud posicional externa horizontal en terreno	139
Resultados de Exactitud posicional externa vertical en terreno	144
Capítulo V	148
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	148
Conclusiones	148
Recomendaciones	150
Capítulo VI	152
BIBLIOGRAFÍA	152
ANEXOS	161

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características UAS, según el tipo de sustentación.....	36
Tabla 2. Especificaciones UAV Matrice 600 PRO	37
Tabla 3. Características del sensor Velodyne	43
Tabla 4. Formatos digitales de modelos LIDAR	51
Tabla 5. Evolución de las versiones del formato LAS.....	53
Tabla 6. Categoría de clasificación de los datos LIDAR	60
Tabla 7. Planificación de parámetros de vuelo	69
Tabla 8. Parámetros de vuelo realizados	75
Tabla 9. Sintaxis “Catalog”	76
Tabla 10. Sintaxis código ThinData.....	77
Tabla 11. Resultados de planimetría en infraestructura zona piloto 1	131
Tabla 12. Resultados del estadístico Δx Este.....	132
Tabla 13. Resultados del estadístico Δy Norte	132
Tabla 14. Resultados del estadístico distancia euclidiana	133
Tabla 15. Resultados de planimetría en infraestructura zona piloto 2.....	133
Tabla 16. Resultados del estadístico Δx Este.....	134
Tabla 17. Resultados del estadístico Δy Norte	135
Tabla 18. Resultados del estadístico distancia euclidiana	135
Tabla 19. Resultados de altimetría en infraestructura zona piloto 1	136
Tabla 20. Resultados del estadístico Δz Elevación	137
Tabla 21. Resultados de altimetría en infraestructura zona piloto 2	137
Tabla 22. Resultados del estadístico Δz Elevación	138
Tabla 23. Resultados de planimetría en suelo zona piloto 1.....	139
Tabla 24. Resultados del estadístico Δx Este.....	140

Tabla 25. Resultados del estadístico Δy Norte	140
Tabla 26. Resultados del estadístico distancia euclidiana	141
Tabla 27. Resultados de planimetría en suelo de la zona piloto 2	141
Tabla 28. Resultados del estadístico Δx Este.....	142
Tabla 29. Resultados del estadístico Δy Norte	143
Tabla 30. Resultados del estadístico distancia euclidiana	143
Tabla 31. Resultados de altimetría en suelo zona piloto 1.....	144
Tabla 32. Resultados del estadístico Δz Elevación	145
Tabla 33. Resultados de altimetría en suelo zona piloto 2.....	145
Tabla 34. Resultados del estadístico Δz Elevación	146
Tabla 35. Resumen de estadísticos evaluados en planimetría y altimetría.....	147

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación zona de estudio	27
Figura 2. Espectro electromagnético.....	32
Figura 3. Tipos de plataformas	33
Figura 4. Distribución de los elementos en un UAS	34
Figura 5. Clasificación de UAV's por el tipo de Aeronave y despegue del equipo	35
Figura 6. Matrice 600 pro.....	38
Figura 7. Ilustración del proceso de escaneo láser LiDAR aerotransportado.	40
Figura 8. Componentes sistema ToF	41
Figura 9. Componentes sistema Phase-based	42
Figura 10. Clasificación de las técnicas de escaneo láser	44
Figura 11. Geometrías trazadas con escáner LIDAR.....	44
Figura 12. Método de escaneo Zig-Zag	45
Figura 13. Método de escaneo líneas paralelas.....	46
Figura 14. Método de escaneo pushbroom.....	46
Figura 15. Método de escaneo elíptico	47
Figura 16. Retornos (pulso o eco).....	49
Figura 17. Imágenes de retornos LIDAR en un dosel forestal.....	50
Figura 18. Métodos de posicionamiento u observación GNSS.....	57
Figura 19. Detección de puntos erróneos en los Modelos Digitales de Superficie	59
Figura 20. Modelos Digitales	62
Figura 21. Metodología general del proyecto CORREGIR	66
Figura 22. Distribución puntos de control existentes	68
Figura 23. Parámetros de vuelo aplicación DJI Pilot	69
Figura 24. Despegue Drone Matrice 600 pro	70

Figura 25. Descarga de datos brutos	71
Figura 26. Datos crudos de información LIDAR	71
Figura 27. Generación Travel Path en LIDARTool	72
Figura 28. Procesamiento nube de puntos en LIDARTool	73
Figura 29. Formato de grabación.....	77
Figura 30. Proceso de depuración manual de errores groseros.....	78
Figura 31. Proceso de depuración automático de ruido	79
Figura 32. Clasificación Automática de Puntos de suelo.....	80
Figura 33. Clasificación Automática de Puntos de edificios y vegetación.....	81
Figura 34. Proceso de reclasificación	82
Figura 35. Barra de herramientas para la clasificación manual.....	83
Figura 36. Reclasificación por perfiles	83
Figura 37. Parámetros de la herramienta Create Elevation Grid	84
Figura 38. Clases ASPRS habilitadas en Imagen de intensidad	85
Figura 39. Clases ASPRS habilitadas en modelo digital de superficie	86
Figura 40. Clases ASPRS habilitadas en modelo digital de elevación	86
Figura 41. Distribución puntos de control, mojones, puntos GNSS y puntos fotoidentificables.....	88
Figura 42. Planificación puntos de elevación	89
Figura 43. Base de referencia.....	90
Figura 44. Toma del punto RTK.....	90
Figura 45. Distribución puntos de evaluación.....	91
Figura 46. Puntos de evaluación en la zona piloto	92
Figura 47. Ubicación de puntos homólogos con respecto a puntos de evaluación.....	93
Figura 48. Tabla de atributos de los puntos homólogos con sus coordenadas planimétricas	93

Figura 49. Puntos homólogos proyectados en MDS	94
Figura 50. Tabla de atributos de los puntos homólogos con el elenco de coordenadas.	95
Figura 51. Comparativa entre imágenes de intensidad en terreno y superficie.	96
Figura 52. Ubicación puntos homólogos con respecto a puntos de control.....	97
Figura 53. Puntos homólogos proyectados en MDT	98
Figura 54. Resultado zona piloto 1 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.	99
Figura 55. Resultado archivo KML en la zona piloto 1 de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE	100
Figura 56. Resultado en conjunto nube de puntos	101
Figura 57. Resultado de líneas de vuelo independientes de la nube de puntos	101
Figura 58. Resultado del vuelo 1: 70% Longitudinal 15% Lateral Altura 60 m Velocidad 4,5 m/s	102
Figura 59. Resultado del vuelo 2: 70% Longitudinal 15% Lateral Altura 80m Velocidad 4,5 m/s	102
Figura 60. Resultado del vuelo 3: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 60m Velocidad 4,5 m/s	103
Figura 61. Resultado del vuelo 4: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80m Velocidad 4,5 m/s	103
Figura 62. Resultado del vuelo 5: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80m Velocidad 5,5 m/s	104
Figura 63. Resultado del vuelo 6: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80m Velocidad 3,5 m/s	104
Figura 64. Resultado del vuelo 7: 70% Longitudinal 70% Lateral Altura 60m Velocidad 4,5m/s	105

Figura 65. Resultado del vuelo 8: 10% Longitudinal 40% Lateral Altura 45m Velocidad 4,5m/s	105
Figura 66. Imagen del Informe “Catalog” en formato HTML.....	106
Figura 67. Resultados de la aplicación de la herramienta “Catalog” para cada vuelo	107
Figura 68. Resultado de imagen de intensidad del vuelo 7	107
Figura 69. Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 1	108
Figura 70. Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 2.....	108
Figura 71. Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 3.....	109
Figura 72. Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 7	109
Figura 73. Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 8.....	110
Figura 74. Resultado de depuración manual de errores groseros.....	111
Figura 75. Resultado depuración automática del vuelo 1.....	111
Figura 76. Resultado depuración automática del vuelo 2.....	112
Figura 77. Resultado depuración automática del vuelo 3.....	112
Figura 78. Resultado depuración automática del vuelo 7.....	113
Figura 79. Resultado depuración automática del vuelo 8.....	113
Figura 80. Resultado clasificación automática del vuelo 1.	114
Figura 81. Resultado clasificación automática del vuelo 2	115
Figura 82. Resultado clasificación automática del vuelo 3	115
Figura 83. Resultado clasificación automática del vuelo 7	116
Figura 84. Resultado clasificación automática del vuelo 8	116
Figura 85. Resultado clasificación manual del vuelo 1	117
Figura 86. Resultado clasificación manual del vuelo 2.....	118
Figura 87. Resultado clasificación manual del vuelo 3.....	118
Figura 88. Resultado clasificación manual del vuelo 7.....	119
Figura 89. Resultado clasificación manual del vuelo 8.....	120

Figura 90. Resultado Imagen de Intensidad vuelo 1	121
Figura 91. Resultado Imagen de Intensidad vuelo 3	121
Figura 92. Resultado Imagen de Intensidad vuelo 7	122
Figura 93. Resultado Imagen de Intensidad vuelo 8	122
Figura 94. Resultado modelo digital de superficie vuelo 1	123
Figura 95. Resultado modelo digital de superficie vuelo 3	123
Figura 96. Resultado modelo digital de superficie vuelo 7	124
Figura 97. Resultado modelo digital de superficie vuelo 8	124
Figura 98. Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 1	125
Figura 99. Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 3	125
Figura 100. Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 7	126
Figura 101. Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 8	126
Figura 102. Resultado ubicación de puntos de control zona piloto 1	127
Figura 103. Resultado ubicación de puntos de control zona piloto 2.....	128
Figura 104. Resultado ubicación de puntos de evaluación zona piloto 1	129
Figura 105. Resultado ubicación de puntos de evaluación zona piloto 2	130

RESUMEN

Los datos LiDAR hoy en día ya cuentan con un preprocesamiento; información: sin ruido, clasificada y modificada en su densificación; donde se desconoce los procesos de: planificación, toma y depuración. Por lo cual, se ha propuesto establecer una metodología de procesamiento de nubes de puntos provenientes del escaneo LiDAR abordo de UAVs, con el objetivo de optimizar su captura y llevar un control de los productos. La propuesta metodológica inicia con: el conocimiento de las especificaciones técnicas de la aeronave como del sensor, aplicativo que se dará, planificación del vuelo y control, parámetros ideales para la ejecución del vuelo, obtención el archivo LAS, modificar la densidad de la nube de puntos, depuración tanto en errores groseros como en ruido, clasificación automática y manual, obtención de productos (MDS y MDE) y finalmente el control de calidad referente a la exactitud posicional. En la ejecución del escaneo LIDAR con diferentes parámetros, los valores óptimos de captura son: altura de vuelo 50m, velocidad de 4,5 m/s, utilizando un FOV de 90° y traslapo lateral de 20%. Con respecto a la exactitud posicional planimétrica se ha obtenido en el vuelo 8 (Zona de mayor densidad de puntos) el menor RMSEr de 1,130m y en altimetría para el vuelo 3 (Zona de menor densidad de puntos) un RMSEz de 2,903m (metodología NSSDA). En conclusión, tanto en planimetría como en altimetría los datos se encuentran desplazados, lo cual difiere con lo citado en la teoría, destacando la relevancia de esta investigación con respecto a la evaluación de todo el proceso y los desplazamientos en cuanto a calidad tridimensional.

Palabras Clave

- LIDAR.
- UAV.
- EXACTITUD POSICIONAL.

ABSTRACT

Currently, LiDAR data have a preprocessing; information: without noise, classified and modified in its densification; where the processes of: planning, taking and debugging are unknown. In this sense, it has been proposed to establish a methodology for processing point clouds LiDAR scanning using UAV, in order to optimize their capture and control the products. The methodological proposal begins with: knowledge of the technical specifications of both the aircraft and the sensor, the applicative that will be given, flight planning and control, ideal parameters for the execution of the flight, obtaining the file LAS, modify the density of the point cloud, debugging process in both gross errors and noise, automatic and manual classification, obtaining products (MDS and MDE) and finally the quality control regarding external positional accuracy. In the execution of the LIDAR scan with different flight parameters it has been concluded that the optimal capture values are: at flight height 50 m, at a speed of 4.5 m / s, using a FOV of 90 ° and with an overlap lateral of 20%. With regard to the planimetric positional accuracy, the lowest RMSEr of 1.437m was obtained in flight 8 (Zone with the highest density of points) and in altimetry for flight 3 (Zone with the lowest density of points) an RMSEz of 2.903m in reference to the use of the NSSDA methodology. In conclusion, both in planimetry and altimetry, these data are displaced, which differs from what is cited in the theory, highlighting the relevance of this research with respect to the evaluation of the entire process, emphasizing the displacements in terms of three-dimensional quality.

Keywords

- **LIDAR.**
- **UAV.**
- **POSIONAL ACCURACY.**

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

Introducción

Según Barragán et al.,(2017), la tecnología LiDAR a nivel mundial es una de las principales herramientas para realizar modelos tridimensionales del terreno y posteriormente poder ser aplicados a diferentes estudios. Esto no fue siempre de esta manera, ya que el LiDAR en sus inicios se lo utilizaba principalmente como una herramienta para la investigación científica. Crespo & Manso (2014), indican que el sistema LiDAR se encontraba estancado durante años por falta de soporte informático y tecnología para procesar la información.

En los últimos 15 años fue posible evidenciar las aplicaciones de esta tecnología situándola como viable y precisa para encontrar superficies de elevación y características sobre el terreno de manera más sencilla en grandes áreas (Crespo & Manso, 2014); la aplicación de LiDAR se aceleró exponencialmente, gracias a la introducción de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), utilización de relojes ultra-precisos para la medida del tiempo de retorno del pulso láser y las unidades de medida inercial (IMU), que permiten el cálculo de parámetros de orientación de los sensores láser, obteniendo un set de datos más precisos. (IGM, 2016)

En un estudio realizado por Galarza (2014), en la zona Austral del Ecuador, entre los cantones Paute y Azogues; señala que el control de calidad del modelo digital del terreno (MDT) generado a partir de los datos LiDAR frente a elementos puntuales (DGPS), se lo realiza siguiendo tres fases: la obtención de datos LiDAR, la obtención de puntos de control de campo y el control de calidad; concluyendo que, cuando la zona de estudio

presenta pendiente débil, irregular y sin cobertura, la precisión del MDT es mayor, y ésta disminuye si se tiene vegetación herbácea así como pendiente fuerte.

Duque (2015) acota que, al evaluar la calidad geométrica de Modelos Digitales de Terreno (MDT) obtenidos a través de datos LiDAR en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urcuquí, provincia de Imbabura, los parámetros estadísticos como error típico de estimación y coeficiente de correlación determinaron que el modelo con mejor ajuste fue Kriging Ordinario y Spline, con la certeza de que los insumos LiDAR pertenecientes al proyecto SIGTIERRAS cumplen con las especificaciones técnicas apropiadas en todo el proceso.

La obtención de parámetros óptimos para la clasificación de nubes de puntos LiDAR por medio de sensores aerotransportados, a través de un análisis iterativo comparado, permite establecer una metodología que concluye que la nube de puntos obtenida por LiDAR es más precisa que la nube de puntos obtenida por métodos fotogramétricos. (Barragán et al., 2017)

El LIDAR aerotransportado ha sido estudiado con mayor amplitud, utilizándolo en una variedad de aplicaciones de teledetección; por ejemplo: investigación de defoliaciones, recuperación de parámetros estructurales de árboles, inventario de biomasa forestal, segmentación de edificios, entre otros; donde se busca obtener mayor densidad de información para visualizar con precisión las características del objeto de estudio. Así, el LiDAR se ha situado como una tecnología de mapeo de última generación. (Lin et al., 2011)

En los proyectos de RPAS Drones (2020), hacen referencia a la ventaja de utilizar los drones como plataformas de LIDAR por los requerimientos en cuanto a altura de vuelo y velocidad que permiten alcanzar la densidad de puntos deseada. Tal como en el estudio de Wallace et al., (2012), menciona que “los sistemas UAV proporcionan una combinación

inigualable de alta temporal y conjuntos de datos de resolución espacial.” Y concluyen que el sistema UAV-LiDAR utilizado fue una plataforma adecuada para la generación de nubes de puntos de alta resolución para evaluar la estructura forestal en el nivel del árbol individual.

En el país son pocas las empresas que manejan esta tecnología, y las que efectúan trabajos lo hacen a través de plataformas como avionetas o helicópteros, lo que implica elevados costos en captura de información. Adicionalmente, adquirir datos referentes a LiDAR conlleva un preprocesamiento efectuado por alguna entidad que también eleva sus costos de compra.

Planteamiento del problema

La génesis del LiDAR es poco conocida debido a que en el mercado se adquiere la nube de puntos con un tratamiento previo donde se despreja el total proceso de obtención. A nivel nacional su utilización puede ser poco común puesto que resulta elevados costos frente a otras técnicas con resultados similares; y se desconocen las precisiones y calidad de los datos. (Barragán et al., 2017)

Además, los datos crudos obtenidos del sensor no pueden utilizarse directamente para la generación automática de los productos, si previamente no se realiza un proceso de ajuste (Crespo & Manso, 2014); el alcance de este tipo de datos es limitado, lo que reduce significativamente la cantidad de usuarios y por lo tanto la investigación referente a los aplicativos que se generan de esta tecnología; como menciona Duque (2015), “a nivel nacional es poca la investigación realizada”, por lo que el presente estudio aporta un punto de partida pionero.

En virtud de lo expuesto, se debe generar una metodología definida que incluya desde la etapa de planificación hasta la obtención de los distintos modelos digitales de datos

LiDAR adquiridos partir de un UAV, que respalde posteriormente la calidad de los productos generados y de la misma manera, el cumplimiento de las características adecuadas para su explotación en diversas aplicaciones.

Justificación e importancia

La tecnología LIDAR es relativamente nueva en el país; todavía existe un limitado conocimiento sobre su existencia, el manejo de la información que resulta de esta técnica y las bondades frente a métodos tradicionales.(Galarza, 2014). Además, existen herramientas variadas en software y hardware en torno al manejo de datos LiDAR, por lo que un proyecto de este tipo dependerá de diferentes plataformas informáticas.(Duque, 2015)

Por otra parte se conoce que un levantamiento LiDAR se compone de un proceso extenso desde su planificación, captura y procesamiento de los datos crudos hasta llegar al resultado final, según Harrap & Lato (2006), el 85% del proyecto es el tratamiento de los datos; por esta razón es importante conocer los alcances de las herramientas SIG en este temática.

De acuerdo a lo escrito el desarrollo del proyecto introduce un lineamiento al proceso completo de captura masiva de información LIDAR en UAV, las ventajas de utilizar esta plataforma son; reducción de costos en frente a otras plataformas aéreas, rapidez en la operación, posibilidad de trabajo en espacios confinados, la autonomía de vuelo, la adquisición de la información cruda y finalmente los resultados en menor tiempo.(Oromí & Quintero, 2019)

El estudio brindará una línea base para futuros proyectos; ya que el estado del arte referente a LiDAR en UAV es poco desarrollado. Con el presente estudio se busca ampliar este conocimiento y plantear una metodología que de manera general abarque todo el

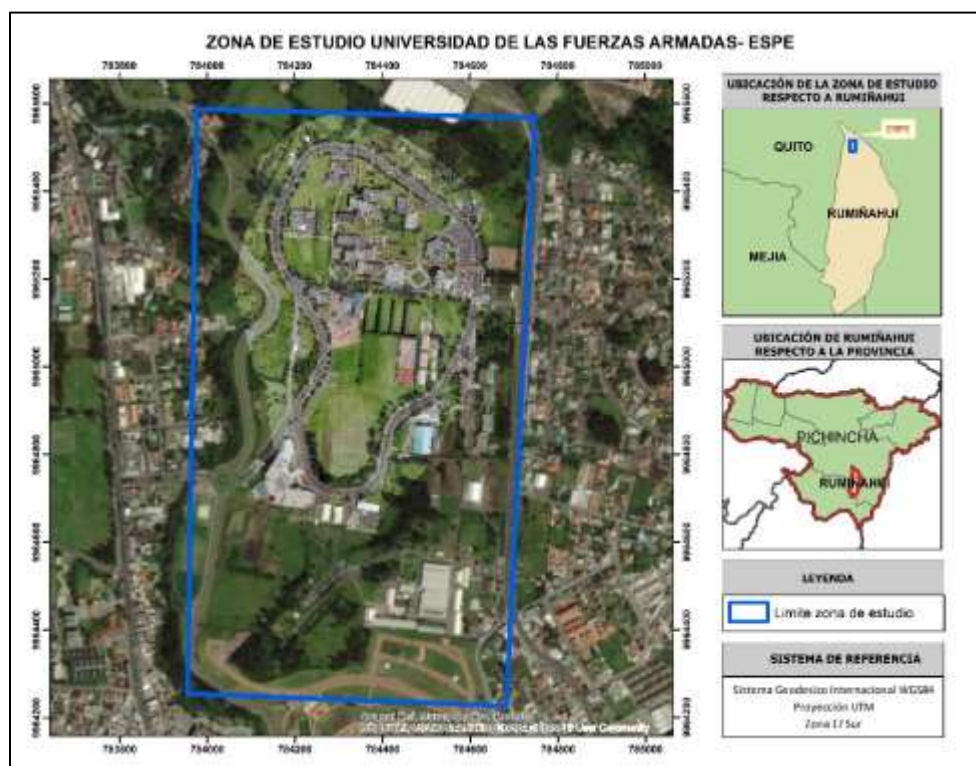
procedimiento de un levantamiento LIDAR así posteriormente el usuario puede acoplarse a cualquier plataforma informática y direccionar la información de acuerdo a su objetivo, con aplicaciones en catastro, agricultura, silvicultura, minería, carreteras, inspección de infraestructura entre otras.

Descripción del área de estudio

El proyecto se desarrollará en la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE, campus Sangolquí, en el cantón Rumiñahui ubicado en la provincia de Pichincha, que comprende una extensión de 48,2 hectáreas, el cual se observa en la Figura 1.

Figura 1.

Ubicación zona de estudio



Nota: El área de estudio cuenta con objetos identificables como suelo, vegetación y construcción; además de información secundaria como topografía y puntos de control.

Objetivos

Objetivo General

Generar una metodología de procesamiento de nubes de puntos de LiDAR aerotransportado mediante vehículos aéreos no tripulados UAV, con la finalidad de optimizar la obtención y evaluar la calidad de la información resultante.

Objetivos Específicos

- Realizar los planes de vuelo con LiDAR aerotransportado en un Avión no tripulado (Drone) con diferentes parámetros de vuelo con la finalidad de obtener los valores óptimos de captura como: altura, velocidad y traslapo en la zona de estudio.
- Filtrar el ruido y la densidad del archivo de extensión. las obtenido de la captura de información LIDAR con el fin de clasificar y filtrar los retornos de los distintos objetos capturados.
- Clasificar y filtrar los retornos y objetos como: suelo, vegetación baja, media y alta, y edificaciones con el objeto de generar los modelos digitales de elevación.
- Evaluar la exactitud posicional de la nube de puntos densa (planimetría y altimetría) y del modelo digital de elevación con respecto a los objetos in situ a partir de información secundaria y de las coordenadas obtenidas por sistemas de posicionamiento satelital global (GNSS).

Metas

- Informes de los distintos planes de vuelo considerando cambios de traslapos, velocidades y alturas de vuelo.

- Un manual que contenga la metodología para corregir los ruidos y la densidad de puntos por metro cuadrado con al menos dos plataformas informáticas de manejo de datos LiDAR copyright y copyleft.
- Un manual que contenga una metodología de clasificación y filtrado de los retornos y objetos capturados a partir de esta tecnología con al menos dos plataformas informáticas de manejo de datos LiDAR copyright y copyleft.
- Dos modelos digitales de elevación, uno de terreno y otro de superficies.
- Tabla con los resultados de la evaluación de la exactitud posicional planimétrica y altimétrica de los datos y productos generados.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se propone una perspectiva teórica orientado a sensores remotos y su entendimiento en el campo de la tecnología LIDAR, iniciando desde sus fundamentos, plataformas disponibles, el tipo de sensor al que corresponde, principios y características. Así también: la información que resulta de esta tecnología, la manera en la que se procesa, los productos y la manera de evaluar la calidad de los mismos.

Fundamentos de sensores remotos

Definición de teledetección

Según Chuvieco (2008), “el ser humano con su determinación por ampliar la visión que tiene de los paisajes terrestres ha originado la observación remota, la cual establece el marco de estudio de la teledetección o conocida también como percepción remota que proviene del término inglés “remote sensing”, definida como aquella técnica que ayuda a la adquisición de imágenes de la superficie terrestre, desde el uso de sensores a bordo de diferentes plataformas aéreas (helicópteros, aviones, vehículos aéreos no tripulados y espaciales), asumiendo la interacción energética entre la superficie de la tierra y el sensor.

Se puede definir a la teledetección como la ciencia y el arte que comprende la identificación, declinación, detección, clasificación, análisis y medida de diversos fenómenos terrestres a través de imágenes obtenidas de sensores aéreos, terrestres y espaciales, utilizando técnicas de interpretación visual como digital. (Civco, et al., 1993)

Fotogrametría de corto alcance

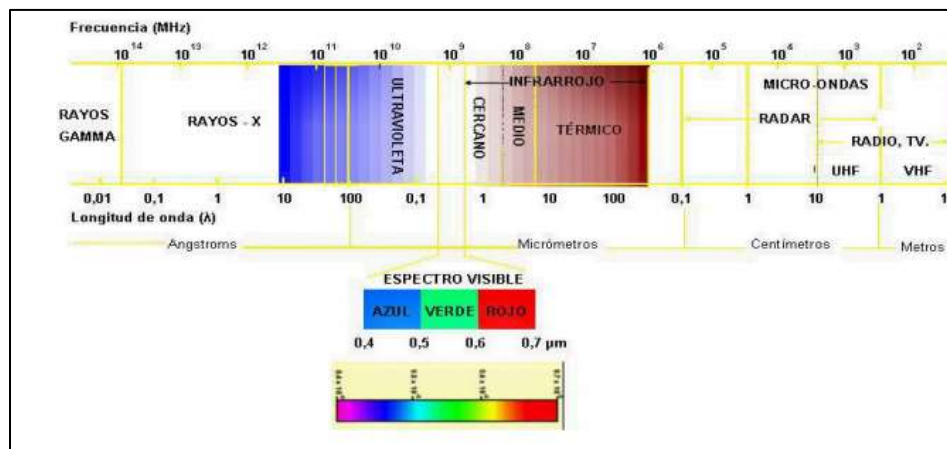
También llamada fotogrametría de objeto cercano o fotogrametría terrestre, entre sus características principales está, la obtención de información mediante imágenes o fotografías capturadas desde la superficie de la tierra a una distancia superior a los 10 cm e inferior a los 300 m; referida al modelado 3D a partir de imágenes terrestres. (Balaguer, 2017)

Espectro electromagnético

De acuerdo a Herrera et al. (2019), “es un conjunto de ondas electromagnéticas que transportan energía electromagnética y movimiento desde alguna fuente a un receptor desplazándose en el vacío a la velocidad de la luz; este movimiento se puede definir en función de la longitud de onda y la frecuencia”. Aunque el arreglo de valores de la longitud de onda es continuo, donde se identifica un comportamiento similar de la radiación electromagnética se suele establecer una serie de bandas y esta organización se denomina espectro electromagnético. (Chuvienco, 2008)

Conviene enfatizar las bandas espectrales más utilizadas desde la perspectiva de la teledetección, aunque estas varíen en función de distintos autores. La Figura 2 muestra un resumen donde las más comunes son: el espectro visible, Infrarrojo cercano, Infrarrojo medio, Infrarrojo lejano o térmico y micro-ondas. (Fontal et al., 2015)

Figura 2.

Espectro electromagnético

Nota: Recuperado de (Chuvieco, 2008)

Plataformas y tipos de sensores en teledetección

Plataformas

En teledetección se entiende como plataforma a los medios que transportan un sensor capaz de captar, almacenar y transmitir imágenes a cierta distancia. (Richards, 2013). La obtención de imágenes se puede llevar a cabo desde distintas plataformas (ver Figura 3) en función de su distancia a la superficie terrestre tenemos:

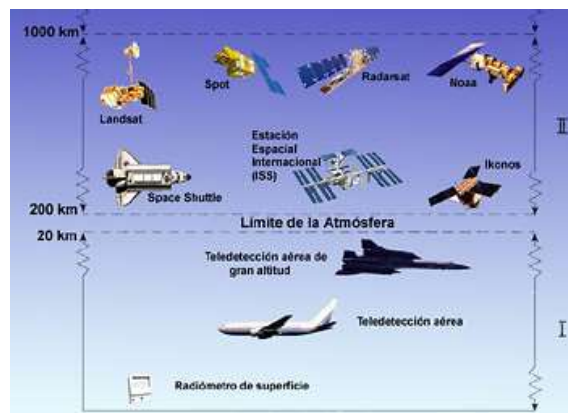
Espaciales. Hace referencias a los satélites que se encuentran fuera del límite atmosférico; según (Castaño et al., 1996):

- *Geoestacionarias.* Tienen un periodo orbital, esto se refiere al tiempo que demora en realizar una órbita alrededor del planeta, que es igual a la velocidad de rotación de la tierra; va capturando información de áreas específicas en la superficie de la tierra.

- *Heliosincrónicas*. Recolectan información en una temporada y tiempo específico ya que se mueven en orbitas ligeramente excéntricas o circulares, no permanecen sobre un punto fijo.

Figura 3.

Tipos de plataformas



Nota: Recuperado de (Richards, 2013)

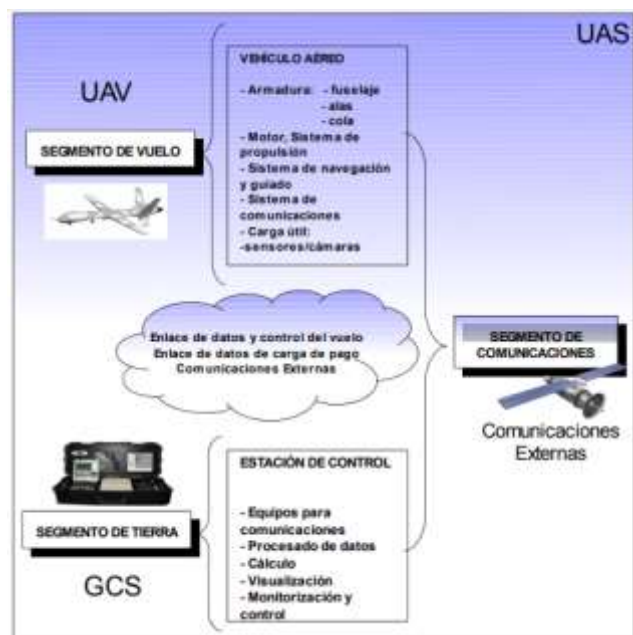
Es importante destacar que la principal distinción entre los datos de imagen que proporcionan las distintas plataformas generalmente radica en la resolución espacial.

Aéreas tripuladas. Las aeronaves como helicópteros, aviones, avionetas ofrecen la capacidad de montar sensores que permitan cubrir grandes extensiones de terreno con una gran resolución espacial.

Aéreas no tripuladas. Inicialmente es importante definir un UAS por sus siglas en inglés Unmanned Aircraft-System, ya que conforma los elementos que permiten el vuelo de una aeronave no tripulada; es decir, la plataforma instalada a bordo, la estación de control, la manera en que se realiza en enlace de datos esto se visualiza en la Figura 4 (M. H. Acosta, 2011).

Figura 4.

Distribución de los elementos en un UAS



Nota: Recuperado de (M. H. Acosta, 2011)

Aviones no tripulados. Una plataforma no tripulada UAV, por sus siglas en inglés Unmanned Aerial Vehicle de acuerdo a la OACI (2011), Organización de Aviación Civil Internacional, es “una aeronave que vuela sin un piloto al mando a bordo y que se controla a distancia y plenamente desde otro lugar (tierra, otra aeronave, espacio) o que ha sido programada y es plenamente autónoma” también conocidos como RPA Remotely Piloted Aircraft.

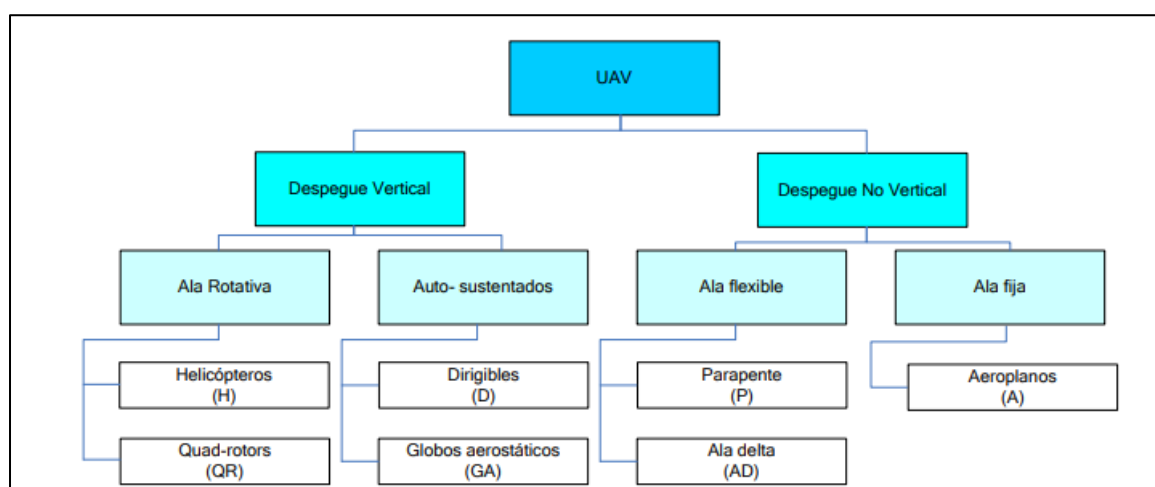
En la actualidad, existen más de veinte modelos comerciales de UAV para registro cartográfico; los cuales, alojan diferentes dispositivos sensoriales como: cámara óptica, de video, infrarroja, térmica; dispositivos de posicionamiento GNSS/INS e incluso LIDAR. (Remondino et al., 2011)

Clasificación de los UAV. Al momento de clasificar esta temática existen diferentes criterios, por ejemplo, según la AUVSI (Asociación Internacional de Vehículos aéreos no

tripulados) define en tres categorías principales: tácticos con aplicaciones militares; estratégicos con alturas de vuelo sobre los 20000 m y los UAV de tareas especiales; en el último grupo se incluyen los de alas fijas y giratorias. (Remondino et al., 2011). Se detalla en la Figura 5 otro criterio muy común que es la clasificación por el tipo de aeronave.

Figura 5.

Clasificación de UAV's por el tipo de Aeronave y despegue del equipo



Nota: Recuperado de (Barrientos et al., 2007)

UAV VTOL híbridos: Adicional a la división de despegue vertical, están los vehículos aéreos no tripulados VTOL (Vertical Take-off and Landing) que presentan especificaciones similares a los vehículos de ala fija con la variación en su sistema de despegue y aterrizaje. (Doddi, n.d.)

Vehículos aéreos no tripulados: Finalmente, para ampliar esta sección se define, los UAV más conocidos en el ámbito de la cartografía como son los de ala fija y ala rotatoria, según Mariño (2019), se clasificarían de acuerdo a su sustentación, como se visualiza en la Tabla 1.

Tabla 1.*Características UAS, según el tipo de sustentación*

CARACTERÍSTICAS	ALA FIJA	ALAROTATORIA
Sustentación	Perfil alar	Fuerza que generan las hélices de los rotores
Despegue	Horizontal, necesita una superficie grande	Vertical. Desde cualquier punto
Aterrizaje	Horizontal, necesita una superficie grande	Vertical. Desde cualquier punto
Autonomía de vuelo	Amplio	Corto
Estabilidad	Muy estables, con vuelo lineal No puede hacer vuelos estáticos	Depende de las condiciones climáticas. Hace vuelos estáticos
Ruido	Son silenciosos	Son ruidosos
Precio	Muy costosos	Tienen precios más bajos
Vuelo	Más difíciles de volar	Fáciles de usar, pueden acceder a zonas difíciles
Velocidad	Mayor velocidad por lo tanto mayor extensión de cobertura.	Posibilidad de volar a muy baja velocidad
Compactos	Menos compactos	Más compactos
Versatilidad		Se pueden instalar cámaras y otros accesorios
Clases		Tricópteros (3 motores), Cuadricópteros (4 motores), Hexacópteros (6 motores), y octacópteros (8 motores)
Otras	Mayor rango climático en términos de temperatura, lluvia y viento	<ul style="list-style-type: none"> •Posibilidad de volar a puntos fijos •Mayor maniobrabilidad y precisión de vuelo •Uso de mayores cargas útiles

Nota. Recuperado de (Mariño, 2019) modificado por el autor con información de referencia en (Pardo, 2016)

DJI Matrice 600 pro. De acuerdo a la empresa DJI, el Hexacóptero es una plataforma voladora con mando a distancia de seis rotores diseñada para para integrarse con una

gran cantidad de potentes tecnologías como sensores y diferentes cámaras; en la tabla 2 se encuentran sus características y en la Figura 6, se ilustra el equipo.

Tabla 2.

Especificaciones UAV Matrice 600 PRO

ESPECIFICACIONES	
Distancia diagonal entre ejes	1133 mm
Dimensiones	1668 mm x 1518 mm x 727 mm con las hélices, brazos y el soporte del GPS desplegados (incluyendo el equipo de aterrizaje)
	437 mm x 402 mm x 553 mm con las hélices, brazos y el soporte del GPS plegados (excluyendo el equipo de aterrizaje)
Dimensiones del Paquete	525 mm x 480 mm x 640 mm
Peso (con seis baterías TB48S)	10 kg
Máximo Peso Recomendado al Despegar	15.5 kg
Precisión de Vuelo Estacionario (P-GPS)	Vertical: ± 0.5 m, Horizontal: ± 1.5 m
Velocidad Angular Máx	Inclinación: 300°/s, Giro: 150°/s
Ángulo máximo de inclinación	25°
Resistencia al Viento Máx.	8 m/s
Velocidad Máx. en Ascenso	5 m/s
Velocidad Máx. en Descenso	3 m/s
Velocidad Máx.	65 km/h / 40 mph (sin viento)
Altura Max. de Servicio sobre el Nivel del Mar	2500 m
Sistema de Control de Vuelo	A3 Pro
Estabilizadores DJI compatibles	Ronin-MX; ZENMUSETM Z30, Zenmuse X5/X5R, Zenmuse X3, Zenmuse XT; Zenmuse Z15 Series HD Gimbal: Z15-A7, Z15-BMPCC, Z15-5D III, Z15-GH4
Tren de Aterrizaje Retráctil	Standard
Temperatura de funcionamiento	de -10° a 40° C (de 14° a 104° F)
Cargador (Modelo: MC6S600)	
Voltaje de Salida	26.1 V
Potencia Nominal	600 W
Potencia con una única batería en el puerto	100 W
Batería Opcional (Modelo: TB48S)	
Capacidad	5700 mAh
Voltaje	22.8 V
Tipo de Batería	LiPo 6S
Energía	129.96 Wh
Peso Neto	680 g
Temperatura de funcionamiento	14° to 104° F (-10° to 40° C)
Potencia de Carga Máx	180 W

Nota: Recuperado de (DJI, 2018)

Figura 6.

Matrice 600 pro



Nota: Recuperado de (DJI, 2018)

Tipos de sensores

Según Chuvieco (2008), el sensor es un dispositivo electrónico sensible a las longitudes de onda, son utilizados para registrar la energía emitida por la superficie de la tierra; por el tipo de sensor se pueden clasificar en:

Sensores pasivos. recogen la energía electromagnética reflejada o emitida por la tierra cuando es iluminada por el sol; la energía es emitida hacia la tierra, luego es reflejada y capturada por el sensor para posteriormente ser convertida en una imagen espectral.

Sensores activos. Poseen su propia fuente de energía, La radiación reflejada por el objeto es detectada y medida por el sensor, no se necesita de la energía solar o de otros objetos; dentro de sensores activos podemos encontrar RADAR y LiDAR.

Tecnología LiDAR

Lidar es el acrónimo inglés de Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging, que significa alcance y detección de la luz. En la actualidad a la palabra “LiDAR” se la considera como radar de láser o radar óptico (Light RADAR) debido a que hace referencia directa de las técnicas radar convencionales usando el mismo principio

pero con longitudes de onda más cortas que proporcionan mayor exactitud y resolución (Instituto Geográfico Nacional y Centro Nacional de Información Geográfica, 2014).

La tecnología LIDAR es un sistema de teledetección que funciona desde las bandas del ultravioleta al infrarrojo cercano del espectro electromagnético, usualmente entre los 1000 a 1500 nanómetros donde utiliza luz en forma de un láser y se basa en la medición del tiempo transcurrido en nanosegundos entre la emisión de un pulso de energía y su llegada después de ser reflejado por el objeto de interacción. (Molina, 2016)

Para obtener la distancia de cada impulso láser se emplea la ecuación de la velocidad (J. N. Acosta, 2017).

Ec.1

$$V = \frac{D}{T}$$

Donde:

V= velocidad

D= distancia

T= tiempo

Es necesario despejar la distancia y en el caso del láser, la velocidad hace referencia a la velocidad de la luz que es un dato conocido por lo que se obtiene la siguiente ecuación:

Ec.2

$$D = r \cdot \frac{T}{2}$$

Donde:

D = distancia del sensor hacia el objeto

r = velocidad de la luz (0,3 metros por nanosegundo)

T = intervalo de tiempo, el cual se divide entre dos, considerando el tiempo de emisión y recepción del láser.

Componentes LIDAR

De acuerdo a la ASPRS (2012), “un sistema LIDAR consiste principalmente en la integración de tres componentes: el de Georreferenciación Directa INS , GPS y un escáner láser” como se observa en la Figura 7.

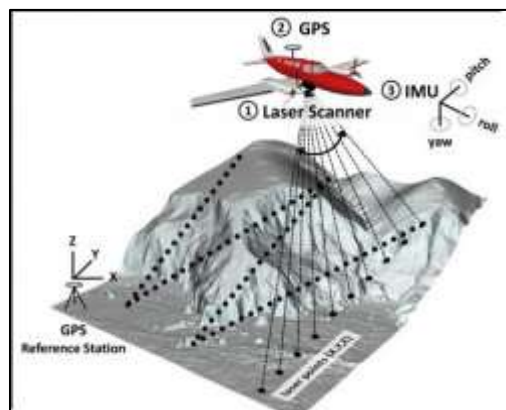
El sistema escáner láser, emite los pulsos de luz ininterrumpidamente y capta los retornos, el tiempo que tarda en regresar la luz permite obtener la distancia y los distintos reflejos de la superficie.

El sistema GPS calcula la posición del sensor situándolo con exactitud (en coordenadas geográficas) en conjunto con una estación base establecida en un punto conocido sincronizado durante la recopilación de datos.

El sistema inercial de navegación (INS) registra la orientación angular del sensor con respecto al suelo para ajustar los datos y situarlos en un plano horizontal controlado. (ASPRS, 2012)

Figura 7.

Ilustración del proceso de escaneo láser LiDAR aerotransportado.



Nota: Recuperado de (Melin et al., 2017)

Tipos de sensores LiDAR

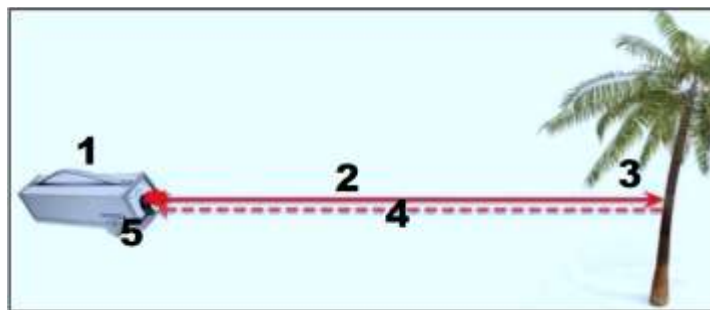
Hetherington (2009), señala que, “entre los sensores más conocidos según su capacidad de registro de información se encuentran: de pulso-retorno (Time of Flight, ToF) y fase señal (Phase-based)”.

Sensor pulso retorno. Se lo conoce también como pulsed-based scanning o de tiempo invertido, el cual contiene cinco componentes (ver Figura 8). La fuente emisor emite su propio impulso láser que viaja en tiempo y distancia, mismo que interactúa con un objeto en la superficie, el láser regresa de la misma forma en tiempo y distancia hacia el receptor esto registra la computadora y lo representa digitalmente como un punto llamado retorno o eco, que es de los más conocidos. (Real, 2011)

De acuerdo a Melin et al., (2017) los datos registran información solo de los objetivos que arrojaron un rendimiento lo suficientemente fuerte.

Figura 8.

Componentes sistema ToF



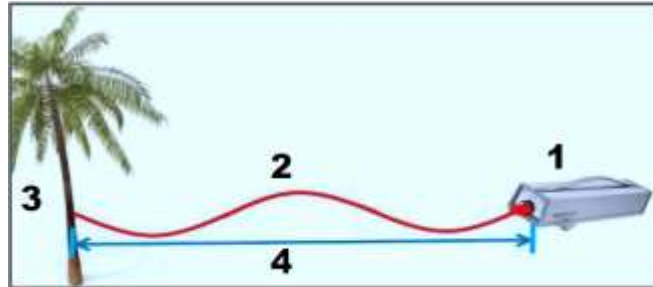
Nota: 1) Fuente emisor a láser 2) Tiempo de vuelo del láser 3) Objeto de interacción
4) Tiempo de retorno 5) Receptor del retorno Tomado de (Real, 2011)

Sensor por señal de fase. Llamado de fase o diferencia de fase, presenta componentes que se describen en la Figura 9. En este caso, el escaneo por señal de fase emite una señal continua de radiación láser de tipo sinusoidal, amplia y rápida que interactúa con el objeto en una determinada fase y ángulo de incidencia donde la distancia es calculada por la diferencia de fase, entre la señal emitida y la señal reflejada. (Real, 2011)

Según Melin et al., (2017),” los datos de forma de onda completa están prácticamente digitalizados, independientemente de su intensidad o fuerza.

Figura 9.

Componentes sistema Phase-based



Nota: 1) Fuente emisor a láser 2) Señal 3) Objeto de interacción 4) Distancia sensor objeto. Tomado de (Real, 2011)

A continuación, se describen los sensores LIDAR de acuerdo a su área de desarrollo. (Real, 2011)

Sensor Atmosférico. Utiliza las bandas láser ultravioleta visible (verde, rojo) e infrarrojo cercano con aplicaciones en mediciones atmosféricas como pronósticos meteorológicos, detección de contaminantes y aerosoles, entre otros.

Sensor Batimétrico. Dependiendo de las propiedades físicas del agua es posible escanear la topografía y determinar profundidad, ya que se encuentra en las bandas del azul y verde (del infrarrojo).

Sensor Topográfico. Utilizan las bandas del infrarrojo cercano, el cual realiza mediciones y escaneos de la superficie de dos formas:

Altimétrico. sensores montados en satélites (Satelliteborne-Spaceborne Laser Scanning, SLS) o laser escáner en vehículos aerotransportados (Airborne Laser Scanning, ALS)

Vertical o terrestre. Terrestrial Laser Scanning, TLS, escáner de largo alcance.

Sensor Velodyne Lidar's Puck (VLP-16). Es un sensor LIDAR pequeño en comparación a otros de la misma gama, también conocido como Geo-MMS LIDAR táctico 16, desarrollado para la captura masiva de información LIDAR con la capacidad de retorno doble útil para vehículos aéreos no tripulados y otras aplicaciones móviles como cartografía, seguridad, topografía entre otras (Velodyne Acoustics INC, 2015). En la tabla se puede ver algunas de sus especificaciones.

Tabla 3.

Características del sensor Velodyne

COMPONENTE	ESPECIFICACIONES
Sensor	16 canales Rango de medición: 100 m Rango de exactitud: Hasta ± 3 cm Campo de visión (Vertical): 30° ($+15^\circ$ a -15°) Resolución angular (Vertical): 2° Campo de visión (Horizontal): 360° Resolución angular (Horizontal/Azimut): 0.1° - 0.4° Velocidad de rotación: 5Hz-20Hz Altitud de vuelo típica: 30-40m
Salida	Datos de punto generados por el LIDAR: - Modo de retorno único: $\sim 300,000$ puntos por Segundo - Modo de retorno doble: $\sim 600,000$ puntos por segundo Los paquetes UDP contienen: - Medición de la distancia de tiempo de vuelo - Medición de reflectividad calibrada - Ángulos de rotación - Sellos de tiempo sincronizados (resolución μ s) GPS: \$ GPRMC y \$ GPGGA NMEA Sentencias del receptor GPS (GPS no incluido)
Láser	Clasificación de producto láser: Clase 1 Eye safe Longitud de onda: 905 nm
Mecánico/Eléctrico /Operacional	Consumo de energía: 8 W Peso: 830 g (sin cable y caja de interfaz) Temperatura de operación: -10°C a $+60^\circ\text{C}$ Tamaño: $\sim \varnothing 103$ mm x 72 mm

Nota. Recuperado de (Velodyne Acoustics INC, 2015), modificado por el autor

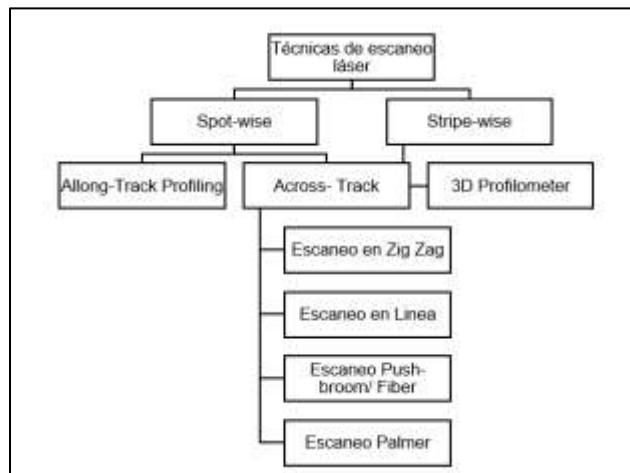
Tipos de escaneado

Al referirse a los sistemas de detección remota basados en láser, una de las tecnologías clave implementadas es la dirección del rayo, la cual se clasifica en función del mecanismo de escaneado que realizan los espejos dentro del sensor. (ASPRS, 2012)

A continuación, las Figuras 10 y 11 muestran los patrones de escaneo.

Figura 10.

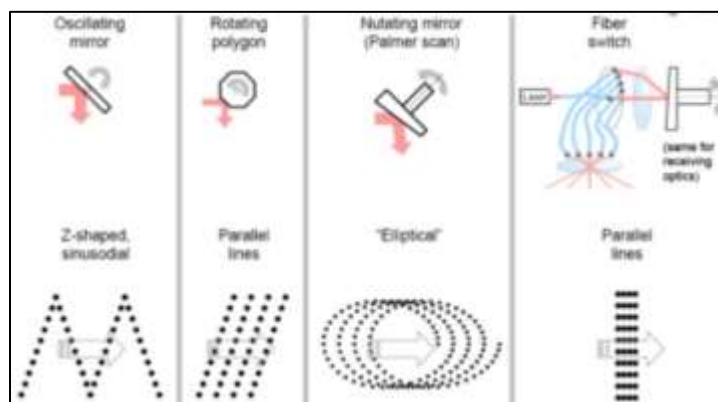
Clasificación de las técnicas de escaneo láser



Nota: Recuperado de (Renslow & ASPRS, 2012)

Figura 11.

Geometrías trazadas con escáner LIDAR



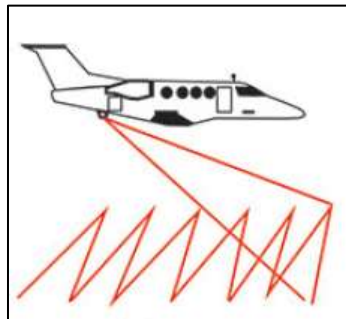
Nota: Recuperado de (Péter et al., 2012)

Según Real (2011), todos los patrones de barrido y densidad de los puntos son afectados en mayor o menor medida por la geometría misma del patrón por lo que es necesario identificarlas.

Escaneo en Zig-Zag (espejo oscilante). En este sistema el espejo es rotatorio en dos sentidos, gira hacia adelante y hacia atrás entre extensiones; por lo cual, se produce una línea en zigzag, es decir, un patrón sinusoidal sobre la superficie del objetivo. En este método, el espejo siempre apunta hacia el suelo, donde la recopilación de datos puede ser continua y en teoría todos los pulsos de laser pueden ser utilizados; por otra parte, los puntos medidos no se encuentran espaciados de la misma manera en toda la trayectoria, al igual que la densidad de puntos es variable en el borde del campo de escaneo, donde varía el sentido de rotación del espejo. (Renslow & ASPRS, 2012)

Figura 12.

Método de escaneo Zig-Zag

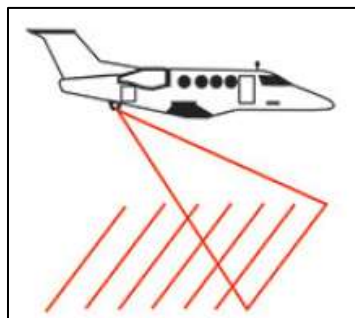


Nota: Recuperado de (Ruíz et al., 2014)

Escaneo en línea (espejo giratorio). El espejo gira 360 grados continuamente a una velocidad constante en una dirección motor. Su principal característica es, que la velocidad constante no induce errores de tipo de aceleración, sin embargo, no es posible la captura de información en una cantidad significativa de tiempo, al mantener una sola dirección no siempre se captura información. Los resultados son los puntos medidos en líneas paralelas, que se observan en la Figura 13. (Renslow & ASPRS, 2012)

Figura 13.

Método de escaneo líneas paralelas

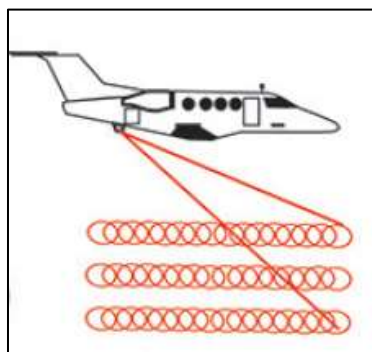


Nota: Recuperado de (Ruíz et al., 2014)

Escaneo Pushbroom (escaneo de fibra). Es un patrón de barrido de escoba, con un espejo con giro de nutación o fibra óptica. La energía pulsada del láser se transmite a una de las fibras dispuestas en círculo donde se forma un rayo láser estrecho y se transmite al suelo, la luz reflejada se enfoca a la fibra correspondiente en una matriz lineal en el lado de recepción y a una matriz circular acoplado a la fibra central que conduce al detector teniendo como resultado una huella de círculos solapados. (Renslow & ASPRS, 2012)

Figura 14.

Método de escaneo pushbroom

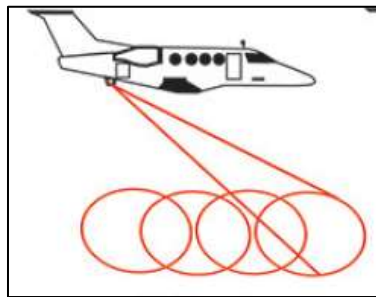


Nota: Recuperado de (Ruíz et al., 2014)

Escaneo Palmer (Elíptico). El haz de láser es desviado por dos espejos, donde el resultado es un patrón elíptico con datos redundantes que pueden ser usados en la calibración. A través de este método es posible escanear el terreno de diferentes perspectivas. (Renslow & ASPRS, 2012)

Figura 15.

Método de escaneo elíptico



Nota: Recuperado de (Ruíz et al., 2014)

Nube de puntos

Se conoce que el sensor LIDAR mide el intervalo entre el pulso láser desde que deja la plataforma de la nave, llega a un cuerpo en la tierra y se refleja donde el escáner sigue registrando información entre 20 000 y 100 000 puntos por segundo, que se guardan en la memoria de la computadora al resultado de esta medición se lo llama nube de puntos, donde se representa las características del objeto medido (Jin, 2010).

La ASPRS (2013), ha señalado que cada pulso contiene los siguientes atributos:

- **X, Y, Z.** Estos valores se almacenan como enteros largos y se usan junto con los valores de escala y los valores de compensación para determinar la coordenada referida en un sistema de proyección geodésica.
- **Número de retorno.** El pulso láser de salida puede tener muchos retornos y deben marcarse en secuencia del retorno. La primera devolución tendrá un

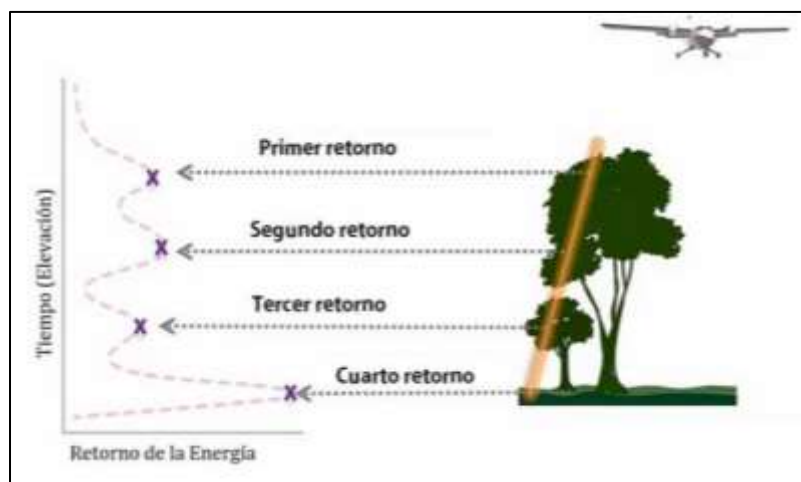
número de devolución de uno, la segunda un número de devolución de dos, y así sucesivamente.

- **Ángulo de escaneo.** También conocido como ángulo nadir, de escaneo o barrido, es el grado de posición del sensor montado en el avión, en relación directamente hacia abajo. Con este ángulo se calcula el ancho del barrido.
- **Tiempo de captura GPS.** valor del tiempo de captura GPS
- **Intensidad.** este valor es la representación entera de la magnitud de retorno del pulso. Esta es opcional y específica del sistema, se normaliza a un valor sin signo de 16 bits multiplicando el valor por 65,536 (rango dinámico de intensidad del sensor).

La correlación existente entre el tipo de material del objeto medido y la intensidad del retorno, permite conocer las propiedades espectrales de los objetos, para: su análisis, discriminación y clasificación (Real, 2011).

Objetos con un alto valor de reflectividad (techos metálicos), tendrán un alto retorno del impulso a comparación de una carretera pavimentada la cual absorbe la energía, de acuerdo a los componentes del cuerpo medido y la longitud de onda espectral que el láser ha emitido, la reflectancia varía y es directamente proporcional a la intensidad, mientras el valor de la reflexión es más grande lo mismo le sucede a la intensidad (Jin, 2010).

Según las características del objeto; cuando el rayo láser llegue al terreno se comportarán de diferente manera, donde, el registro del primer retorno permite describir la superficie de los objetos, mientras que el último retorno hace referencia al suelo o la superficie más baja; la Figura 16 muestra de manera general los tipos de retorno.

Figura 16.*Retornos (pulso o eco)**Nota:* Recuperado de (Pc, 2018)

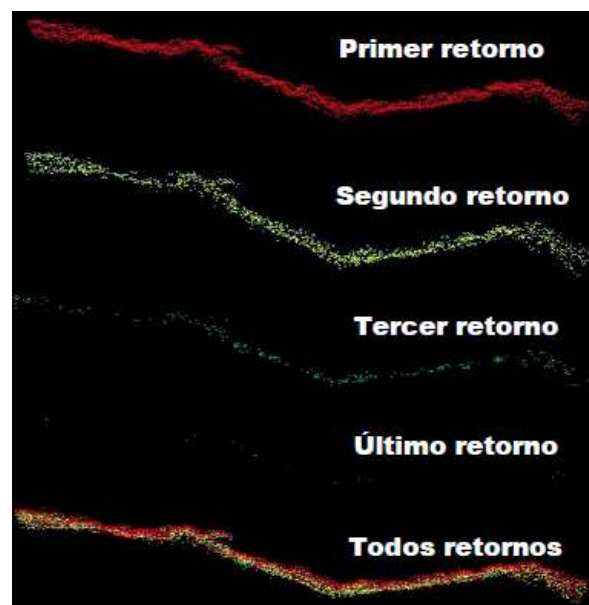
El registro del primer pulso láser es la señal que vuelve primero al sensor y se asociará con la entidad más alta en el panorama, representan copas de árboles, puentes, coronación de edificios, etc.

El rayo se refleja inmediatamente en superficies sólidas (edificios, suelo, etc.) mientras algunos tipos de luz del infrarrojo cercano son absorbidos fácilmente por: agua, lluvia, niebla, vidrio, la copa superficial del alquitrán y algunos materiales que conforman los tejados generan reflexión especular o dispersión, causando que la señal no regrese al sensor, teniendo vacíos de información. (Jin, 2010)

Las devoluciones intermedias o retornos segundo y tercero en general son maleza y objetos singulares, en la vegetación al no ser una superficie sólida parte del rayo se refleja y vuelve al sensor, pero existe otra parte del rayo que atraviesa la vegetación hasta llegar al suelo es ahí que se refiere al último retorno o última reflexión (Superficie del suelo) un ejemplo de lo descrito se diferencia en la Figura 17. (INGEOEXPERT, 2020)

Figura 17.

Imágenes de retornos LIDAR en un dosel forestal



Nota: Recuperado de (Real, 2011)

Formato de los archivos

De acuerdo Arranz (2013) en un inicio cada fabricante desarrollaba un formato de almacenamiento para los datos LIDAR, en la mayoría de los casos no se consideraba el intercambio de información tanto para importar como para exportar, lo que complicaba su manejo; cada impulso contiene los siguientes atributos: posición (X, Y y Z), intensidad, número de retorno, ángulo del espejo del sensor en el momento de captura (ángulo de escaneo), tiempo de captura GPS, entre otros. Por tanto, para almacenar esta información se requiere de un formato que al menos considere los atributos mencionados.(Fagua et al., 2011)

De acuerdo a INGEOEXPERT, (2020) algunos sensores LIDAR tienen formatos propios y permiten exportar información en diversos formatos ASCII, que aunque se caracterizaba por el fácil acceso con distintos editores de texto, pierde otra información de interés,

además, el resultado estaba en distintas líneas, lo cual, desde el punto de vista de almacenamiento no se considera un formato eficiente, debido a que, el tamaño del archivo se duplica o triplica a comparación de los mismos datos en formato binario, haciendo su procesamiento muy lento, que lo conlleva a ser interoperable entre sistemas comerciales, públicos y académicos.

En la Tabla 4 es posible evidenciar algunos de los formatos más utilizados, que muestra la variabilidad de formatos entre sensores, datos y software. (Real, 2011)

Tabla 4.

Formatos digitales de modelos LIDAR

Formato	Tipo	Notas
.3DD	binario	Riegl
.ASC	ASCII	archivo de texto
.BIN	binario	TerraScan
.CMP	propietario	Optech's REALM formato completo
.CSD	propietario	Optech's REALM
.DAT	ASCII	Archivo de texto
.DVZ	propietario	archivo de proyecto en FUSION / LDV
.IXF		Analizador Optech ILRIS
.LAS	binario	ASPRS LAS
.LDA	binario	FUSION/LDV
.LDI	propietario	archivo de índice en FUSION / LDV
.LDX	propietario	archivo de índice en FUSION / LDV
.PTC		Archivo de clasificación TerraScan
.PTS	ASCII	Leica Geosystems
.PTX	ASCII	Leica Geosystems
.QTC	propietario	QT Modeler, nubes de puntos sin cuadrícula, sin interpolación y aproximación
.QTT	propietario	QT Modeler, modelo de superficie, conjunto de datos cuadriculados
.RAW	ASCII	puntos lidar sin procesar
.TEW	binario	TopEye Mark II
.TS	binario	TerraScan
.TXT	ASCII	Archivo de texto
.WRL	ASCII	utilizado en imágenes de rango 3D
.XLS	hoja de calculo	Microsoft Excel
.XML	ASCII	DTM file
.XYZ	binario	Archivo de texto
.ZFC	binario	Zoller Frohlich

Nota: Un resumen de los formatos de archivo de datos láser comunes existentes recuperado de (Samberg, 2007)

En cuanto a la operación digital de las nubes de puntos, es necesario mencionar que los datos brutos LIDAR son más pesados que la nube de puntos o los productos finales postprocesados, por lo que en algunos casos es necesario un gran espacio digital para su procesamiento; por otra parte, no existe un único software que abarque todo el procesamiento, lo que recalca la interoperabilidad de los datos digitales y la necesidad de un formato estándar para su manejo. (Real, 2011)

Por lo descrito anteriormente, la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) creó el comité de LIDAR, quienes en el año 2003 desarrollaron un formato estándar denominado LAS (Log ASCII Standard); se trata de un archivo binario y público que tiene la particularidad de guardar toda la información procedente de la toma de los datos durante el vuelo, conservándola según su naturaleza y sistema de captura.

De acuerdo a INGENOEXPERT (2020), su estructura interna está compuesta de:

- **Cabecera (Public Header Block).** constituida por un bloque de carácter público, que contiene la información descriptiva del archivo LAS, este comprende: la identificación del tipo de archivo, número de puntos, información genérica sobre el proyecto, empresa, sensor, la versión del formato LAS utilizada, fecha de creación, el número de puntos almacenados en el archivo, dimensiones, factores de escala y sesgo de las coordenadas de cada punto registrado, entre otros.
- **Registro de longitud variable (Variable Length Records).** se almacena la información relacionada con: la proyección cartográfica, descripción del rango espectral utilizado, metadatos y datos de aplicación del usuario.
- **Registros de Puntos (Point Data Records).** es el cuerpo del archivo LAS, en este se guardan todos los puntos que capta el sensor: coordenadas,

intensidad, número de retorno, número de retornos por pulso, ángulo de escaneo o incluso la categoría a la que se ha asignado cada punto en el procesamiento.

- **Registros Extendidos de Longitud Variable (Extended Variable Length Records, EVLR).** Es el que permite añadir información descriptiva extra según las versiones.

Desde el año 2003 la ASPRS ha ido modificando las versiones del formato, incluyendo en ellos distintas configuraciones para el registro de los puntos dato (Point Data Record Format, PDRF por ejemplo con el PDRF 0 no tiene el dato del tiempo GPS, el PDRF 1 tiene este dato como se identifica en la Tabla 5.

Tabla 5.

Evolución de las versiones del formato LAS

Versión	PDRF	Fechas
LAS 1.0	--	may-03
LAS 1.1	0,1	may-05
LAS 1.2	0,1,2,3	sep-08
LAS 1.3	0,1,2,3,4,5	oct-10
LAS 1.4	0,1,2,3,4,5,6,7,8,9,10	Noviembre 2011. Julio 2013, última actualización

Nota: Recuperado de (Martínez Blanco, 2016) modificado por el autor

Como afirma Arranz (2013), en la actualidad se han presentado otros formatos como el LASzip o LAZ desarrollado a partir del formato LAS, el cual comprime el archivo en un 10 o 20% del tamaño original, sin pérdida de información lo que mejora en tiempo y capacidad el manejo de los datos LIDAR. Otro formato útil es el STL (Standard Tessellation Language) utilizado en la importación y exportación de modelos digitales

basados en triangulaciones, que describe las coordenadas de los vértices de cada triángulo y el vector característico de la superficie.

Planificación de vuelo

La adquisición de datos LIDAR es similar al proceso que se sigue en fotogrametría, se diferencia por los parámetros del sensor láser. El diseño del vuelo y la planificación de la misión estarán en función del proyecto de mapeo, donde es necesario saber detalladamente: las necesidades, los usos y las aplicaciones de los datos, ya que permiten definir los parámetros de vuelo (Albacete, 2011).

Según Renslow y ASPRS (2012), los parámetros principales que son parte del programa de planificación del vuelo LIDAR son los siguientes:

- Área a levantar: Análisis de la extensión del proyecto, topografía y características de la zona.
- Altura de vuelo: distancia vertical desde el punto de inicio, mientras mayor sea esta distancia el tiempo de retorno del láser será mayor.
- Velocidad de vuelo: determina la densidad de puntos y es inversamente proporcional a ella.
- Traslape: es un requisito para garantizar que no se produzcan lagunas en los datos. La cantidad de superposición, depende de la cantidad de relieve en el terreno. Las áreas con mucho relieve requerirán una mayor traslape.
- Densidad de puntos: puntos definidos por el número de puntos por metro cuadrado

- Ancho de escaneo: el sensor es como un escáner, recorre el terreno en forma de barrido, mientras mayor sea el barrido mayor será la eficiencia productiva, pero la densidad será menor.

Además de los componentes clave enumerados anteriormente, es necesario considerar otros aspectos como: la forma del límite del proyecto, la distribución de la vegetación, el impacto del relieve del terreno, la presencia de edificios altos u otras características de altura, cobertura nubosa, cuestiones de seguridad, condiciones del mar en zonas de costa, hora del día, condiciones climáticas, etc. (Albacete, 2011)

Existen especificaciones técnicas generales en torno al sensor LIDAR aerotransportado; la publicada por el Instituto Geográfico Militar (2016), donde menciona que “el vuelo se debe planificar a una velocidad adecuada para garantizar un traslape mínimo de 70 % longitudinal y 40 % transversal, que permita obtener la distancia mínima entre líneas de vuelo y así cubrir de manera homogénea la zona de estudio, cumpliendo la densidad exigida por metro cuadrado.”

Así también, el Instituto Geográfico Nacional y Centro Nacional de Información Geográfica (2014), sugieren “un recubrimiento transversal mínimo de 15% en zonas con poca orografía, sin embargo para zonas urbanas o con mayor orografía la planificación debe garantizar una cobertura uniforme”.

En relación a la temática expuesta, estos parámetros servirán de referencia en la planificación.

DJI PILOT

Se pueden programar los vuelos y realizar la planificación de los mismos en distintas aplicaciones, introduciendo los parámetros en la aplicación y pensando únicamente en el despegue y aterrizaje del RPA; el sensor se puede calibrar de manera que pueda realizar

una combinación de vuelo fotogramétrico y LIDAR. DJI PILOT es una aplicación intuitiva de control de vuelo disponible para diferentes dispositivos con el fin de planificar operaciones de vuelo, realizar inspecciones semiautomáticas y configurar los parámetros de vuelo en operaciones de fotografía y video (DJI, 2018).

Ejecución del vuelo

La ejecución es la realización misma del vuelo con: la aeronave, los sensores y el equipo humano necesario (piloto, operador y personal de campo) para llevar a cabo este proceso.(INGEOEXPERT, 2020)

VYO

Software característico del equipo LIDAR; el cual controla la calibración del sistema para comprobar la precisión y el buen funcionamiento del sensor LiDAR antes de ejecutar la misión de vuelo, los datos de navegación son transmitidos en VYO para visualización en tiempo real.

Posicionamiento GNSS-GPS

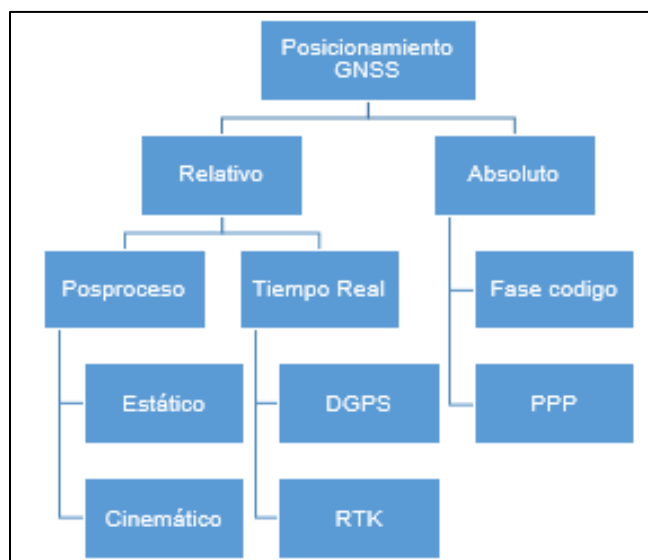
El término GNSS (Global Navigation Satellite System) es el nombre genérico que engloba a los Sistemas de Navegación por Satélite que proporcionan un posicionamiento geoespacial con cobertura global, es decir, este sistema permite determinar coordenadas geográficas de un punto con gran exactitud, bajo diferentes métodos de observación, según la instrumentación y el nivel de precisión.(Berné et al., 2014)

Métodos de observación

Berné et al. (2014), señala que no es posible establecer una clasificación para el posicionamiento basado en técnicas GNSS, solo es posible organizarlo bajo algún criterio cartográfico, resumido en la Figura 18.

Figura 18.

Métodos de posicionamiento u observación GNSS



Nota: Recuperado de (Berné et al., 2014)

En el presente estudio se utilizará el método RTK descrito a continuación: RTK significa Real Time Kinematic, posicionamiento cinemático en tiempo real, es la técnica que consiste en la colocación de dos equipos GNSS simultáneamente en diferentes sitios, en un punto donde se conoce sus coordenadas geográficas, denominado base o estación de referencia que estará en modo estático y el otro móvil o “rover” en el punto que se requiere conocer, se transmiten las observaciones de código y fase del receptor base al móvil calculando el vector con el propósito de obtener las coordenadas del punto en tiempo real, generalmente se usan equipos L1 y L2 que logran precisiones al centímetro (1 ó 2 cm + 1ppm) (González Alcaraz, 2010).

Equipos y programas

Existe una amplia gama de equipos y plataformas informáticas disponibles para este proyecto los utilizados son:

- **Equipo GNSS R8s.** sistema combinado de un receptor GPS de doble frecuencia con 24 canales, con rastreo de señales óptimo y un rendimiento de alta calidad (Trimble, 2017).
- **Trimble Business Center (TBC).** es una aplicación de escritorio que permite el procesamiento y administración de datos GNSS, presenta una serie de herramientas para realizar el postproceso puntos de control mediante ajustes por mínimos cuadrados (Trimble, 2006).

Archivos LAS

La suma de los procesos y los componentes del sistema LIDAR, referidos con anterioridad: el escáner, el sistema GPS y el IMU, nos permiten obtener datos crudos que se registran en el sensor directamente, mediante los siguientes programas se obtiene el archivo de extensión. LAS:

VNC. Son las siglas en inglés de Virtual Network Computing; que significan, Computación Virtual en Red, basado en una estructura de cliente servidor, un servidor compatible con VNC se inicia en cada Geo-MMS navigator, en el arranque que permite descargar el conjunto de archivos crudos.(EcuRed, 2019)

LIDARTool. Es una solución de software de posprocesamiento GPS y GPS / IMU totalmente automatizada, combina los resultados de la solución de navegación extraídos de la unidad, con los datos brutos de LiDAR, y produce una nube de puntos georreferenciada en formato .LAS (GEODETICS, 2018)

Procesamiento de las nubes de puntos LiDAR

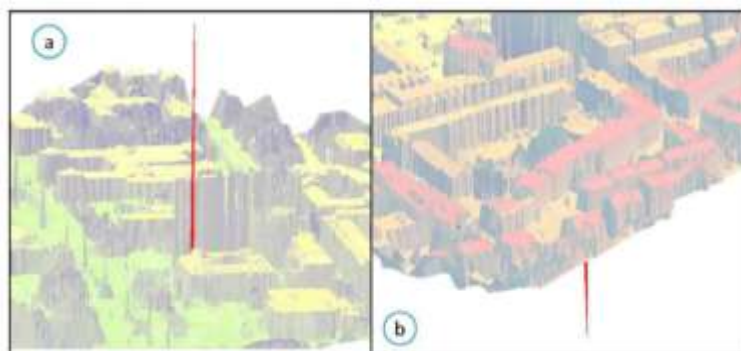
Depurado

Arranz (2013), lo ha señalado como " filtrado de errores groseros considerando: puntos aéreos erróneos, puntos redundantes, puntos erróneos multi-camino y puntos sobre

objetos móviles”. Ilustrados en la Figura 19, es indispensable identificar errores o redundancias existentes, debido a que esos puntos tienen un valor de cota exagerado con respecto a su entorno, ya sea más alto o más bajo que pueden ocasionar errores en los siguientes procesos: clasificación y filtrado detallados más adelante.

Figura 19.

Detección de puntos erróneos en los Modelos Digitales de Superficie



Nota: a. Rebote del pulso sobre objetos como aves o aviones; b. Incorrecta reflexión del haz de luz en superficies pulidas (puntos hundidos). Recuperado de Arranz (2013).

FUSION/LDV. Es una aplicación que consta de dos programas principales , FUSION y LDV (visor de datos LIDAR), orientada al análisis de datos LIDAR para aplicaciones forestales, pero incluye herramientas útiles en aspectos más generales, desarrollada por el Equipo de Modelos de Silvicultura y Bosques de la Rama de Investigación del Servicio Forestal de EE. UU.(McGaughey, 2018)(McGaughey, 2018)

Clasificación de las nubes de puntos

Albacete (2011), refiere que “la clasificación consiste en asignar atributos a los puntos registrados por el sistema LIDAR. Es decir, una vez obtenida la nube de puntos se puede definir como clasificación a la función que a cada retorno se le asigna un atributo o categoría”. Por lo general se diferencia: el terreno, vegetación alta, media y baja; edificaciones, los cables eléctricos, las carreteras, los puentes y el ruido.

Se han desarrollado varios algoritmos para clasificar las diferentes categorías en las nubes de puntos; sin embargo, no existe un programa que realice este proceso en su totalidad, por lo que se menciona un proceso de clasificación automática y clasificación manual (Jin, 2010). Como expresan Campoverde & Satián (2015), es fundamental describir las herramientas de clasificación manual ya que es un proceso de percepción visual realizado por el analista con el fin de corregir algunos retornos almacenados automáticamente en otra categoría. La clasificación debe cumplir con el siguiente estándar de acuerdo a la ASPRS:

Tabla 6.

Categoría de clasificación de los datos LIDAR

VALOR	DESCRIPCION
0	Creado, nunca clasificado
1	Sin clasificar
2	Suelo
3	Vegetación Baja
4	Vegetación Media
5	Vegetación Alta
6	Edificios
7	Puntos bajos (ruido)
8	Punto clave del modelo (punto de masa)
9	Agua
10	Vía de tren
11	Vía
12	Puntos solapados
13	Alambre de protección
14	Alambre de conductor fase
15	Torre de transmisión
16	Alambre conector de estructura
17	Puente
18	Puntos altos (ruido)
19	Estructura aérea
20	Terreno ignorado
21	Nieve
22-39	Reservado para la ASPRS
40	Punto batimétrico
42	Superficie de agua
43	Superficie derivada de agua
43	Objeto sumergido
44	Objetos IOH S-57
45	Sin fondo en el punto batimétrico
46-255	Reservado para la ASPRS

Nota: Recuperado de (American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, 2019)

Global Mapper. Es una aplicación de software GIS que proporciona una gama completa de herramientas de visualización, edición, análisis y presentación de datos espaciales; es un sistema de información geográfica desarrollado por Blue Marble Geographics el cual está al nivel de otros software GIS como ESRI, GeoMedia , Manifold System y MapInfo.(Global Mapper, 2020)

Filtrado

Consiste en separar puntos con cierto atributo del resto de la nube de puntos. La separación de los impulsos emitidos por el retorno del terreno y los impulsos que provienen de la superficie sobre el terreno, es el filtrado más simple, ya que existen otras más complejas; este proceso permite generar un modelo digital de elevación después de que los impulsos correspondientes a terreno son interpolados estadísticamente. (Fagua et al., 2011)

Modelos/Variables LiDAR

Los productos fundamentales generados a partir de datos LIDAR según algunos autores Liu et al. (2007) y Baltsavias (1999), citados en Sellers et al.(2015), son:

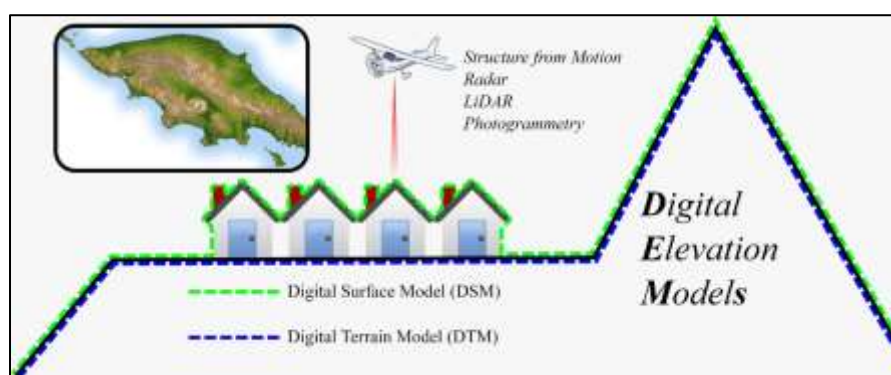
Modelo Digital del terreno. representación digital de la distribución espacial de uno o más tipos de información del terreno, incorpora accidentes geográficos y características específicas naturales como ríos, lagos, crestas, líneas de ruptura, etc. Por lo general se calcula usando el último retorno y existen diversas aplicaciones derivadas como: representación del relieve, curvas de nivel, tintas hipsométricas, mapas de sombreado, entre otros.(Molina, 2016)

Modelo Digital de elevación. la variable representada es la cota del terreno en relación a un sistema de referencia concreto por lo general el nivel medio del mar es decir modelos de terreno con información de elevación únicamente. (Zhilin et al., 2005)

Modelo Digital de superficie. representación digital topográfica de puntos regulares o irregulares representado los objetos sobre el terreno, todos los elementos ya sean naturales o artificiales presentes en el terreno. Este modelo suele calcularse utilizando el primer retorno dando como resultado productos como: ortofotos, mapas de ciudad 3D, realidad virtual y animación.(Molina, 2016)

Figura 20.

Modelos Digitales



Nota: Recuperado de (Arbeck, 2015)

Imagen de Intensidad. se obtiene a partir de la interpolación de la amplitud de la señal, que retorna al sensor después de rebotar en la superficie terrestre similar a la banda del infrarrojo de una ortofoto o imagen satelital. (Global Mapper, 2020)

Estadísticas y Control de Calidad

Estadísticos

El principio general para evaluar la precisión vertical de un conjunto de datos es comparar las elevaciones obtenidas del conjunto de datos con los datos de referencia, en base a esas diferencias es posible calcular diferentes parámetros estadísticos como: media, desviación estándar, valores mínimos, valores máximos, error medio, entre otros

Error típico de estimación (RMSE).

En este caso se calcula el error cuadrático medio mediante la ecuación 3 para obtener una evaluación de los resultados. (Liu, 2011)

Ec.3

$$RMSE_Z = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z_{i(mapa)} - z_{i(control)})^2}$$

- RMSE, representa el error cuadrático medio en la variable elegida
- n, número de puntos sobre el terreno usados como referencia
- z (mapa) elevación de los datos LIDAR o la coordenada en la dirección especificada en el conjunto de datos
- z (control), elevación de los puntos sobre el terreno usados como referencia
- i, muestra el rango de 1 hasta n

Control de calidad

De acuerdo a Ariza et al. (2017) la exactitud posicional es parte de la calidad de la información geográfica que permite determinar si un producto o proceso cumple o no con determinados parámetros, en base a esto aceptar o rechazar estos productos desde una perspectiva posicional.

En este sentido existen varias normas o estándares referidas a metodologías de control posicional que permiten evaluar cartografía, entre las más conocidas están: Ordnance Survey (OS), Standardization Agreement (STANAG), Engineering Map Accuracy Standard (EMAS), National Map Accuracy Standard (NMAS), National Standard for Spatial Data Accuracy (NSSDA), Positional Accuracy Standardas for Digital Geospatial Data (PASDG), entre otras.

De acuerdo a Ruano (2008), citado en Galarza (2014), a nivel nacional se recomienda el uso de la norma NSSDA que a su vez está respaldada por la ASPRS (2014) para errores considerados con una distribución normal.

El Estándar Nacional de Precisión de Datos Espaciales (*NSSDA*) se desarrolló por el Federal Geographic Data Committee (FGDC), donde la exactitud posicional se determina a partir del cálculo del RMSE para XY por un lado, y otro RMSE para la variable Z o elevación, obteniendo el error real de la muestra con un determinado nivel de confianza, esto muestra el índice de calidad de los productos en unidades reales sobre el terreno, sobre una muestra de mínimo 20 puntos de control en un nivel de confianza del 95% y permite al usuario establecer si los resultados van conforme a sus objetivos. (Chuquitarco, 2018)

CAPITULO III

METODOLOGÍA

Generalidades

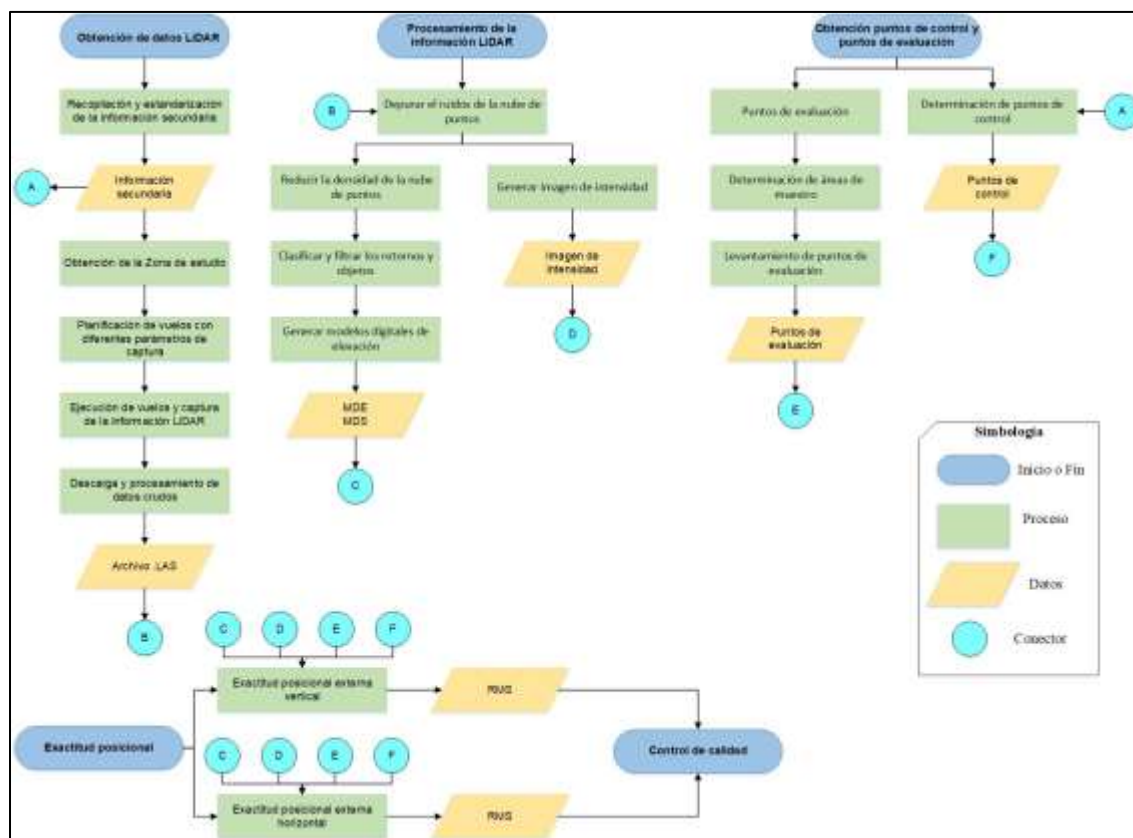
En el presente proyecto se pretende generar una metodología de procesamiento de nubes de puntos de LiDAR aerotransportado mediante vehículos aéreos no tripulados UAV; con el objetivo optimizar la obtención y evaluar la calidad de la información resultante.

Para el estudio se utilizarán tres métodos: experimental, inductivo y comparativo; experimental, al momento de establecer los parámetros de vuelo que nos permitan obtener nubes de puntos en altos niveles de precisión; inductivo, debido a que la base es una zona piloto de la zona de estudio total; es decir, de lo particular a lo general; y comparativo, ya que las coordenadas de la nube de puntos obtenidas, se relacionarán con la verdadera posición de la tierra tomando como base información secundaria; el flujo de trabajo general se ilustra en la Figura 21. Para la investigación se definieron las siguientes fases:

- Fase 1: Obtención de datos LIDAR
- Fase 2: Procesamiento de la información LiDAR
- Fase 3: Obtención de puntos de elevación
- Fase 4: Exactitud posicional

Figura 21.

Metodología general del proyecto CORREGIR



Recopilación de información secundaria

En este proyecto previo a cualquier proceso, la recopilación de información disponible de la Universidad se consideró un proceso fundamental, debido a que en base a las mismas se determinarían los siguientes procesos. Por ejemplo, con la existencia de puntos de control para el control de calidad; si existía el levantamiento topográfico de toda la Universidad, con el fin de usarlo como parámetro de evaluación a futuro; o curvas de nivel que permitan evaluar parámetros utilizados en la clasificación, así mismo la ortofoto que permite identificar a priori la consistencia entre la nube de puntos y los elementos existentes; modelos digitales disponibles que también pueden ser fuente de comparación, entre otros.

Con estos antecedentes, la información obtenida, gracias a la predisposición de varios profesionales docentes fueron: ortofoto de la universidad, curvas de nivel del estadio cerrado, monografías de: las placas del IGM, mojones, puntos de control, puntos GNSS, puntos de nivelación y puntos foto identificables; también información de tipo vectorial que incluye: caminos, linderos, calles, anillo vial, edificaciones, parqueaderos, entre otros. Toda la información se evaluó y se utilizó en diferentes procesos del proyecto de investigación. Iniciando por estandarizar y mantener todo bajo un mismo sistema de referencia.

Obtención de datos LiDAR

Determinación de zonas de estudio piloto

Previo a la planificación, se realizó el reconocimiento de la zona de estudio, campus ESPE- SANGOLQUI, con el objeto de determinar las áreas piloto de toma y futura evaluación, en donde se tomó en cuenta: la existencia de puntos de control materializados y una buena distribución de los mismos (Figura 22), acceso a las zonas altas de las edificaciones, altura de cobertura vegetal e infraestructura, características de vegetación baja, media y alta y finalmente, la existencia de información secundaria; así como los parámetros mencionados en el Capítulo II en la sección de Planificación de Vuelo. Las zonas elegidas se pueden ver como parte de los resultados en el capítulo IV.

Figura 22.

Distribución puntos de control existentes



Nota: Los puntos de control se revisaron con GPS navegador en base a monografías y se verifico que existan físicamente.

Plan de vuelo

Una vez definido y hecho el reconocimiento de la zona piloto, es importante conocer los equipos que se van a utilizar, tanto la plataforma como el sensor, es decir: su configuración, funcionamiento y características, las cuales se encuentran mencionadas en las Tablas 2 y 3 del Capítulo II; esta información permitirá determinar los parámetros que se pueden modificar y considerar en el plan de vuelo.

La aplicación DJI Pilot permitirá desarrollar los planes de vuelo; en esta, es posible ingresar: altura de vuelo, traslape longitudinal, traslape transversal y velocidad. A continuación, en la Tabla 7 se resumen los parámetros elegidos en la propuesta inicial para las pruebas de vuelo, esto en función de las Normas IGM e IGN descritas en el

Capítulo II, se volará con diferentes aturas, traslapes y velocidades con la finalidad de diferenciar la información que se obtendrá.

Tabla 7.

Planificación de parámetros de vuelo

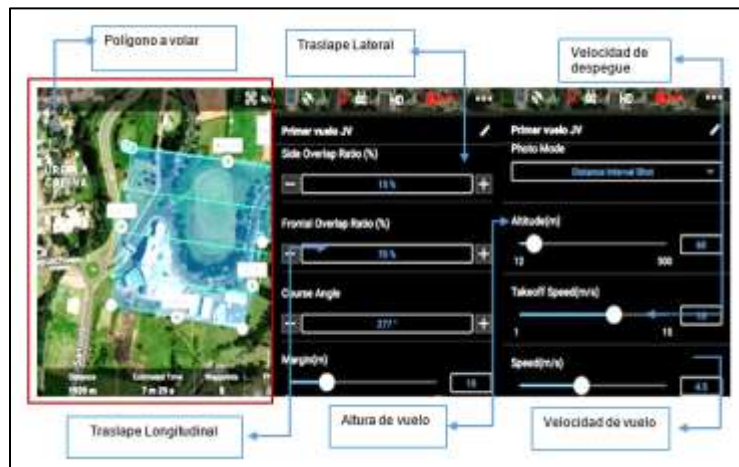
Número de vuelo	Altura de vuelo (m)	Traslape Longitudinal (%)	Traslape Transversal (%)	Velocidad (m/s)
1	60	70	15	5
2	80	70	15	5
3	100	70	15	5
4	60	70	40	5
5	80	70	40	5
6	100	70	40	5
7	60	70	70	5
8	80	70	70	5
9	100	70	70	5

Ejecución del vuelo

Previo a la ejecución del vuelo, se colocaron objetos para realizar un punto de apoyo fotogramétrico, a su vez, se realiza un checklist en tres ámbitos importantes: condiciones de la aeronave (**Anexo A**), condiciones meteorológicas y equipo humano. Una vez realizado el análisis de pre-vuelo se procede a realizar la programación de los mismos con los parámetros mencionados en la Tabla 7, como se muestra a continuación en la Figura 23.

Figura 23.

Parámetros de vuelo aplicación DJI Pilot



Posteriormente, se realiza la ejecución del vuelo; una vez que despegó el equipo como se ilustra en la Figura 24, la aplicación VYO (Windows de Geodetics), integrado a la aeronave, permite evaluar los parámetros de calibración; el parámetro más importante a verificar, es la redundancia de GPS, esta debe tener un valor de 1.7, lo cual indica, que se puede iniciar el levantamiento, registro o captura de información LiDAR. Las pruebas de vuelo se realizaron con diferentes parámetros esta tabla resumida se la puede verificar en el capítulo IV de resultados.

Figura 24.

Despegue Drone Matrice 600 pro

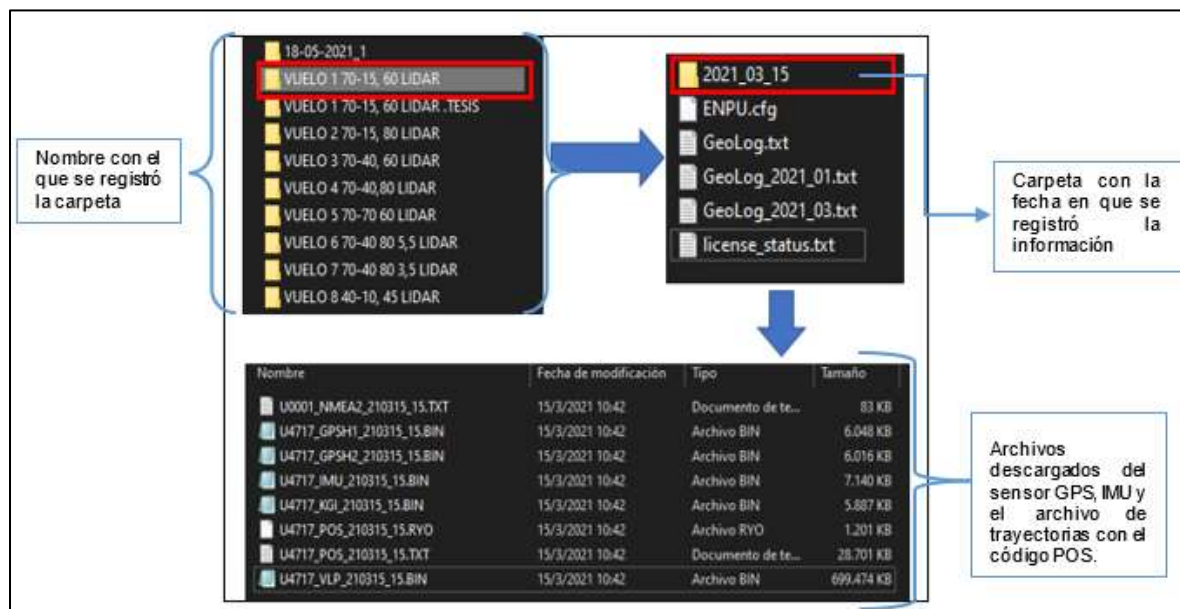


Descarga de datos

Finalizada la captura de datos, se requiere realizar una conexión entre el sensor y la computadora mediante cable land, a manera de ejemplo visualizar la Figura 25, con la finalidad de: apagar el sensor y realizar la descarga de datos brutos; este proceso se llevará a cabo con la ayuda del software Tight VNC viewer (propio del equipo).

Figura 25.*Descarga de datos brutos*

A través de Tight VNC viewer, se genera una carpeta con un código específico del día en el que se realizó el levantamiento; la misma, contiene el registro de información LIDAR con todos sus componentes. La Figura 31 detalla de forma resumida toda la información que se puede encontrar en la carpeta; es decir, los datos crudos.

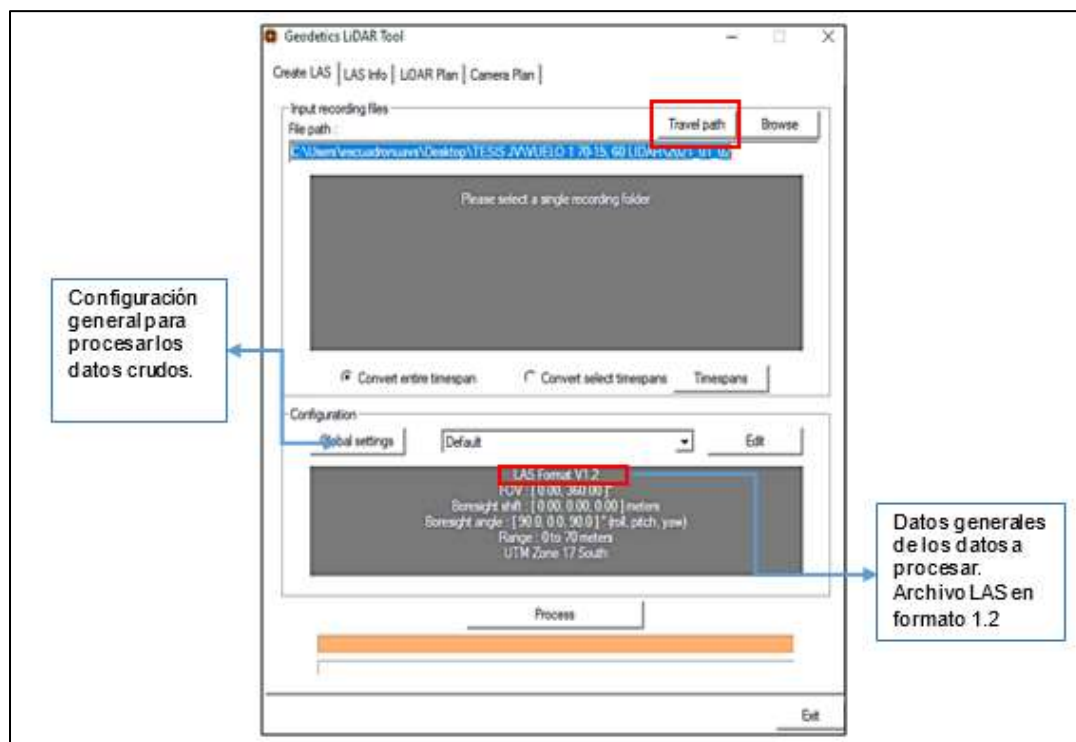
Figura 26.*Datos crudos de información LIDAR*

Obtención del archivo LAS

En la plataforma informática LidarTool, la opción Travel Path permite generar un archivo KML, en el cual se visualiza la trayectoria total que siguió el drone. La carpeta mencionada anteriormente (ilustrada en la Figura 26), en este caso VUELO 1 70-15, 60 LIDAR, señalado en rojo, se la arrastra en la pestaña “Create Las” de la aplicación mencionada, como se visualiza en la Figura 27 y desplegar la herramienta Travel path. El resultado se lo puede identificar en el capítulo IV.

Figura 27.

Generación Travel Path en LIDARTool

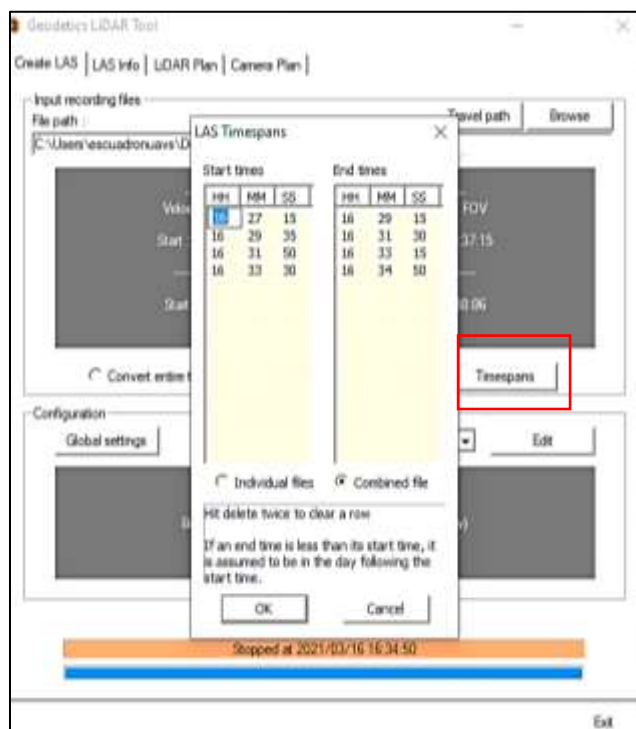


El archivo de trayectorias es relevante para el procesamiento, ya que permite obtener la nube de puntos LAS en un solo archivo o en archivos independientes por cada línea de vuelo; en la sección TimeSpans señalado con rojo en la Figura 28, se ingresarán los rangos de tiempo, mismos que estarán en función del archivo de trayectorias (KML).

Posteriormente, se envía a procesar y en la carpeta original se crea el archivo con extensión LAS, de acuerdo a los requerimientos del usuario; es decir, archivos individuales por línea de vuelo o un solo archivo considerando cada línea de vuelo; o a su vez todo lo que se ha rastreado, los resultados se pueden visualizar en el Capítulo IV.

Figura 28.

Procesamiento nube de puntos en LIDARTool



Parámetros modificados en el plan de vuelo

Los dos primeros vuelos se realizaron con la planificación propuesta en un inicio bajo los parámetros en traslapes de 70% longitudinal y 15% lateral, variando la altura de 60 m y 80 m. Por un tema de recursos, los vuelos de 100 metros de la planificación inicial se los postergo para una última ejecución y los siguientes vuelos ejecutados fueron el los de altura 60 m y 80 m, pero con los parámetros en traslapes de 70% longitudinal y 40% lateral.

Una vez ejecutados los cuatro primeros vuelos se pudo identificar que: los traslapes 70% longitudinal y 40% lateral, tienen mayor cobertura en la zona piloto; en el tema de altura, a 80 m existió menos registro de información y finalmente la velocidad fue la misma. El despliegue de la nube de puntos en estos vuelos se encuentra en el capítulo IV de resultados.

Con estos antecedentes, se decidió descartar las pruebas con altura de 100m, se consideró mantener el traslape, mantener la altura de 80 m y variar la velocidad, con la idea de que a menor velocidad existiría mayor barrido de información. Donde los siguientes vuelos tenían el objetivo de comprobar la variable velocidad, así que la planificación fue en: altura 80m, solape longitudinal de 70% y entre pasadas de 40%; en velocidad de 3,5 m/s y para el siguiente vuelo la velocidad sería de 5,5 m/s. En el capítulo IV de resultados se pueden distinguir estos resultados y apreciar su análisis.

Por todo lo mencionado, en los párrafos anteriores, se determinó que la velocidad se debe mantener; la variable “traslapes” se puede aumentar con el fin de tener un barrido completo de información, en 70%-70% en los dos sentidos, manteniendo la altura de 60m y la velocidad una vez más en 4,5 m/s. Las observaciones de este vuelo se visualizan en el capítulo IV.

Los vuelos del 1 al 7, muestran que la información no se está registrando en su totalidad y que el parámetro altura de vuelo es el que genera áreas sin registro de información, donde se considera disminuir la altura de vuelo. A su vez, se cambia de zona piloto al considerar: la posibilidad de interferencia con los equipos utilizados o algún problema interno en el mecanismo de rastreo. Los resultados de la zona piloto 2, se lo puede encontrar en el capítulo IV de resultados.

En las especificaciones técnicas internas del sensor VL PUCK-16, menciona que, “la altura límite es 120 m y la altura ideal es de 50 m” ; al mismo tiempo, la tabla 3 de

características del sensor, detallada en el capítulo II, recomienda valores entre 30 y 40 m; es por esto, que en el último vuelo se planifico con 40 m de altura, pero por seguridad del equipo se la modifiko a 45 m, y esta vez, se redujo el traslape longitudinal al 10% y el lateral a 40% ,cuyo resultado se ilustra en el capítulo IV.

En base a todo lo descrito la Tabla 7 inicial (Planificación de parámetros de vuelo), se modificó, una vez ejecutados los vuelos en campo. Finalmente, el resumen de los parámetros que se utilizaron para cada vuelo, se demuestra en la Tabla 8.

Tabla 8.

Parámetros de vuelo realizados

Número de vuelo	Altura de vuelo (m)	Traslape Longitudinal (%)	Traslape Transversal (%)	Velocidad (m/s)
1	60	70	15	4,5
2	80	70	15	4,5
3	60	70	40	4,5
4	80	70	40	4,5
5	80	70	40	3,5
6	80	70	40	5,5
7	60	70	70	4,5
8	45	40	10	4,5

Nota: Los vuelos del 1 al 5 se realizaron a la par con fotogrametría, los vuelos del 6 al 8 se realizaron únicamente LIDAR.

Procesamiento de la información LiDAR

Es necesario recalcar que la nube de puntos se la obtiene a través de LIDAR aerotransportado en UAV, que, al tener menor altura y por la capacidad del sensor, genera nubes de puntos densas a tal grado de obtener más de 100 puntos por metro cuadrado. La densidad es uno de los parámetros que dirige el procesamiento del archivo. LAS y la precisión de sus derivados: modelos digitales de elevaciones, modelos digitales de terreno, modelos digitales de elevación, modelos digitales de terreno. entre otros. Para

agilizar su procesamiento, es factible reducir esta densidad con ayuda de algoritmos matemáticos, que a continuación se detallan.

Reducción de la densidad de puntos

Este procesamiento se llevó a cabo utilizando el software FUSION/ LDV a través de las herramientas “Catalog” y “Thindata”.

En función de que las herramientas se ejecuten de manera eficaz, es necesario tener dos consideraciones: la sintaxis disponible en el manual del programa y el formato en el que se ejecutará. En la Tabla 9 se ilustra la estructura del código necesario en la ejecución de la herramienta; la explicación detallada se encuentra en el **Anexo B**, y los resultados se presentan en el Capítulo IV.

Tabla 9.

Sintaxis “Catalog”

Syntax		
Catalog [switches] datafile [catalogfile]		
Código	Explicación	Código "Catalog"
Catalog	Nombre de la herramienta que se desea utilizar y ubicación completa	C:\FUSION\Catalog.exe
Switch	Parámetros/manual de usuario	density:1,10,100
Datafile	Nombre y ubicación completa del archivo de datos LiDAR	D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045.las
Catalogfile	Nombre base para el archivo de salida/se agregaran extensiones	D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045_cata
Código "Catalog"		
C:\FUSION\Catalog.exe /density:1,10,100 D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045.las D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045_cata		

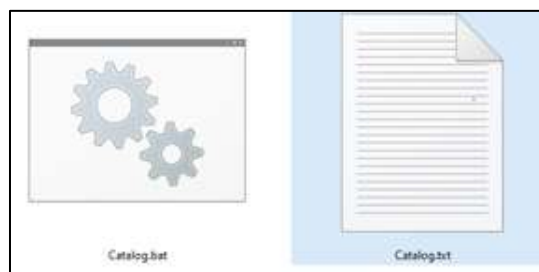
Nota: La información de esta tabla representa un resumen del código descrito en el Manual de usuario de FUSION escrito por McGaughey (2018).

El código debe ser escrito en el editor de texto de Windows y requiere que el archivo se guarde con la extensión .bat; el cual, tiene la capacidad de ejecutar programas

secuenciales; al momento de guardar el archivo solo se sustituye la extensión .txt por la extensión .bat, como muestra la Figura 29.

Figura 29.

Formato de grabación



Teniendo las mismas consideraciones de la Tabla 9, se redacta el código para reducir la densidad de puntos, ahora mediante el uso de la herramienta “ThinData” (ver Tabla 10); adicionalmente puede encontrar una explicación más detallada en el mismo **Anexo B**.

Tabla 10.

Sintaxis código ThinData

Syntax		
ThinData [switches] OutputFile Density CellSize DataFile		
Código	Explicación	Código "ThinData"
ThinData	Nombre de la herramienta que se desea utilizar y ubicación completa	C:\FUSION\ThinData.exe
OutputFile	Nombre y ubicación del archivo de salida	D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\DENSIAD\40-10\401045_dens.las
Density	Densidad de puntos deseada por unidad cuadrada	10
CellSize	Tamaño de celda para calcular la densidad de datos en unidades cuadradas	1
DataFile	Nombre y ubicación del archivo de entrada	D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045.las
Código "Catalog"		
C:\FUSION\ThinData.exe D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\DENSIAD\40-10\401045_dens.las 10 1 D:\ESPE\TESIS\VUELOSJV_JV\40-10\401045.las		

Nota: La información de esta tabla representa un resumen del código descrito en el Manual de usuario de FUSION escrito por McGaughey (2018)

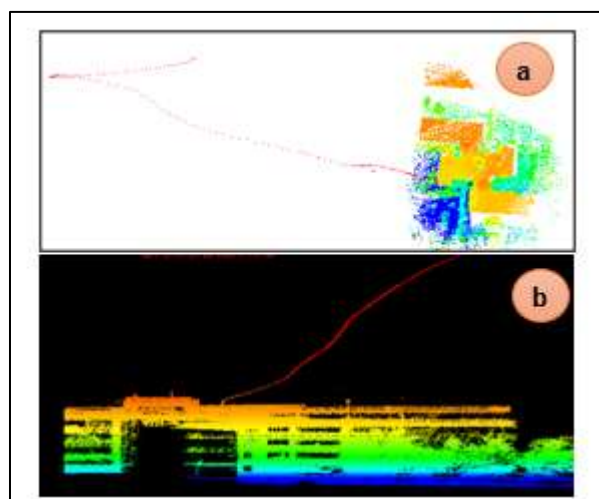
Depuración de la nube de puntos

Realizada la reducción de la densidad de puntos, se continua con el tratamiento del archivo; con la ayuda del software GlobalMapper citado en el Capítulo II, se procede a la depuración de la nube de puntos esta se puede realizar de manera automática o manual. A continuación, se resume en que consiste cada depuración:

Depuración Manual de errores groseros. Identificar aquellos puntos con un valor de cota exagerado con respecto a su entorno, ya sea más alto o más bajo. Se recomienda iniciar por la depuración manual como se explica en el **Anexo C** de manera detallada. La Figura 30 ilustra al proceso a seguir en la identificación de estos puntos y como iniciar la depuración, en a) consta la visualización en 2D de la nube de puntos y es fácil visualizar estos puntos, al igual que en b) pero vista en perfil de acuerdo a la elevación; la metodología consiste en señalar con las herramientas del “Path Profile” el ruido y ubicarlo en la categoría de ruido, el resultado de esta depuración se ubica en el capítulo de resultados.

Figura 30.

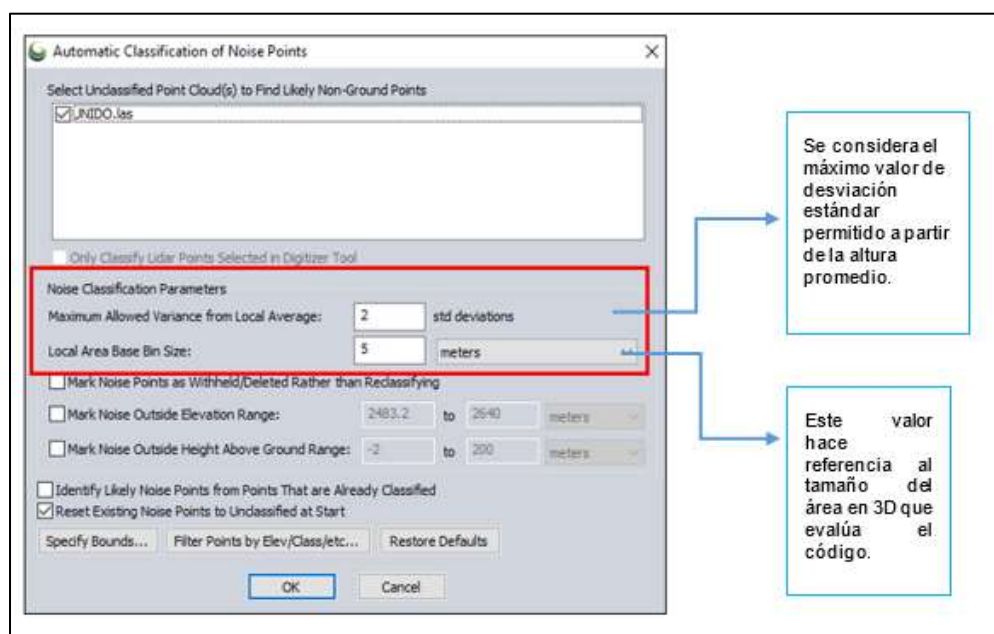
Proceso de depuración manual de errores groseros



Depuración Automática Puntos de Ruido. Para llevar a cabo este proceso se utilizó la herramienta “Auto- Classify Noise Points” donde se ingresan los parámetros de clasificación de ruido, como: la varianza máxima permitida del promedio local del total de datos y el tamaño del contenedor en metros; estos valores van conforme el comportamiento de los datos. Los resultados de estos procesos se pueden encontrar en el Capítulo IV y a su vez el proceso con detalle en el **Anexo c**.

Figura 31.

Proceso de depuración automático de ruido



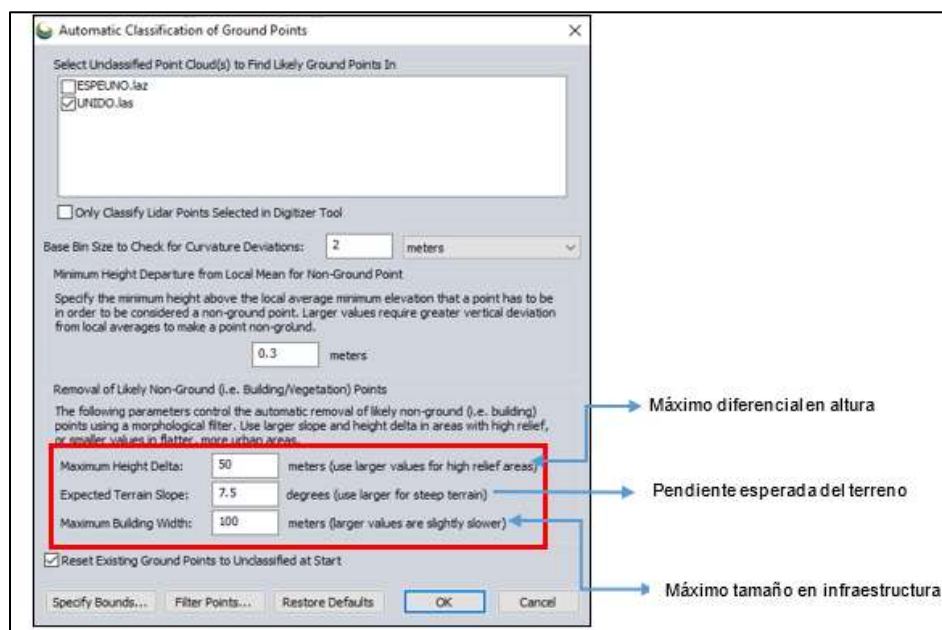
Clasificación Automática

Clasificación Automática de Puntos de Suelo. Mediante la herramienta “Auto- Classify Ground Points”, en donde se despliega una ventana con los parámetros de clasificación de suelo como: el tamaño del contenedor, la desviación media de altura mínima para puntos no terrestres, la altura mínima por encima de la elevación mínima promedio, entre otros visibles en la Figura 32; es importante señalar que, si un punto sobrepasa la tolerancia establecida por debajo o por encima de la media, será clasificado

automáticamente como un punto no perteneciente a la clase suelo, los resultados se ilustran en el Capítulo IV y se puede encontrar este proceso de manera más detallada en el **Anexo C**.

Figura 32.

Clasificación Automática de Puntos de suelo



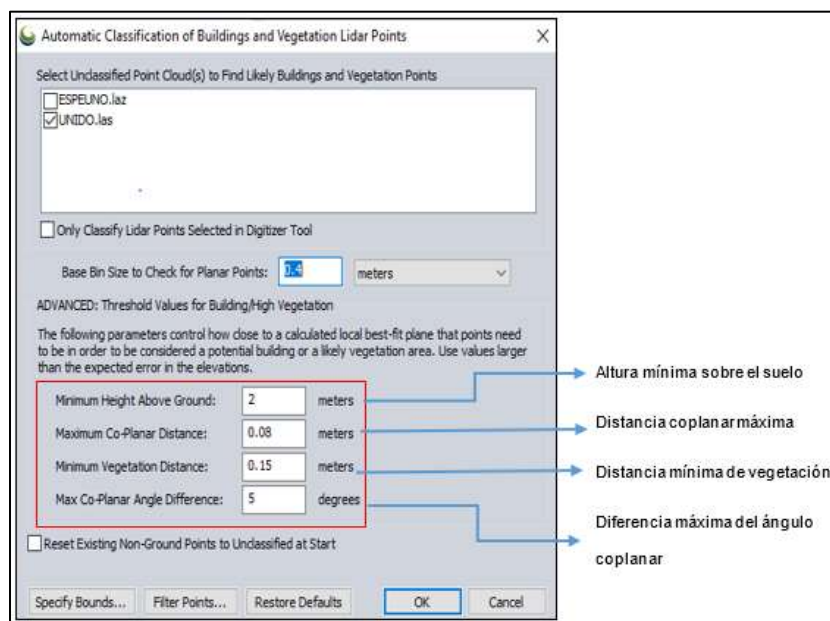
Otros parámetros importantes en la clasificación automática, (ver figura 32) son:

- La variación máxima que se permite entre un punto de elevación y otro, evaluada en metros.
- La pendiente esperada del terreno es el ángulo del terreno y este valor va en grados, en zonas intervenida por el hombre se utiliza entre 88° y 90°; para terreno el ángulo suele ser entre 10° y 15°. (Barragán et al., 2017)
- El valor máximo tamaño en infraestructura, debe aproximarse al borde de la construcción más grande en la zona del proyecto.

Clasificación Automática de Puntos de Edificios y vegetación. Con ayuda de la herramienta “Auto- Classify Buildings and Vegetation Points” (Figura 33), se determinaron los parámetros que controlan qué tan cerca de un plano local de mejor ajuste calculado, deben estar los puntos para ser considerados un edificio potencial o un área de vegetación probable. El proceso se detalla en el **Anexo C**, y los resultados se los puede visibilizar en el Capítulo IV.

Figura 33.

Clasificación Automática de Puntos de edificios y vegetación



Sobre la figura 33 se destacan los siguientes valores:

- La altura mínima sobre el suelo hace referencia a partir de que elementos se van a considerar la vegetación o a su vez la construcción.
- Con respecto a la distancia coplanar máxima es la distancia que existe entre un punto y el plano de su proyección según Barragán et al.(2017), los valores habituales van entre 0,5 y 1,5m.

- La distancia mínima de vegetación indica en metros la separación existente entre vegetación y edificación.
- Al referirse al ángulo coplanar se entiende como el ángulo máximo entre un punto y la proyección con el plano del triángulo y el vértice del triángulo más cercano. En general se utiliza valores pequeños en terreno planos a diferencia de zonas con fuertes pendientes el valor es más grande. (Barragán et al., 2017)

Clasificación Manual

Con el objetivo de revisar las clases y lograr mejores resultados después de la clasificación automática, el archivo se filtra para realizar una clasificación manual; se habilita la clase en la que se va a trabajar, por tanto, siguiendo la recomendación de Torres (n.d.) y la empresa Lutopsa, se empieza por la clase de edificación.

La clasificación manual se facilitará mediante el uso de la ortofoto de la zona (Figura 34); en la capa de edificios se realiza una inspección visual y se identifican los puntos que no forman parte de la categoría para reclasificar con la herramienta “Select by drawing polygon” detallada

Figura

34.

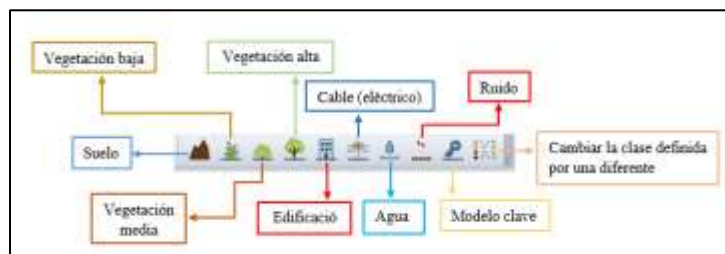
Proceso de reclasificación



Identificados y seleccionados los puntos, se asignan la categoría a la cual pertenecen los mismos, se procede a la reclasificación definiendo la clase correspondiente, estas clases se detallan en la Figura 35.

Figura 35.

Barra de herramientas para la clasificación manual

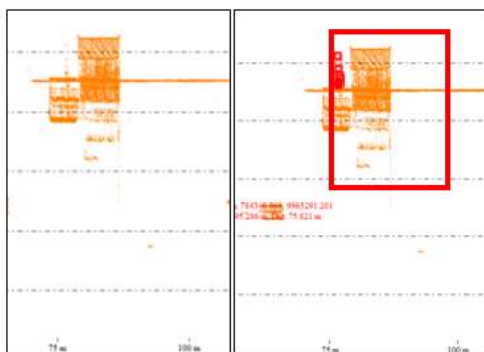


Otra forma de realizar una reclasificación y con el objetivo de obtener mejores resultados, es mediante un análisis de perfiles; se procede a depurar la clasificación; es decir, realizar perfiles para observar hasta dónde llega la edificación y si existen puntos que no corresponden a esta clase. Con la ayuda de la herramienta "Path Profile", se traza un perfil en la zona de interés, se seleccionan los puntos que no corresponden a esta categoría para finalmente asignarles una nueva clase, como se ve en la Figura 36. Todo el proceso de clasificación manual se la encuentra de manera más detallada en el Anexo C. Finalmente, los resultados de la misma se presentan en el Capítulo IV.

Figura

36.

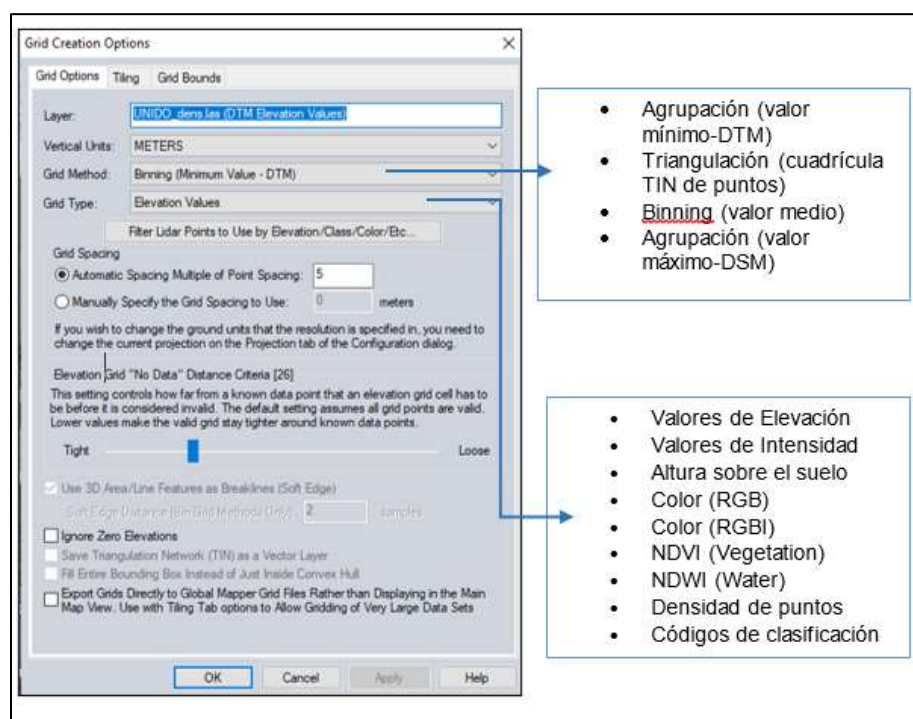
Reclasificación por perfiles



Con la nube de puntos clasificada en sus diferentes categorías, lo siguiente es filtrar, de acuerdo a los objetivos, lo cual se describe más adelante. Utilizando la opción “Create Elevation Grid” en el software GlobalMapper, el ejemplo de esta herramienta se ilustra en la figura 37. En general, es factible elegir la variable que se va a tomar de la nube de puntos y el método de interpolación, los resultados se despliegan en función de las clases que se encuentre filtradas en el momento de procesar esta herramienta; para una mayor explicación se puede observar el **Anexo C**.

Figura 37.

Parámetros de la herramienta Create Elevation Grid



Los principales productos derivados de una nube de puntos LIDAR, citados en el capítulo II, son: modelos digitales, con diversas aplicaciones, ya sea de elevación o de superficie e imagen de intensidad. En tal sentido, el proceso de depuración, clasificación y filtrado, permiten la obtención de los mismos, a continuación, se describe la metodología para cada uno de ellos.

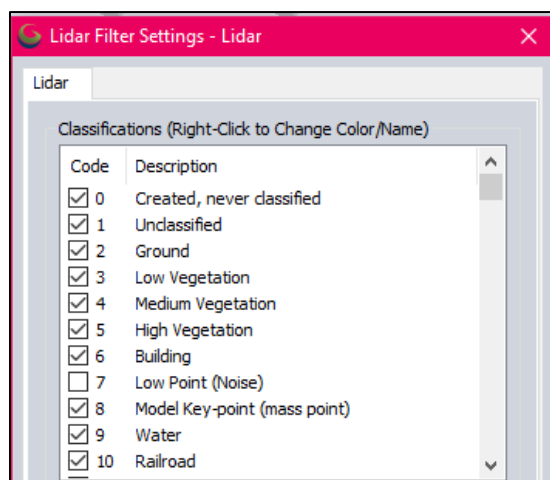
Obtención de Imágenes de Intensidad

Se obtiene la imagen de intensidad a partir de la nube de puntos del tipo superficial, sin reducir la densidad, teniendo en cuenta únicamente la depuración de ruido bajo y ruido alto; esta consideración se tiene, debido a que las estructuras se identifican de mejor manera en la imagen creada con el valor de intensidad de todos los retornos.

Con la opción “Create Elevation Grid” se obtiene la imagen de intensidad con todas las clases filtradas y apagadas de correspondientes a ruido (ver Figura 38), acuerdo bajo el método de triangulación, con la variable “Intensity”. Los resultados de esta herramienta se encuentran en el capítulo IV.

Figura 38.

Clases ASPRS habilitadas en Imagen de intensidad



Obtención de Modelos digitales (MDS/MDE)

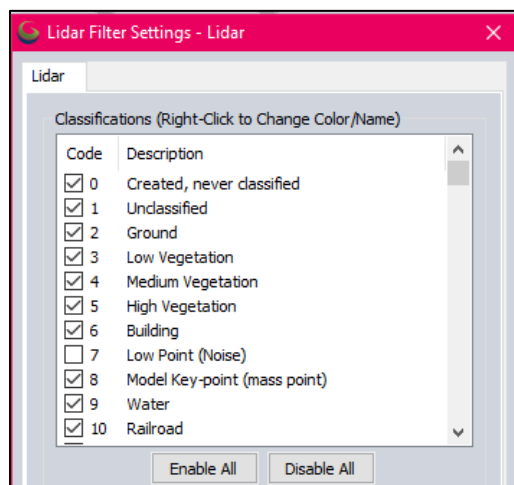
Modelo digital de superficie

Para generar el modelo digital de superficie se requiere filtrar por clases, en este caso se deshabilitan las clases de “Low point (noise)” o ruido bajo y “High point (noise)” o ruido alto, y se mantiene el resto de categorías habilitadas o del ser el caso únicamente la clase “Building” o edificaciones, en esto sentido todos los elementos superficiales se han

activado, como se muestra en la Figura 39. En el capítulo IV se ilustran los modelos que se han obtenido.

Figura 39.

Clases ASPRS habilitadas en modelo digital de superficie

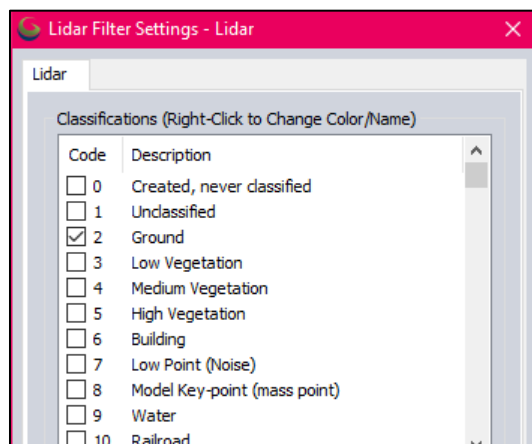


Modelo digital de elevación

Para el modelo digital de elevación, se activa únicamente la clase “Ground” o suelo, esto se visualiza en la Figura 40. En este sentido, los modelos digitales de elevación de los vuelos se ilustran en la sección de resultados.

Figura 40.

Clases ASPRS habilitadas en modelo digital de elevación



Exactitud Posicional

Se utilizó la metodología NSSDA, mencionada en el capítulo II en la sección de control de calidad. Es necesario mencionar que en esta investigación se realiza la evaluación de exactitud posicional externa horizontal y la exactitud posicional externa vertical, con externa se refiere a que, la comparación será entre datos lidar e información externa, en este caso con datos GPS. Esta información permite comprobar el comportamiento del LIDAR aerotransportado sobre el terreno y sobre elementos de superficie. En relación a esto se inicia con la obtención de los puntos GNSS.

Planificación puntos de control y puntos de evaluación

En esta sección se hace la distinción entre puntos de evaluación (levantados en elementos superficiales) y puntos de control (levantados en elementos en tierra); debido a que, se han obtenido por diferentes métodos y tendrán diferentes usos en el **tema de exactitud posicional detallado más adelante**.

Puntos de control. Se utilizó información secundaria disponible en la Universidad, principalmente las monografías de 20 puntos de control que cumplen con las recomendaciones de Ruano (2008) y ASPRS (2014), en contexto de: la distribución, cantidad de la muestra en la zona de estudio y método de observación; por lo que la planificación en este sentido se definió en: recolectar, complementar y ordenar la información secundaria existente, como se puede ver en la Figura 27 al inicio de este capítulo y en la Figura 43 con todos los puntos recolectados en la zona de estudio. El resultado de los puntos de control utilizado se ilustra en el Capítulo IV.

Figura 41.

Distribución puntos de control, mojones, puntos GNSS y puntos fotoidentificables



Puntos de evaluación. Se tomó en cuenta lo citado por la ASPRS (2014) donde señala que, si los puntos de chequeo son menos precisos en comparación con los puntos de control estáticos se pueden utilizar en cualquier cantidad como datos suplementarios, siempre y cuando, los puntos de evaluación sean al menos tres veces más precisos que el conjunto de datos a evaluar (nube de puntos LiDAR); en el presente proyecto se busca evaluar el desplazamiento de edificaciones, en este sentido, al ser polígonos se consideró levantar la forma con al menos tres puntos de la infraestructura.

Además, para la planificación de estos se analizó: la accesibilidad a las zonas altas de los edificios, la seguridad de los equipos a utilizar, los obstáculos presentes, la distancia con la base y cumplir con una distribución uniforme en toda la zona de estudio, ilustrado en la Figura 42 con un total de 170 puntos.

Figura 42.

Planificación puntos de elevación



Levantamiento de puntos de evaluación. se utilizaron dos equipos GPS doble frecuencia de marca Trimble modelo R8. El levantamiento se realizó con mediciones continuas, épocas de 5 segundos, tiempo de observación de 5 segundos y la máscara de elevación de 15° con respecto al horizonte de la antena.

En primer lugar, se define la base o estación de referencia en un punto con coordenadas conocidas como se indica en la Figura 43, con las monografías disponibles de los hitos de la Universidad y se inicializa el tipo de levantamiento con la antena R8 definida como base, a continuación, se fija la conexión entre base y móvil.

Posteriormente se inició el levantamiento de los puntos de evaluación con el equipo móvil en este caso la otra antena R8 con ayuda de un bastón manteniendo la medición siempre en fijo, como puede apreciarse en la Figura 44.

Figura 43.

Base de referencia



Figura 44.

Toma del punto RTK



Selección de los puntos de evaluación. Se hace referencia a los puntos de evaluación, ya que, se tomaron en campo 190 puntos y se eligió los que permitan delimitar la forma de la infraestructura y a su vez tengan una distribución uniforme en toda la zona de estudio; sobre toda en las zonas piloto a utilizar, con los puntos de evaluación se generó un archivo vectorial de puntos a partir de las observaciones GPS seleccionadas, estos datos se los considera como verdaderos debido a la precisión con la que fueron levantados. Los puntos obtenidos están ilustrados en la Figura 45. Sin embargo, los

puntos de control que se usaron se pueden identificar en la sección de resultados Capítulo IV.

Figura 45.

Distribución puntos de evaluación



De acuerdo al objetivo de esta investigación se ha detallado la obtención de todos los elementos requeridos para llevar a cabo la evaluación de la exactitud posicional. En consecuencia, los siguientes apartados contienen la metodología utilizada en base a los mismos.

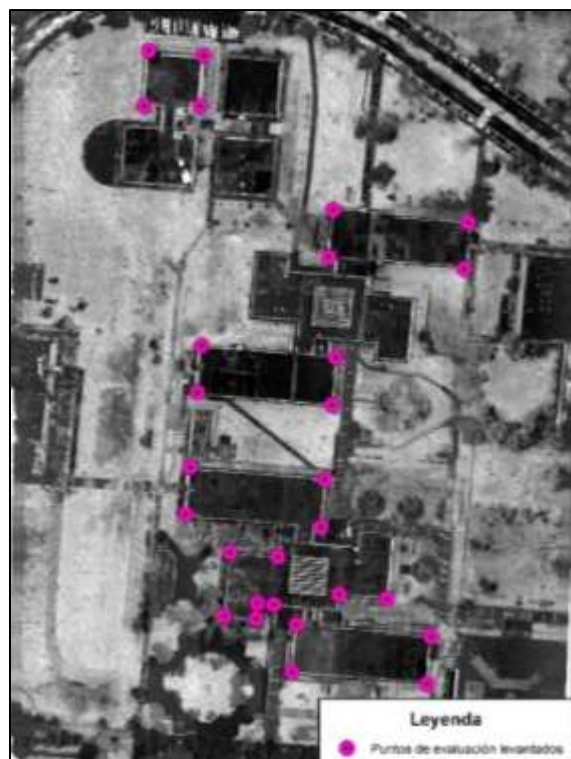
Cabe destacar que en esta sección se hace el contraste entre infraestructura y terreno, por lo que el proceso esta detallado en función del vuelo 8, al contar con barrido de información completo. Sin embargo, los resultados también se muestran en la zona piloto 1 con el vuelo 3, en el capítulo IV.

Exactitud posicional externa horizontal en infraestructura

Busca comprobar la correcta posición planimétrica de la nube de puntos LIDAR. En el software ArcMap se realiza la evaluación de la exactitud posicional; como datos de entrada se requieren, puntos de evaluación y la imagen de intensidad de superficie, visible en la Figura 46.

Figura 46.

Puntos de evaluación en la zona piloto



El proceso inicia en crear un shapefile de puntos y ubicarlos con respecto a sus homólogos bien definidos en la Imagen de intensidad, visible en la Figura 47.

Figura 47.

Ubicación de puntos homólogos con respecto a puntos de evaluación



Posteriormente se requiere nombrar los puntos homólogos en base a los puntos de evaluación y llenar la tabla de atributos con ayuda de la herramienta “Calculate Geometry” se obtiene las coordenadas X_lidar y Y_lidar de los puntos pinchados con anterioridad, dando como resultado la tabla de la Figura 48. Los detalles de este proceso se pueden revisar en el **Anexo D**

Figura 48.

Tabla de atributos de los puntos homólogos con sus coordenadas planimétricas

401045_pinchado						
FID	Shape *	Id	ORIG FID	NOMBRE	X lidar	Y lidar
31	Point	0	0	P2	784261,088345	9965466,63268
3	Point	0	0	A1	784341,236401	9965217,21606
4	Point	0	0	A2	784341,756249	9965236,45041
1	Point	0	0	A3	784398,211679	9965232,03171
2	Point	0	0	A4	784396,652137	9965212,53743
12	Point	0	0	B1	784352,932968	9965276,21874
11	Point	0	0	B2	784354,752434	9965296,49279
10	Point	0	0	B3	784298,608913	9965300,91149
9	Point	0	0	B4	784297,309294	9965281,41721
17	Point	0	0	C1	784302,381395	9965332,26828
16	Point	0	0	C2	784304,003712	9965349,78303
18	Point	0	0	C3	784357,044421	9965326,81785

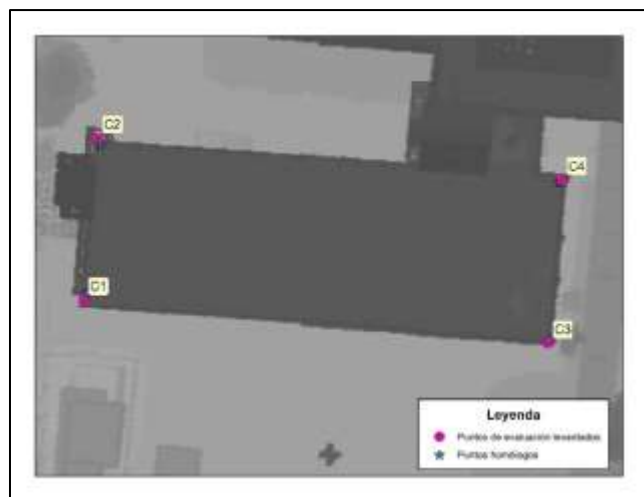
Estos valores se trasladan a una base de datos creada en el programa Excel, el cual contiene las coordenadas de los puntos de evaluación. Los resultados de la exactitud posicional externa horizontal en infraestructura se encuentran a partir de la Tabla 11 hasta la Tabla 14, para la zona 1 vuelo 3 y dese la Tabla 15 hasta la Tabla 18 para la zona 2 vuelo 8; todo esto se puede observar en el capítulo IV.

Exactitud posicional externa vertical en infraestructura

En base al proceso anterior se cambia la imagen de intensidad por el modelo digital de superficie como se muestra en la Figura 49. Se ha comparado las alturas de los puntos de evaluación con las alturas del MDS

Figura 49.

Puntos homólogos proyectados en MDS



Con el shape de puntos homólogos proyectados sobre el MDS, se utiliza la opción “Extract values to points”, para extraer el valor de elevación del ráster correspondiente a esos puntos. Donde, el resultado es un nuevo archivo shapefile con el valor de elevación seleccionado, completando el set de coordenadas en la tabla de atributos. Este proceso se describe con mayor detalle en el **Anexo D**. Finalmente, la información de la Figura 50 se agrega a una base de datos.

Figura 50.

Tabla de atributos de los puntos homólogos con el elenco de coordenadas.

FID	Shape *	Id	ORIG FID	NOMBRE	X lidar	Y lidar	RASTERVALU
0	Point	0	0	DEP8	784359,223122	9965248,66683	2512
1	Point	0	0	A3	784398,211679	9965232,03171	2499
2	Point	0	0	A4	784396,652137	9965212,53743	2511
3	Point	0	0	A1	784341,236401	9965217,21606	2512
4	Point	0	0	A2	784341,756249	9965236,45041	2511
5	Point	0	0	DEP6	784326,42075	9965244,76797	2513
6	Point	0	0	DEP1	784326,160826	9965239,30957	2513
7	Point	0	0	DEP2	784312,124946	9965240,34927	2500
8	Point	0	0	DEP4	784334,998232	9965264,26225	2513
9	Point	0	0	B4	784297,309294	9965281,41721	2515
10	Point	0	0	B3	784298,608913	9965300,91149	2506
11	Point	0	0	B2	784354,752434	9965296,49279	2515
12	Point	0	0	B1	784352,932968	9965276,21874	2514
13	Point	0	0	DEP3	784315,036859	9965265,38078	2509
14	Point	0	0	DEP5	784333,610646	9965244,98136	2512
15	Point	0	0	DEP7	784379,092612	9965247,91824	2512
16	Point	0	0	C2	784304,003712	9965349,78303	2514
17	Point	0	0	C1	784302,381395	9965332,26828	2515
18	Point	0	0	C3	784357,044421	9965326,81785	2515
19	Point	0	0	D1	784356,263898	9965386,95776	2517
20	Point	0	0	D2	784357,851402	9965405,57124	2517
21	Point	0	0	D3	784412,712865	9965400,74258	2517
22	Point	0	0	D4	784411,389946	9965383,14775	2517
23	Point	0	0	E4	784282,220104	9965469,32272	2502
24	Point	0	0	E3	784303,717543	9965468,39667	2503
25	Point	0	0	E2	784302,063894	9965449,54507	2502
26	Point	0	0	E1	784280,698747	9965449,61122	2502
27	Point	0	0	C4	784358,215373	9965345,29204	2514
28	Point	0	0	GCP12	784412,050234	9965213,61311	2499
29	Point	0	0	P4	784254,560227	9965220,32386	2495
30	Point	0	0	GCP20	784422,696428	9965445,19019	2509

En función de esto, se calcula el residual existente entre los puntos de evaluación y los puntos de lidar (Intensidad y modelo digital de superficie).

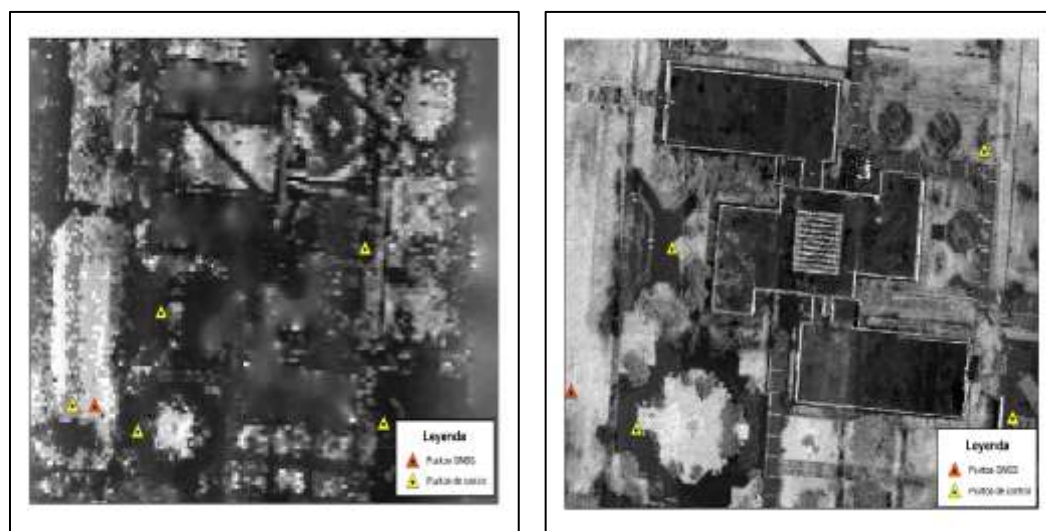
Los resultados de la exactitud posicional externa vertical en infraestructura se los encuentra en las Tablas 19 y 20 de la zona 1, con respecto a la zona 2 en las Tablas 21 y 22, como parte del capítulo IV.

Exactitud posicional externa horizontal en terreno

En esta parte es necesario aclarar que la imagen de intensidad debe tener elementos identificables. Es por este motivo que, se utiliza la imagen de intensidad con superficies, ya que al obtener la imagen con la categoría suelo, la misma se distorsiona y no es funcional utilizarla de esa manera, esta comparación se observa en la Figura 51.

Figura 51.

Comparativa entre imágenes de intensidad en terreno y superficie.

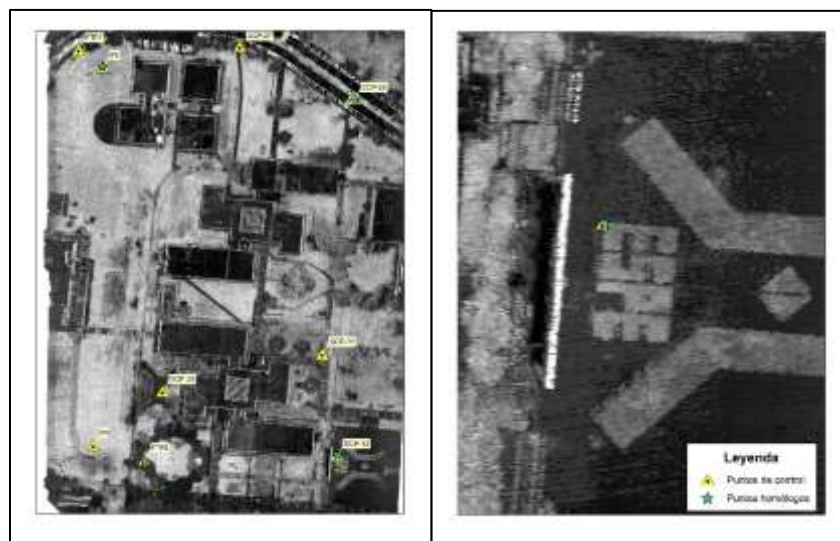


Para evaluar la exactitud posicional horizontal y vertical de la nube de puntos LIDAR con respecto al terreno, se hace la distinción de los puntos de control (levantados en elementos del terreno), recopilados como información secundaria y los productos de entrada difieren con el proceso mencionado en exactitud posicional vertical de infraestructura, con el fin de evitar errores groseros; los mismos se proyectarán sobre el modelo digital de elevación, con una distribución de más de 20 puntos en cada zona de prueba. Se enumera el proceso a seguir en este aspecto.

Los datos de entrada son los puntos de control y la Imagen de intensidad de superficie. Se repiten los pasos en exactitud posicional externa horizontal en infraestructura. En este caso con 28 puntos de control en la imagen intensidad de superficie, la Figura 52 ilustra la ubicación de los puntos de control y el pinchado de puntos.

Figura 52.

Ubicación puntos homólogos con respecto a puntos de control.



Con el fin de mantener la relación es necesario nombrar los puntos homólogos en base a los puntos de control, complementando la tabla de atributos. Se realizan los mismos pasos que en caso de exactitud posicional externa horizontal en infraestructura. Iniciando por agregar los campos coordenada X_lidar , Y_lidar y calcular sus valores.

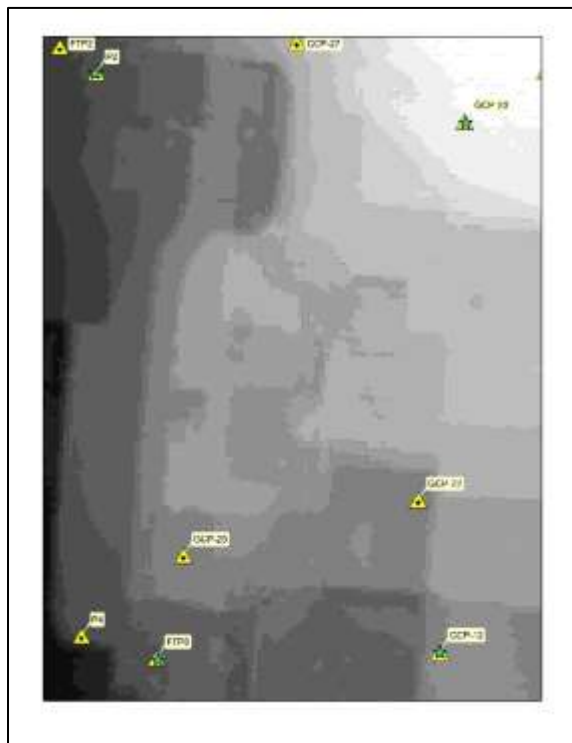
Los resultados de la exactitud posicional externa horizontal en terreno se los encuentra en las tablas a partir de la 23 hasta la 26 de la zona 1 vuelo3, por otra parte, para la zona 2 vuelo8 las tablas desde la 27 hasta la 30, ubicada en el capítulo IV.

Exactitud posicional externa vertical en terreno

Igual que en la evaluación de superficie se sustituye la Imagen de intensidad por el modelo digital de elevación en este caso, ilustrado en la Figura 53. Consecutivamente se extrae el valor de elevación del raster correspondiente a esas coordenadas obteniendo el valor de elevación, es posible encontrar el detalle de este proceso en el **Anexo D**.

Figura 53.

Puntos homólogos proyectados en MDT



Finalmente se genera un nuevo archivo shapefile, con la tabla de atributos que contiene el set de coordenadas completo que se anexa a una base de datos con las coordenadas de los puntos de control, como se menciona en procesos anteriores el **Anexo D**, explica paso a paso este cálculo. La base de datos contiene todos los datos LIDAR obtenidos y los puntos con los que se ha realizado cada una de las evaluaciones. Estos resultados se pueden encontrar para la zona 1 vuelo 3 en las tablas 31 y 32, para la zona 2 vuelo 8 en las tablas 33 y 34.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

El capítulo IV de inicio contiene las áreas en las que fueron realizadas las pruebas pertinentes para la presente investigación; a su vez mediante figuras los resultados de cada una de las pruebas realizadas, así también los elementos que se requieren para cada proceso en la parte de exactitud posicional y el análisis estadístico correspondiente para cada variable evaluada con su respectiva interpretación.

Resultado del diseño de las zonas de estudio piloto

En la Figura 54 se observa el área inicial de prueba; adicionalmente, se estableció un sitio seguro para despegar el equipo en función de las cotas conocidas de la zona mencionada (información secundaria); en este caso se eligió el patio del coliseo.

Figura 54.

Resultado zona piloto 1 de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



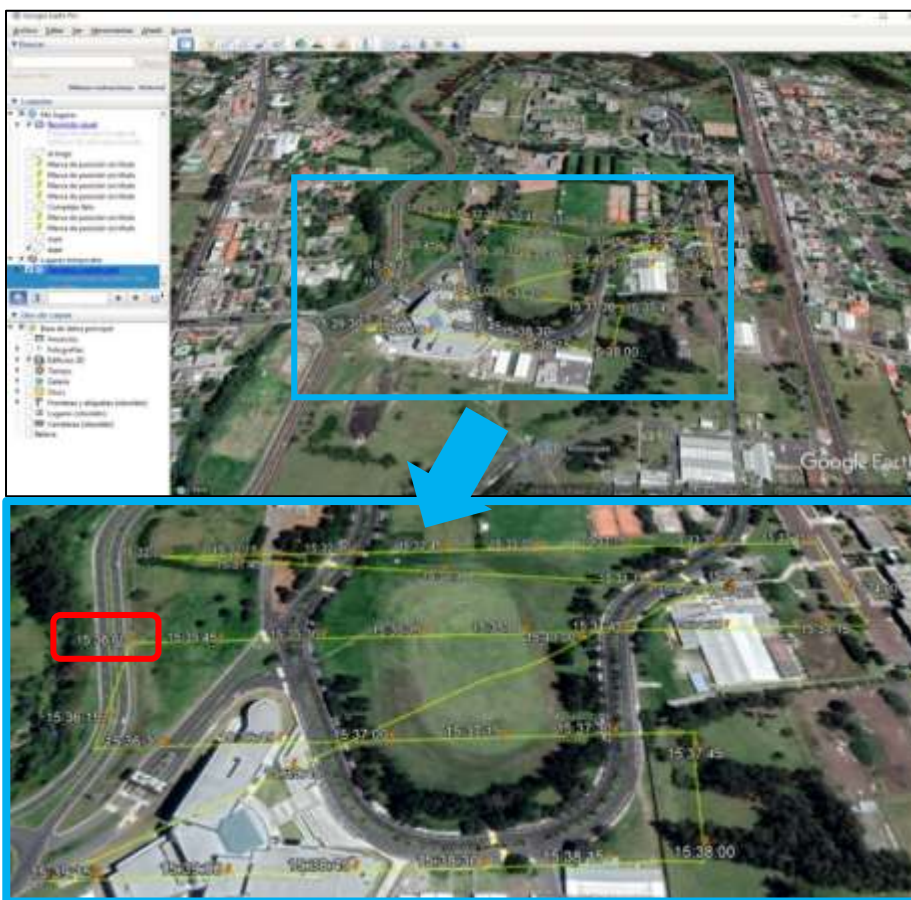
Resultados de la obtención del archivo. LAS

A continuación, la Figura 55 detalla el resultado del archivo KML representado en Google Earth generado con la opción Travel path que se describe en el Capítulo III; se identifica la hora de registro de los datos.

Figura

55.

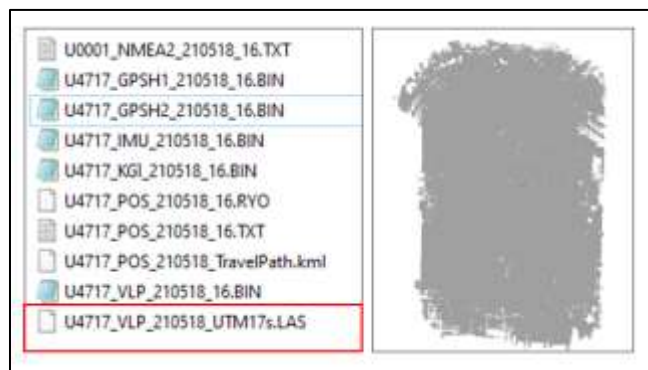
Resultado archivo KML en la zona piloto 1 de Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE



En la Figura 56 se observa el resultado conjunto y la Figura 57 muestra el resultado por líneas de vuelo, al utilizar la opción TimeSpam descrita en el Capítulo III.

Figura 56.

Resultado en conjunto nube de puntos

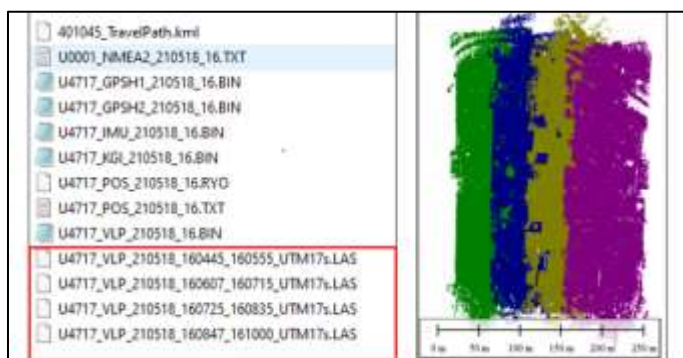


Nota: El archivo LAS que se obtiene del programa Lidartool con su explicación en el capítulo III; a la derecha la visualización por clasificación que esta por default al cargarla en el software Globalmaper, en este caso la clase 0 (Creado, nunca clasificado)

Los archivos que se muestran a la izquierda de la Figura 57 señalados en rojo, corresponden a la nube de puntos por líneas de vuelo de una misma zona. A la derecha de la misma imagen es apreciada la visualización por RGB en el programa GlobalMapper, ya que si se ubica por clasificación esto se vería todo en GRIS. Por otra parte, al procesar la información LIDAR en líneas de vuelo independientes el ruido se reduce, debido a que se desprecia los giros del dron.

Figura 57.

Resultado de líneas de vuelo independientes de la nube de puntos



Resultados de la ejecución de los vuelos.

Se realizaron los vuelos de acuerdo a la planificación de parámetros de vuelo definidos en la Tabla 8; en las figuras de la 58 a la 65 se observan las nubes de puntos en escala de colores de acuerdo a la elevación, donde el azul representa las elevaciones más bajas y en rojo la máxima elevación.

A continuación, en la Figura 58 y 59 se encuentran los vuelos que se ejecutaron el primer día; al siguiente día se realizó el vuelo 3 y 4 ilustrados en las Figuras 60 y 61 respectivamente.

Figura 58.

Resultado del vuelo 1: 70% Longitudinal 15% Lateral Altura 60 m Velocidad 4,5 m/s

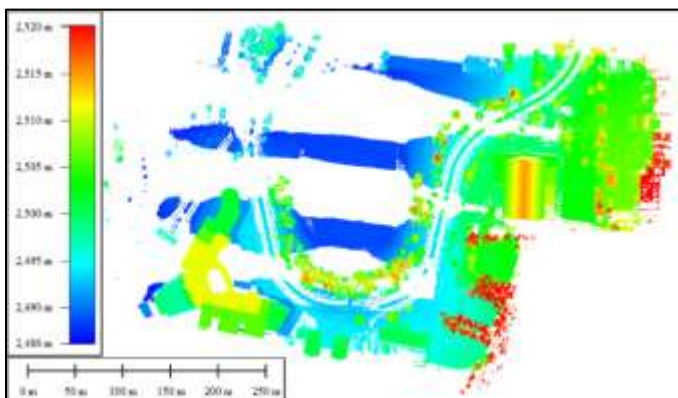


Figura 59.

Resultado del vuelo 2: 70% Longitudinal 15% Lateral Altura 80m Velocidad 4,5 m/s

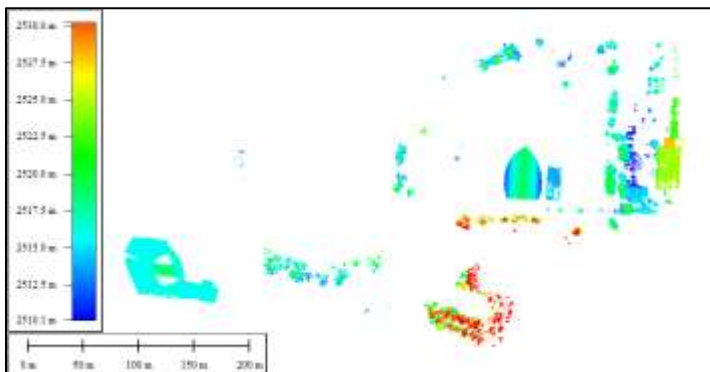
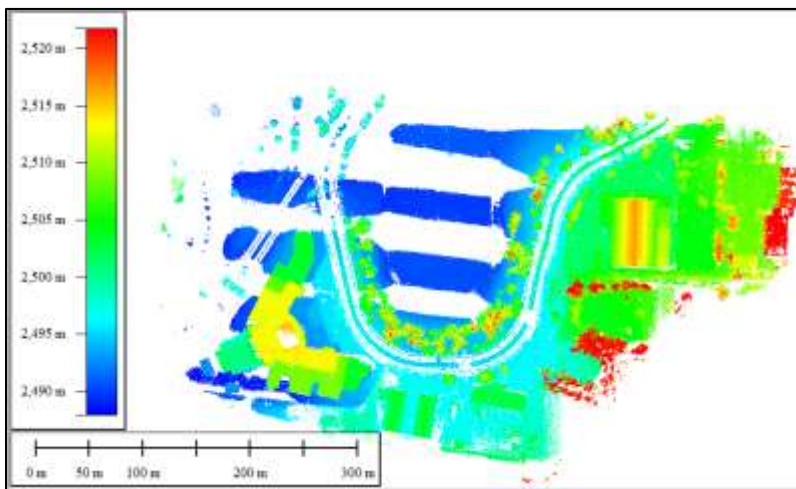
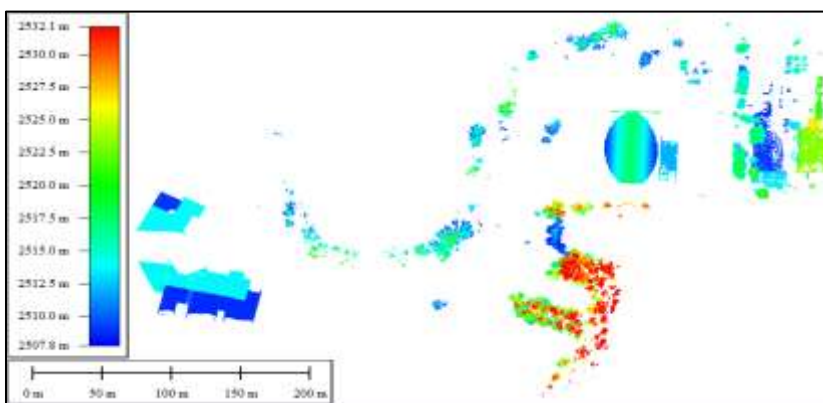


Figura 60.

Resultado del vuelo 3: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 60 m Velocidad 4,5 m/s

**Figura 61.**

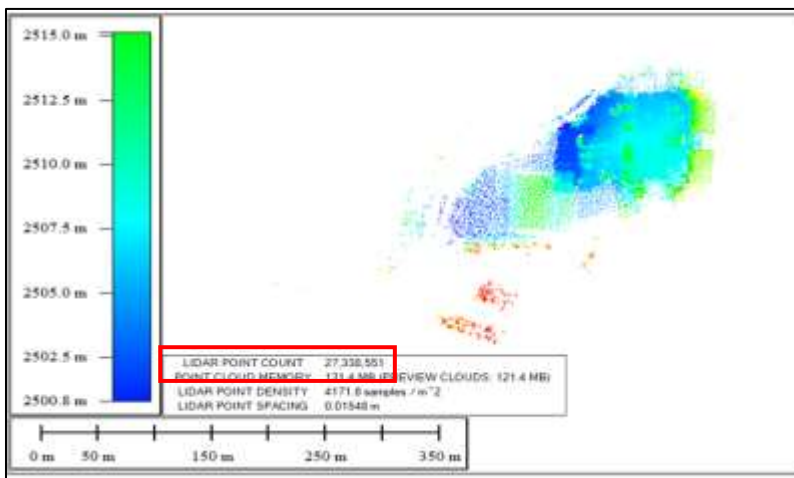
Resultado del vuelo 4: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80 m Velocidad 4,5 m/s



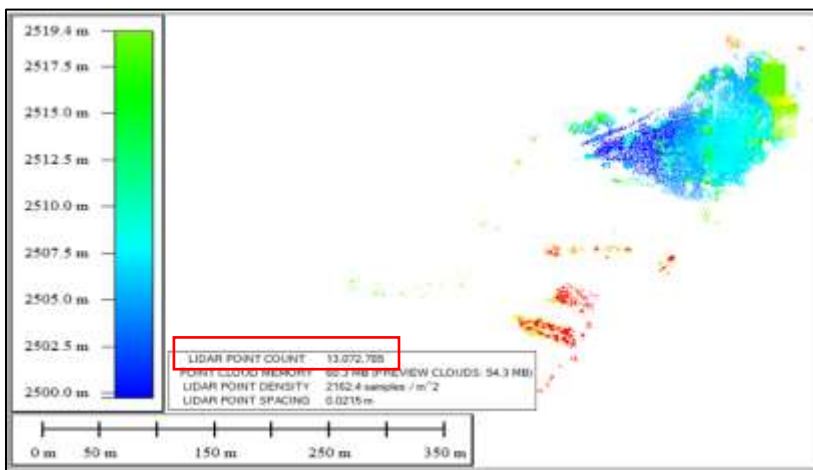
En los siguientes vuelos, 5 ,6 y 7, los resultados esperados se enfocaban a un mayor registro de información a menos velocidad. Sin embargo, revisando los metadatos el vuelo a velocidad 5.5 m/s registro 27 338 551 puntos y el vuelo a velocidad de 3.5 m/s registro 13 072 785 puntos, cuyos resultados puede comprobar en las Figuras 62 y 63.

Figura 62.

Resultado del vuelo 5: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80 Velocidad 5,5 m/s

**Figura 63.**

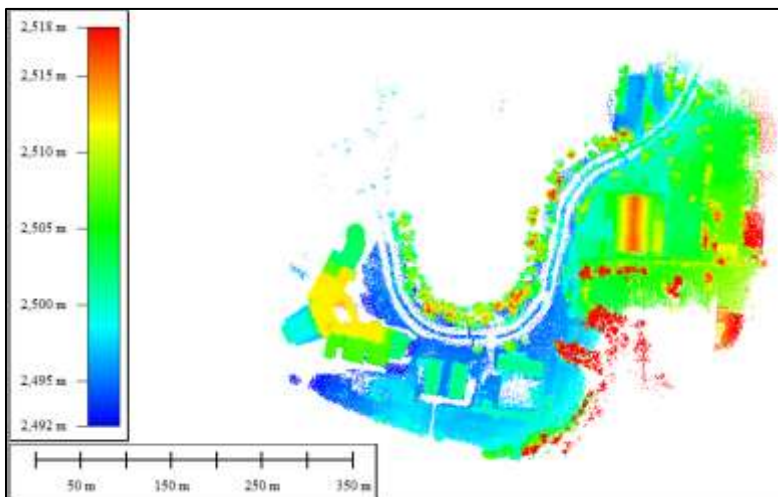
Resultado del vuelo 6: 70% Longitudinal 40% Lateral Altura 80 Velocidad 3,5 m/s



En el vuelo 7 al aumentar el traslape lateral a 70%, con la menor altura de prueba a 60m y velocidad 4,5 m/s; en cambio se esperaba cubrir finalmente toda la zona de estudio, pero el resultado que se muestra en la Figura 64, permite concluir lo contrario y es en donde se detecta algún problema en el sensor, en el tema de la variable altura o de la zona que se está volando. Debido a que, los parámetros utilizados en teoría debían ser los óptimos al realizar un proceso simultáneo de escaneo LIDAR y fotogrametría.

Figura 64.

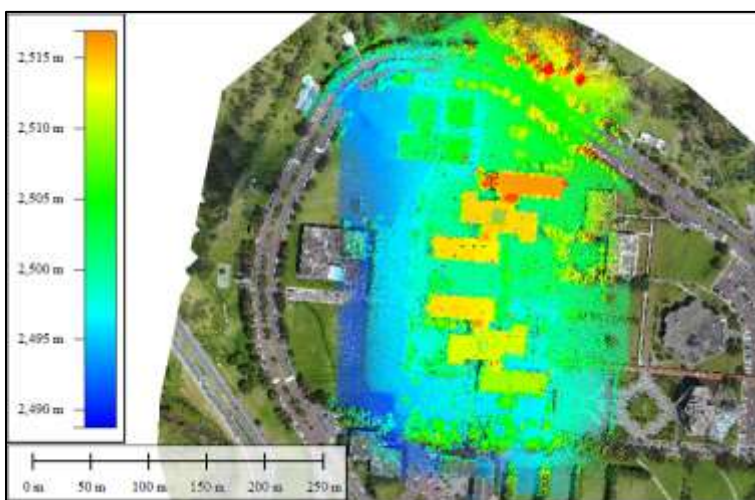
Resultado del vuelo 7: 70% Longitudinal 70% Lateral Altura 60m Velocidad 4,5m/s



El vuelo 8, ilustrado en la Figura 65, se realizó en un área de prueba diferente y probando otros parámetros, la explicación a detalle de los parámetros elegidos se encuentra en el capítulo III. Cabe destacar que fue el único vuelo donde el registro de información fue completo y el que se utilizó en la mayoría de los procesos posteriores en esta investigación.

Figura 65.

Resultado del vuelo 8: 10% Longitudinal 40% Lateral Altura 45m Velocidad 4,5m/s



Resultados reducción de la densidad de puntos

Resultados de la aplicación de la herramienta catalog

Una vez ejecutado el código “Catalog”, se obtiene un informe con las estadísticas de la nube de puntos, manera de ejemplo ilustrado en la Figura 66; y una imagen de calidad que indica la densidad, donde las celdas con densidades de puntos que se encuentran dentro del rango mínimo, se colorean en verde, las celdas con densidades por debajo del mínimo, se colorean en rojo y las celdas con densidades por encima del máximo, se colorean en azul. Los resultados de todos los vuelos se ilustran en la Figura 67.

Figura 66.

Imagen del Informe “Catalog” en formato HTML

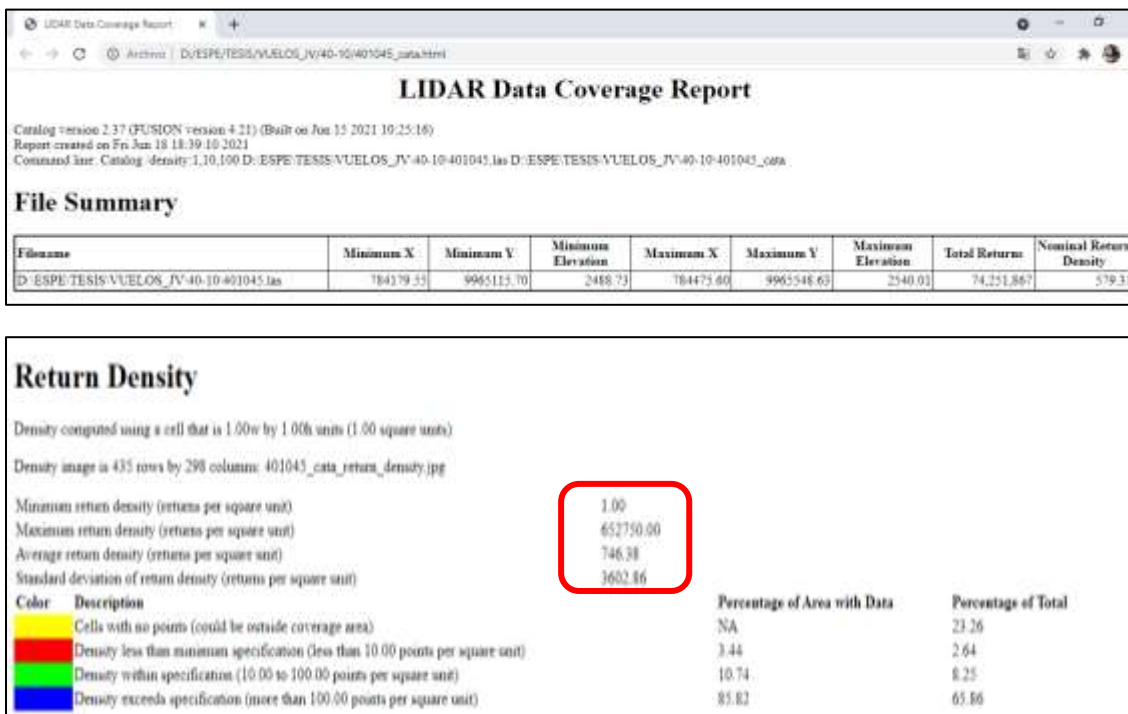
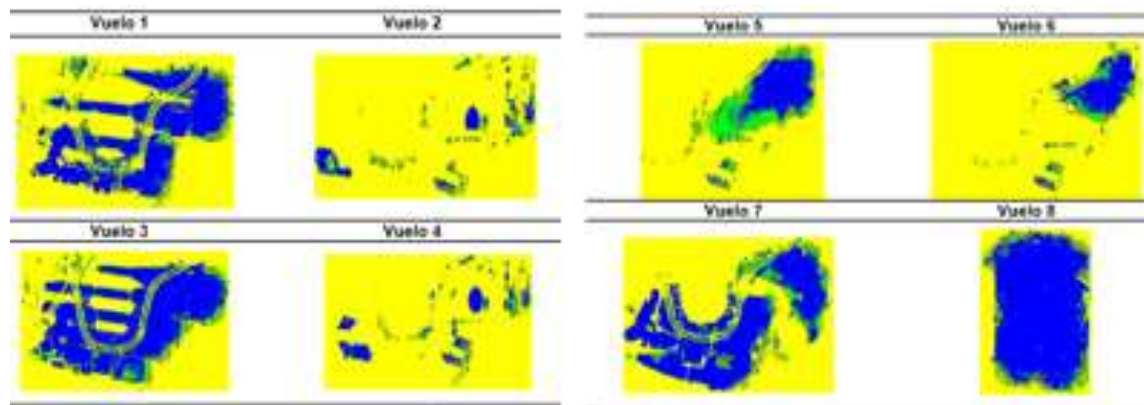


Figura 67.

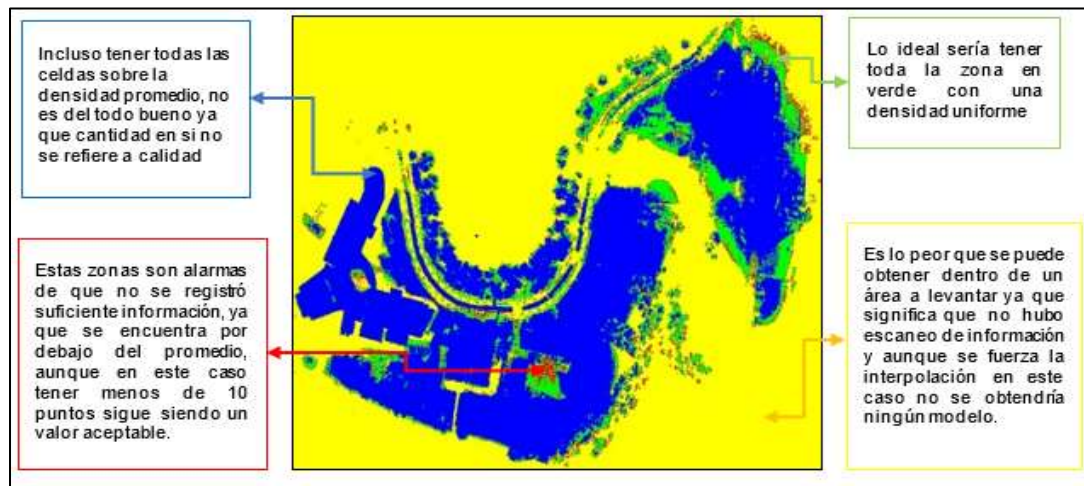
Resultados de la aplicación de la herramienta “Catalog” para cada vuelo



La interpretación es la misma para cada figura. Sin embargo, se hará el análisis en la Figura 68 correspondiente al vuelo 7.

Figura 68.

Resultado de imagen de intensidad del vuelo 7



Resultados herramienta Thin Data,

Al respecto, desde la Figura 69 hasta la Figura 72, se observan los cambios en la parte superior de cada figura se visualizan los resultados con el software GlobalMapper, donde no es posible identificar un cambio visual en la reducción de la densidad, pero si en los

metadatos y en la parte inferior los mismos datos se han cargado en el software Fusion, donde mejora la percepción visual de la densidad, siendo esto más evidente.

Figura 69.

Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 1

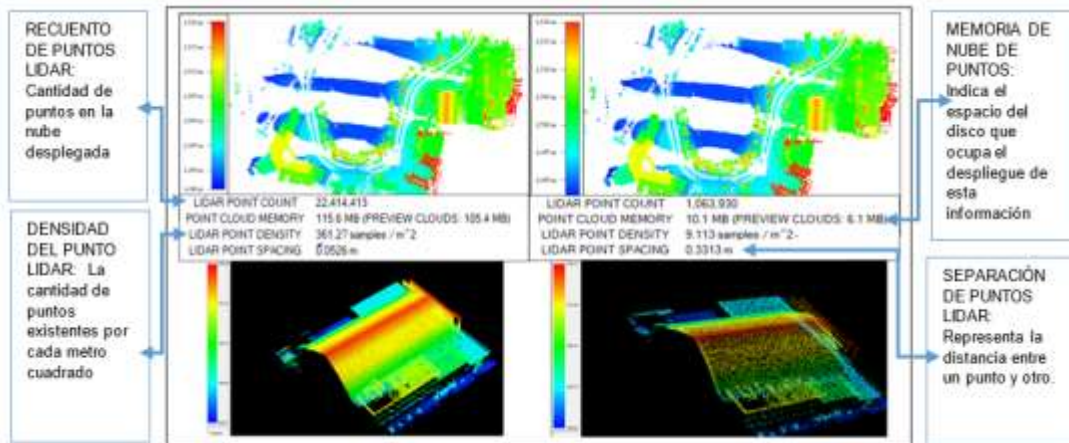


Figura 70.

Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 2

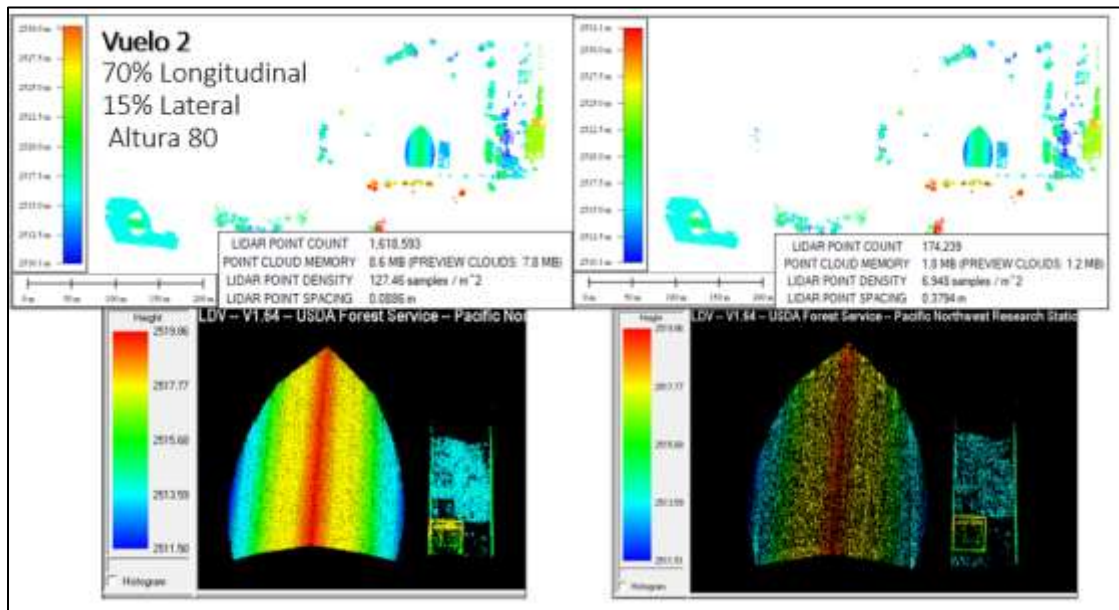
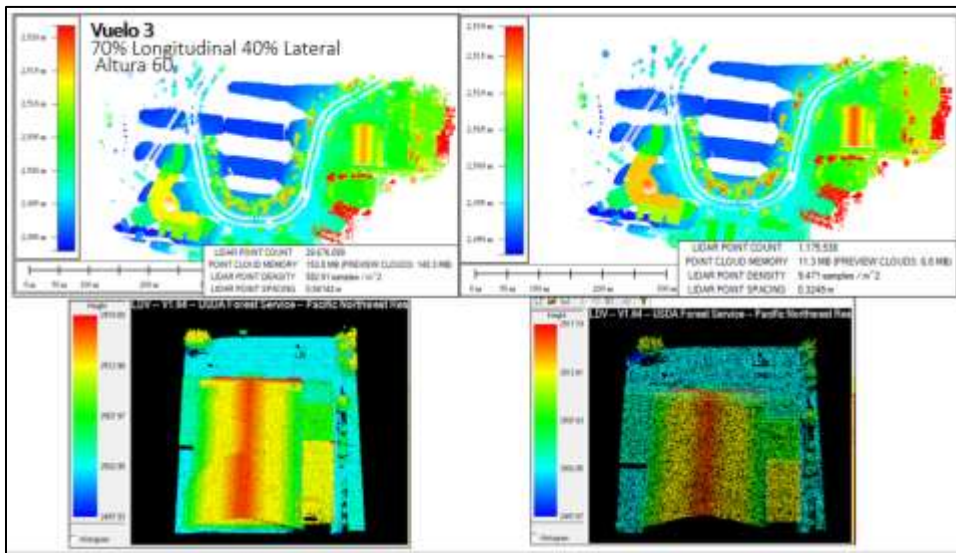


Figura 71.

Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 3



Los vuelos 4, 5 y 6 no se procesaron debido a que el registro de información no estaba completo y reducir la densidad en estos casos no sería apropiado, perjudicando la cantidad de datos iniciales, por lo mismo, sus derivados.

Figura 72.

Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 7

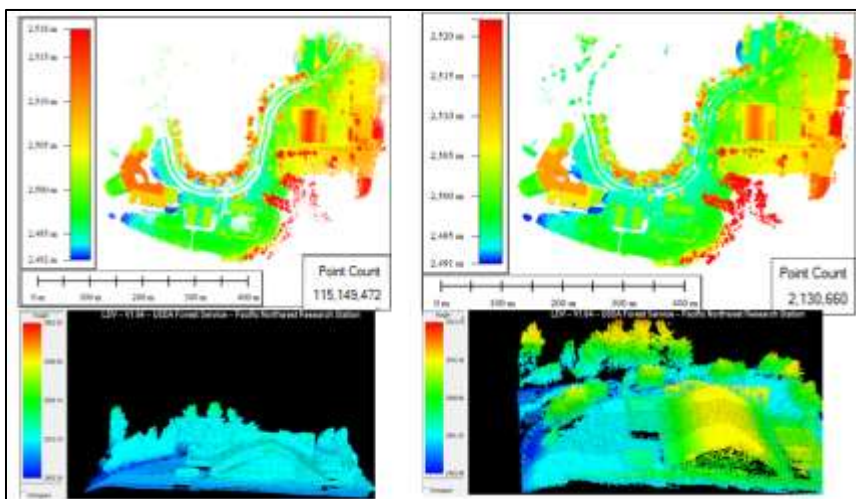
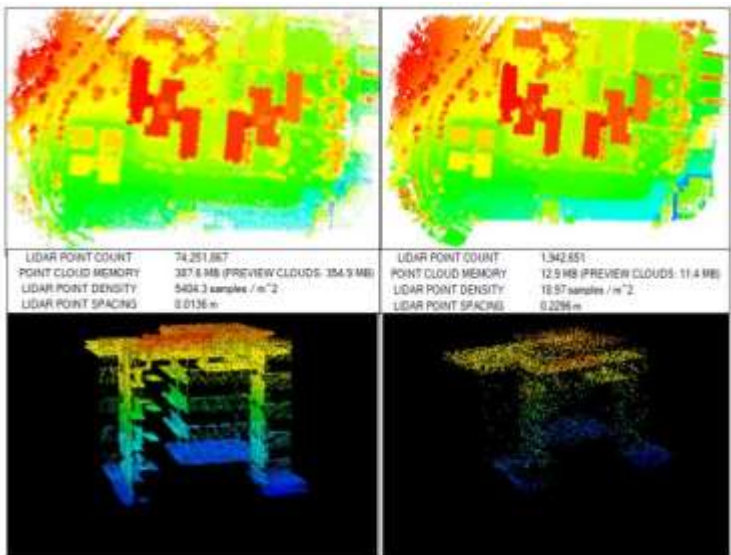


Figura73.

Resultados de la herramienta Thin Data en el vuelo 8



Los resultados del código “Thindata” expresados en cada una de las figuras (ver desde la Figura 69 a la 73), demuestran que una alta densidad de puntos mejora la apreciación de entidades lineales teniendo una definición geométrica de las estructuras; por otra parte, en cuanto a capacidad e procesamiento esta cantidad de datos consume la memoria RAM del equipo utilizado y disminuye la efectividad en su tratamiento.

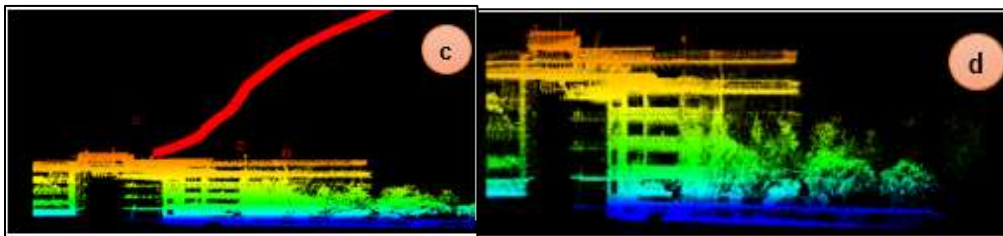
Resultados de la depuración de la nube de puntos

Resultados depuración manual de errores groseros.

A continuación, en la Figura 74 es posible observar la comparativa entre puntos con un valor de cota exagerado fácilmente distinguibles y en la parte d) el resultado al clasificarlos y filtrarlos sin categoría ruido.

Figura 74.

Resultado de depuración manual de errores groseros

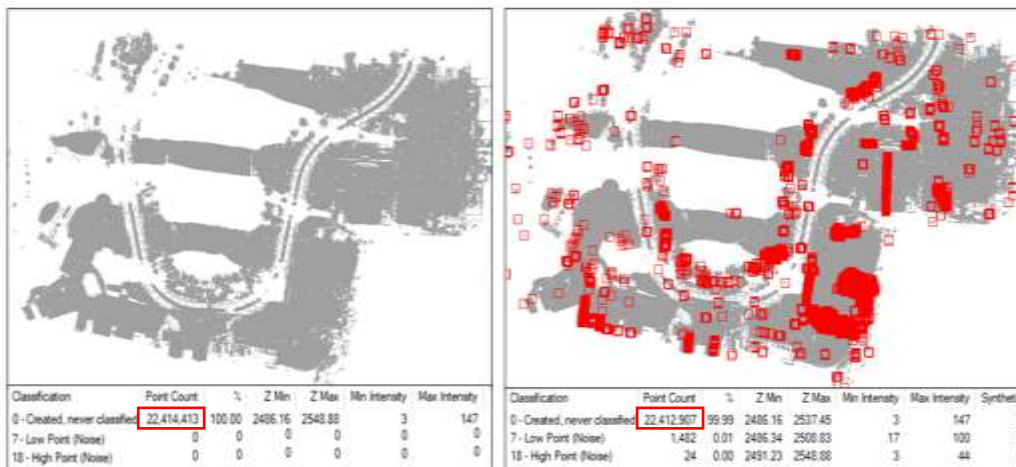


Resultados depuración automática de puntos de ruido

En el siguiente listado de figuras (75 -79) se ilustran las depuraciones iniciales, señalada en rojo los puntos considerados como ruido alto y ruido bajo, y los metadatos correspondientes a cada imagen, como se encuentra la nube de puntos LIDAR con todos los puntos en la categoría “Create, never classified” o creados, nunca clasificados, y en la imagen comparativa los metadatos con la cantidad de puntos considerados “Low Point (noise)” y “High Point (noise)”.

Figura 75.

Resultado depuración automática del vuelo 1



En los metadatos de la imagen de la izquierda se tiene 22 414 413 millones de puntos ubicados como clase “Nunca clasificado” al correr la herramienta de clasificación de ruido

automática a la derecha las clases “Ruido bajo” y “Ruido alto” ahora están 482 puntos y 24 puntos respectivamente.

Figura 76.

Resultado depuración automática del vuelo 2



Incluso en la Figura 76 que todo el vuelo puede considerarse ruido, la clasificación automática varía teniendo 156 puntos en ruido bajo y 4 puntos seleccionados como ruido alto.

Figura 77.

Resultado depuración automática del vuelo 3

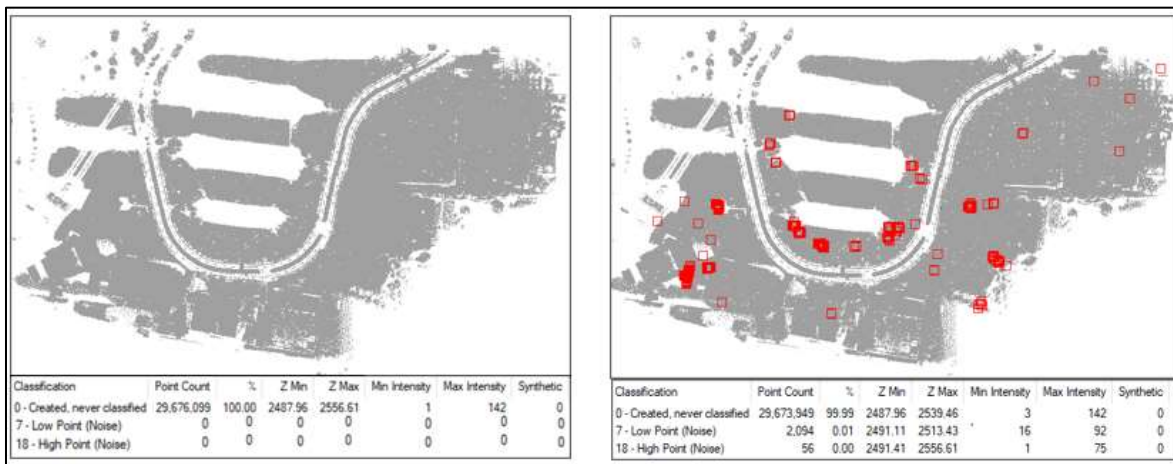
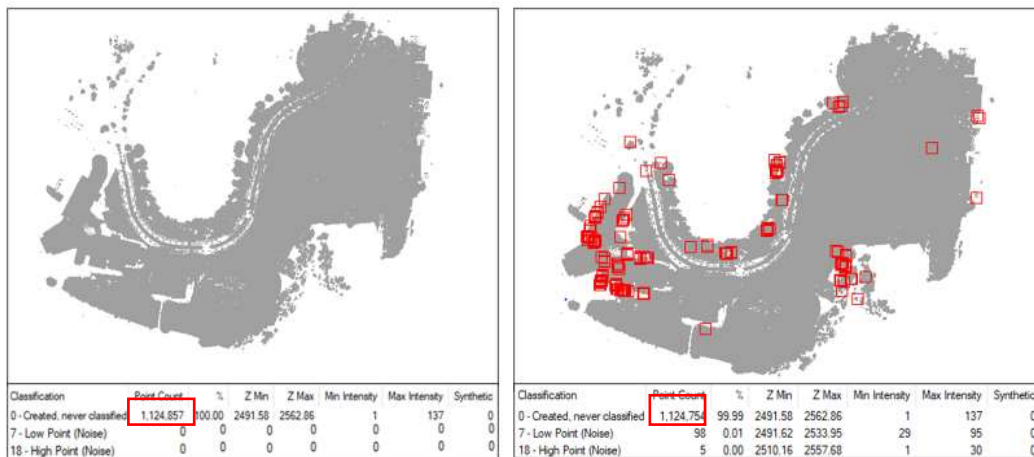


Figura 78.

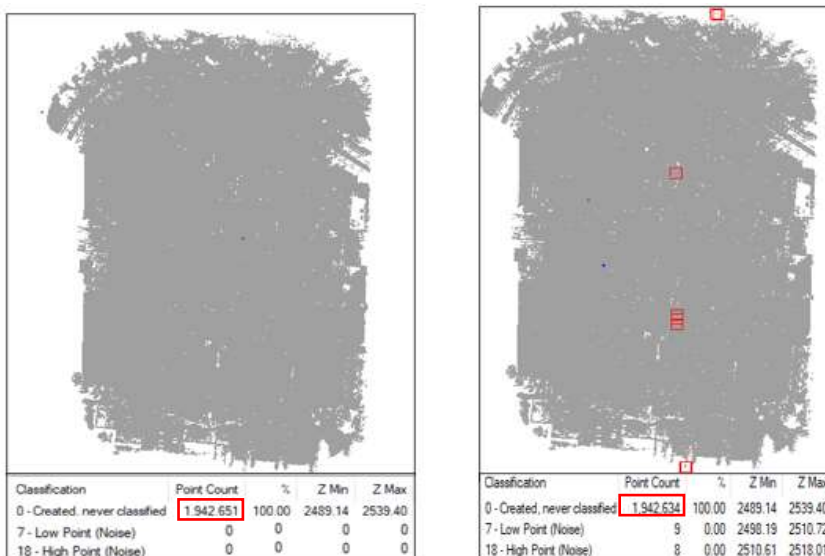
Resultado depuración automática del vuelo 7.



Para el vuelo 7 la selección de puntos de ruido alto ha dado 5 puntos y como ruido bajo 98 puntos, dejando en gris 1124754 puntos.

Figura 79.

Resultado depuración automática del vuelo 8.



El vuelo 8, que se voló a una altura de 45 metros, traslape lateral de 40% y traslape longitudinal de 10%, es la que menos ruido selecciona automáticamente, obteniendo 9

puntos de ruido bajo y 8 seleccionados como ruido alto en inicio. Es importante hacer referencia a que en estos datos no se identificó puntos anómalos o groseros por lo que se inició con la clasificación automática de ruido.

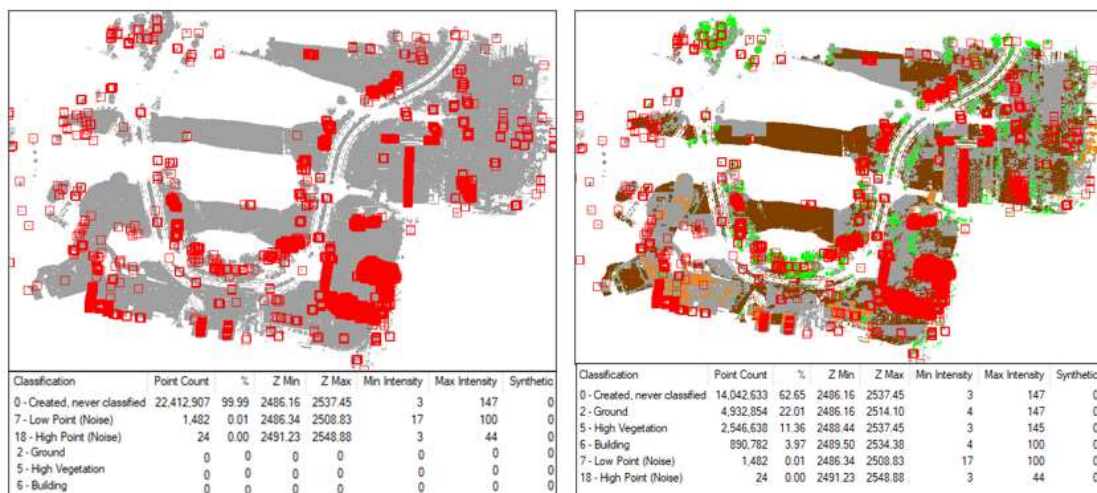
Resultados clasificación nube de puntos Lidar

Resultados clasificación automática

En esta sección es posible visualizar la clasificación automática en las Figuras de la 80 a la 84; de la misma manera, se incluye la variación visual del cambio, así como los metadatos en la parte inferior de cada imagen. Esto permite discernir la cantidad de puntos que se han clasificado de acuerdo a los algoritmos de programa y los parámetros utilizados que se explican en el capítulo III. Para las categorías suelo, edificación, vegetación alta y la categoría en la que vienen los datos por default.

Figura 80.

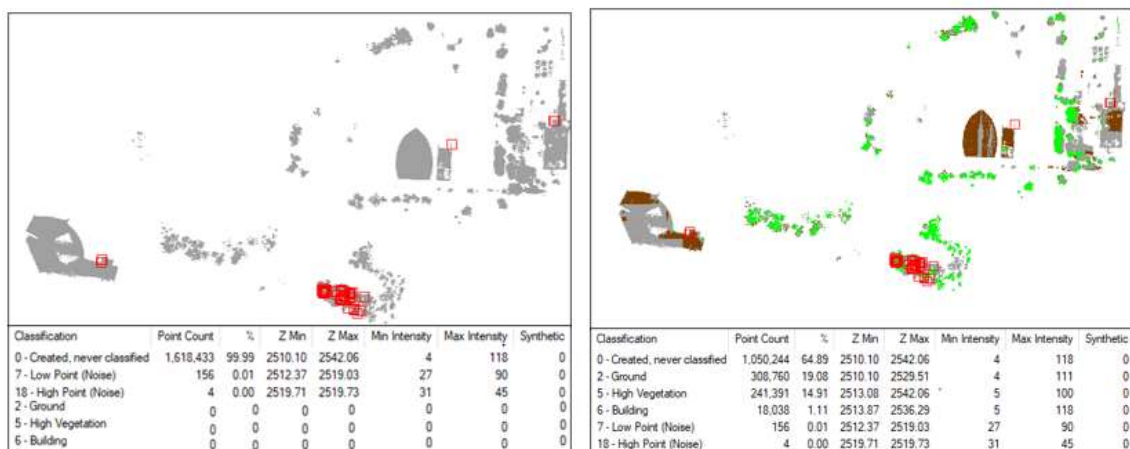
Resultado clasificación automática del vuelo 1.



En la Figura 80 se aclara que, aunque el algoritmo de clasificación automática es eficiente en algunos casos, al no tener un barrido continuo este se confunde y visiblemente, aunque corresponde a terreno deja zonas sin clasificar.

Figura 81.

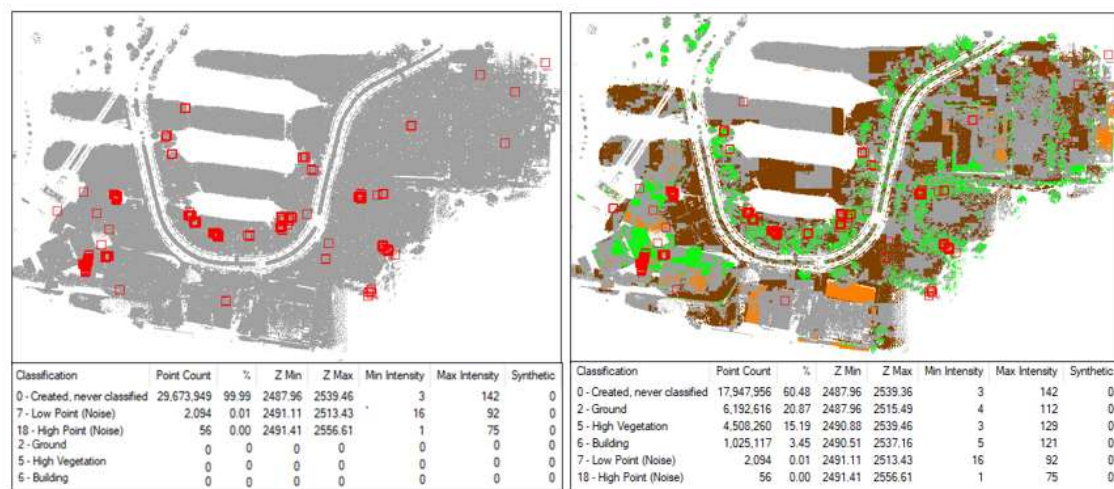
Resultado clasificación automática del vuelo 2



La interpretación de esta imagen se enfoca en que la clasificación automática si bien es efectiva si se utiliza los parámetros adecuados, si la información es pobre la clasificación también lo será. Es por esto que, el vuelo 2 se ha descartado para procesos posteriores.

Figura 82.

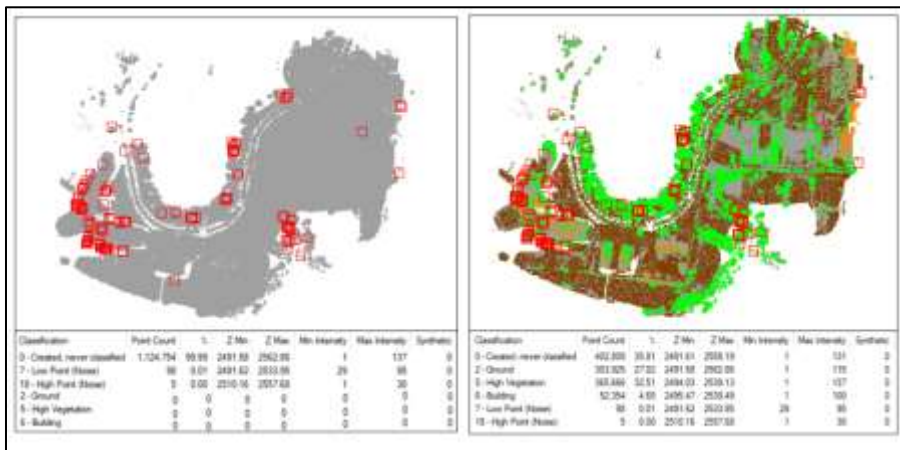
Resultado clasificación automática del vuelo 3



La nube de puntos de la Figura 82 contiene 2094 que son puntos en ruido bajo, 56 clasificados como ruido alto, en la clase suelo se han ubicado 6 192 616 puntos, para vegetación alta 4 508 260 puntos y en edificación 1 025 117 puntos.

Figura 83.

Resultado clasificación automática del vuelo 7

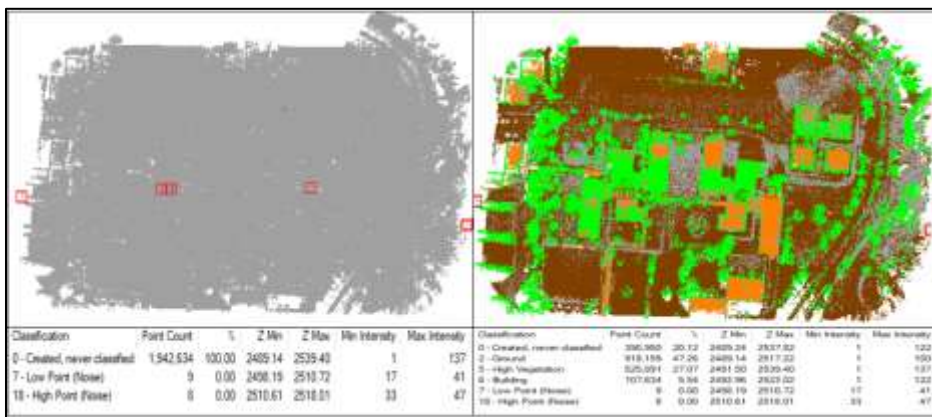


Para el vuelo 7, la Figura 83 muestra que muy pocos puntos se han elegido como ruido, cuando en realidad toda la zona superior izquierda no tuvo un escaneo continuo de información, y la clasificación automática en esas áreas es donde más puntos de ruido alto debería pintar.

Figura

84.

Resultado clasificación automática del vuelo 8



La clasificación automática visualmente hablando se aprecia mejor en la Figura 84; recalcando la existencia de información en toda el área analizada, incluyendo en los bordes, que, por lo general, también se consideran ruido. Pero se puede distinguir fácilmente que han sido clasificados a priori adecuadamente.

Resultados clasificación manual

Una vez realizada la clasificación automática se realiza a clasificación manual como se indica en el Capítulo III. Se realizó esta clasificación en función de los vuelos con mayor cantidad de datos, reclasificando algunas categorías como: suelo, vegetación alta y edificación; por lo que, se puede observar el cambio: en los metadatos de cada vuelo procesado y en las nubes de puntos resultantes. En las Figuras 85,86,87 ,88 y 89, se observan los resultados mencionados.

Figura 85.

Resultado clasificación manual del vuelo 1

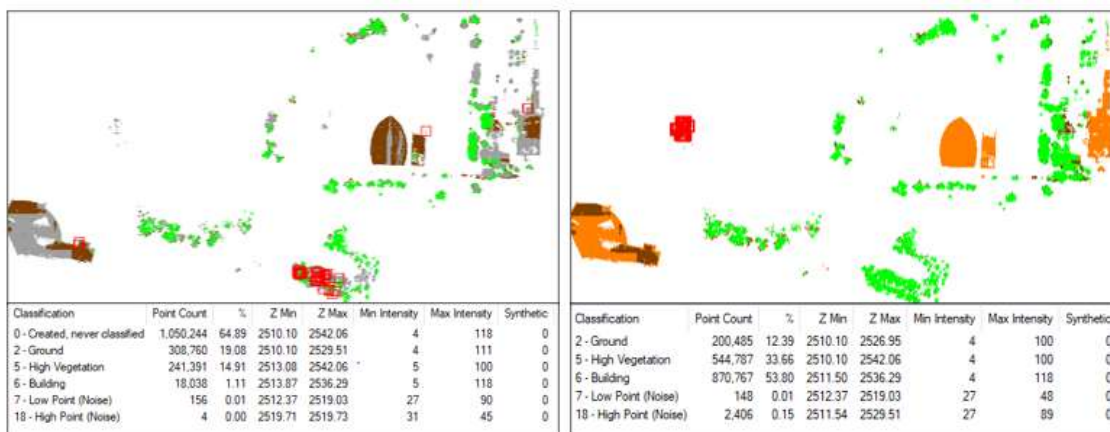


Después del proceso manual descrito en el apartado anterior, la Figura 85 demuestra la comparativa entre la clasificación automática (izquierda) y la clasificación manual (derecha); donde el cambio visual es evidente y de la misma forma los metadatos

cambian, especialmente en la clase 0 que pasa de 14 042 633 puntos a 346 997 puntos más del 90% de puntos han sido reclasificados en forma manual.

Figura 86.

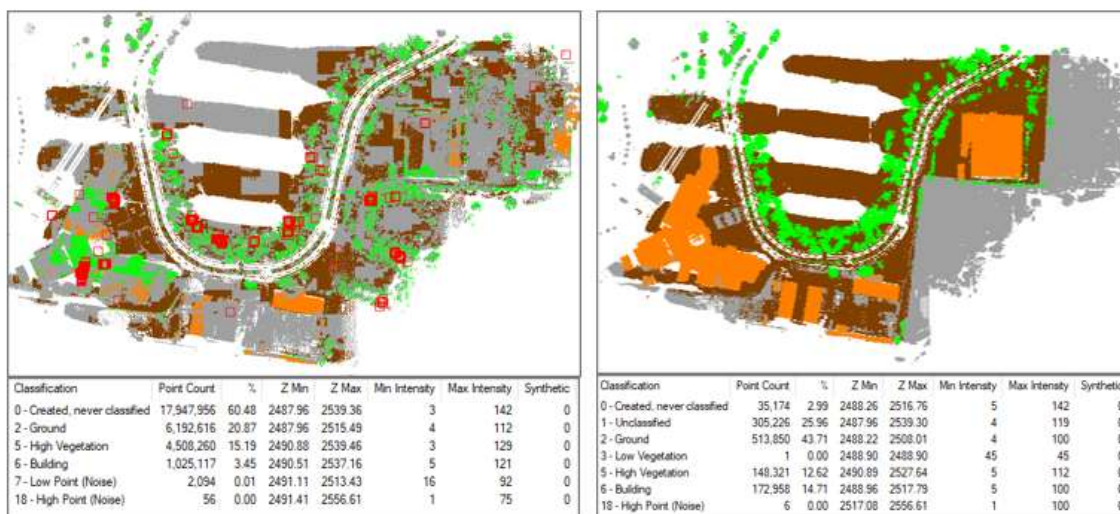
Resultado clasificación manual del vuelo 2



Aunque, en la Figura 86 se realizó el proceso de clasificación manual, por la cantidad de datos; de manera visual no se detectan tanto los cambios, pero los metadatos de clase 0 si han cambiado de un 65% a 12 % en la parte derecha.

Figura 87.

Resultado clasificación manual del vuelo 3

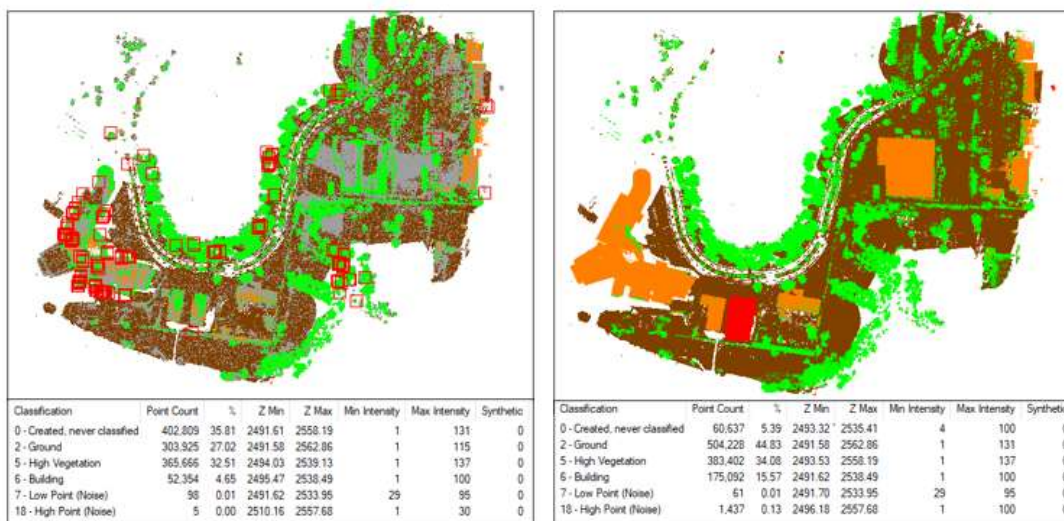


Para el vuelo 3, la comparación entre una clasificación y otra se demuestra en la figura 87; de la misma manera que en el caso 1 la percepción visual de la clasificación automática es evidente, sin embargo, para este vuelo se ha recortado únicamente la zona de interés y se ha descartado los bordes ya que los mismos se consideran “ruido”, es por esto que en la clase 0 aún se tienen 35 174 puntos representando el 3% del total de puntos.

A continuación, en la Figura 88 se ilustran los resultados de la clasificación manual, en la parte derecha de la imagen con 60 637 puntos en clase 0 (Nunca clasificado), 504 228 en clase 2 (Suelo), 383 402 en clase 5 (Vegetación alta), 175 092 en clase 6 (Edificación), 61 en clase 7 (Ruido bajo) y 1437 puntos en clase 18 (ruido alto).

Figura 88.

Resultado clasificación manual del vuelo 7



Para finalizar los resultados de esta sección, el vuelo 8 que se representa en la Figura 89 tiene una variación, debido a que, en esta nube de puntos se ha facilitado separar la clase de vegetación alta, en vegetación media y vegetación baja que tal vez de manera visual

no se distingue la tonalidad; en los metadatos si se incluyen la cantidad de datos de las clases mencionadas con anterioridad. En nunca clasificado el 1.01%, en suelo en 52.16%, en vegetación baja el 2.281%, vegetación media 0.20%, vegetación alta 16.03%, edificación 10,13% y ruido alto el 19,78%.

Figura 89.

Resultado clasificación manual del vuelo 8.

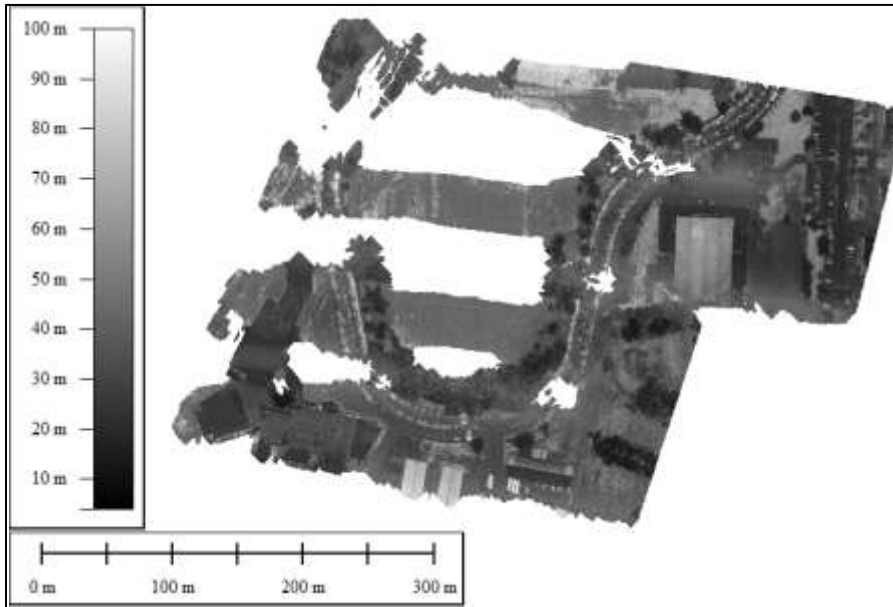


Resultados de obtención de Imágenes de Intensidad

Las imágenes de intensidad de cada vuelo se pueden apreciar a partir de la Figura 90 a la Figura 93. La escala de grises es característica de esta variable e indica las propiedades espectrales de los objetos, con 10 el menor valor en intensidad y hasta 100 en los lugares que no se registró información.

Figura 90.

Resultado Imagen de Intensidad vuelo 1

**Figura 91.**

Resultado Imagen de Intensidad vuelo 3

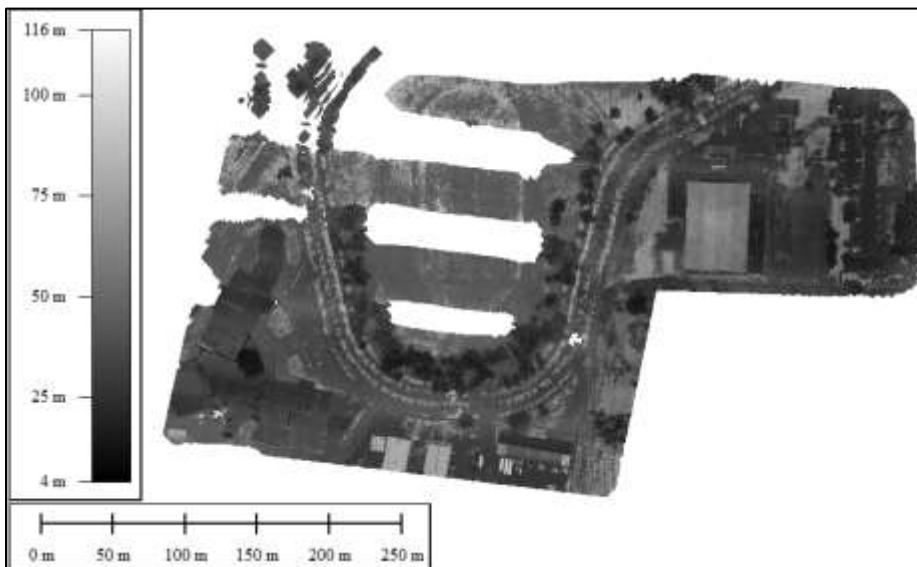
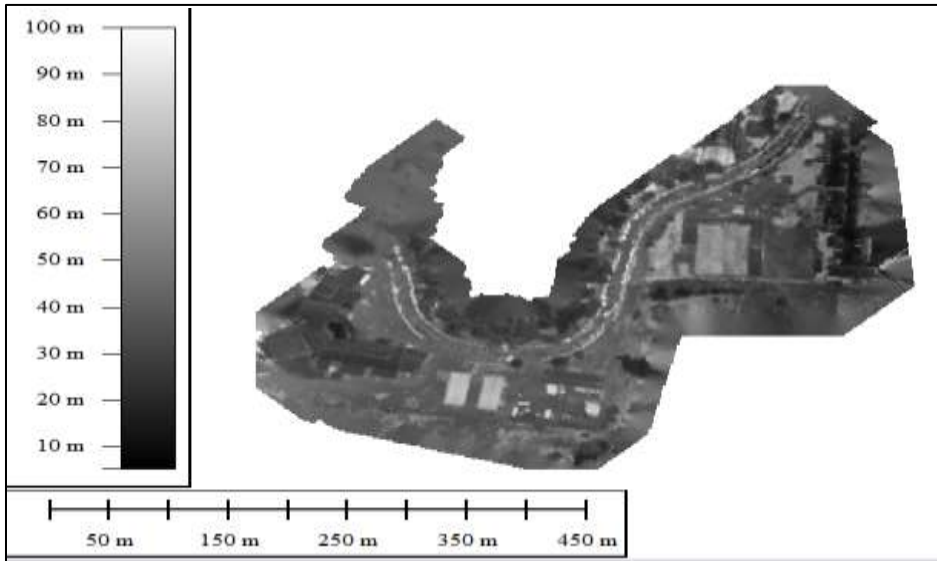
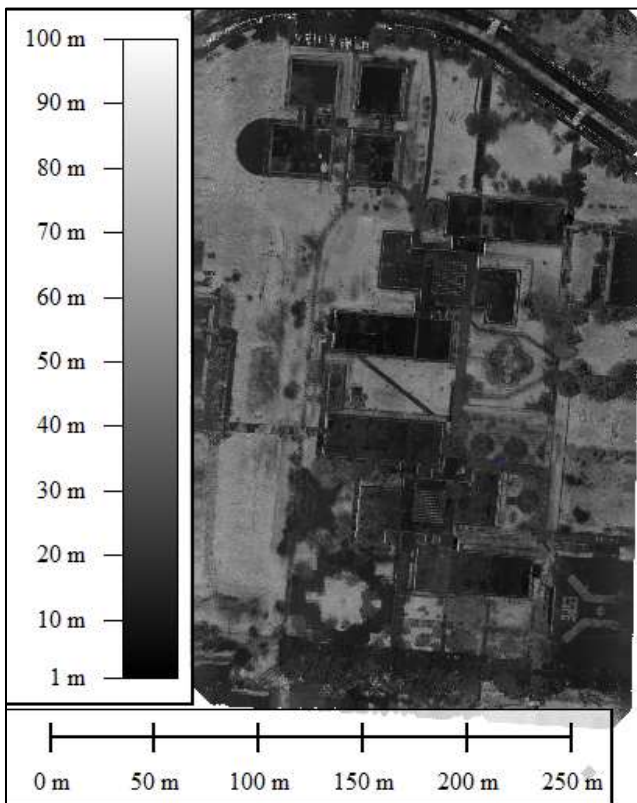


Figura 92.

Resultado Imagen de Intensidad vuelo 7

**Figura 93.**

Resultado Imagen de Intensidad vuelo 8

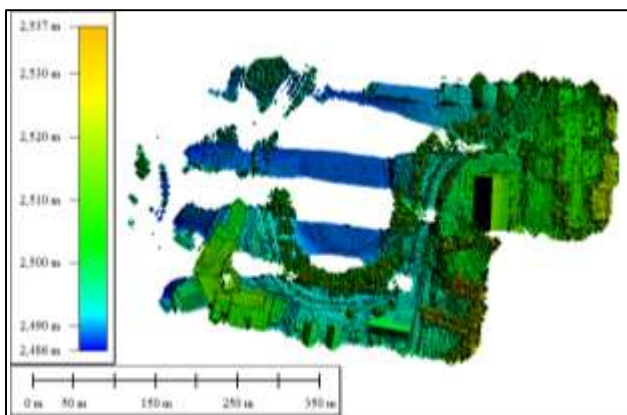


Resultados de obtención de Modelos digitales (MDS/MDE)

Resultados de Modelos digitales de superficie. Con las clases filtradas se obtiene el modelo digital de superficie de cada vuelo, representados en las Figuras 94-97. La escala de colores representa el valor de elevación, la tonalidad celeste representa el valor mínimo de altura, las tonalidades amarillo y naranja indican los valores máximos de altura.

Figura 94.

Resultado modelo digital de superficie vuelo 1



Figura

95.

Resultado modelo digital de superficie vuelo 3

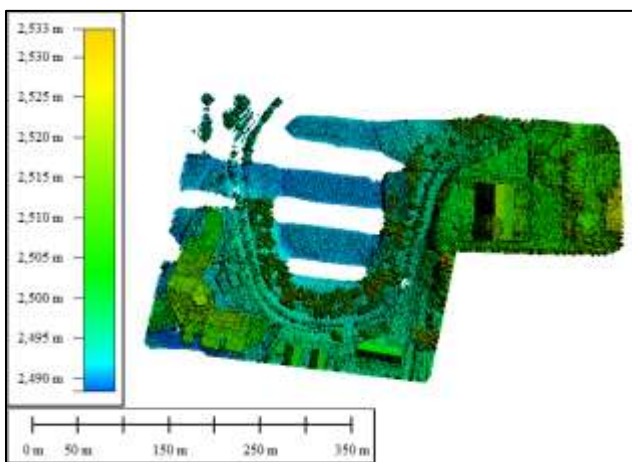
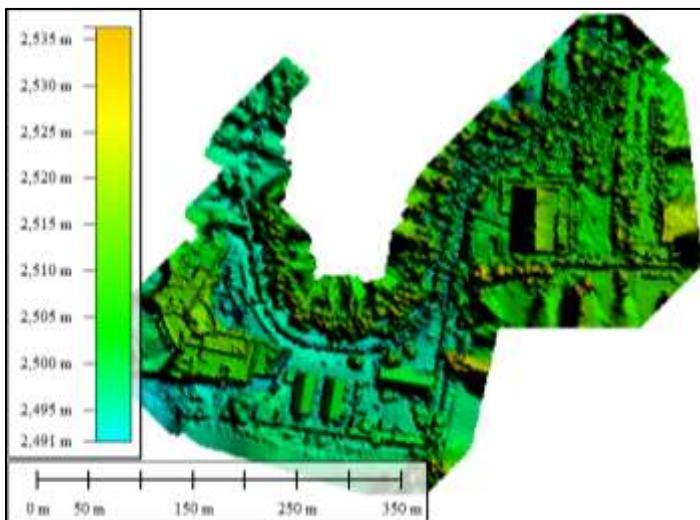
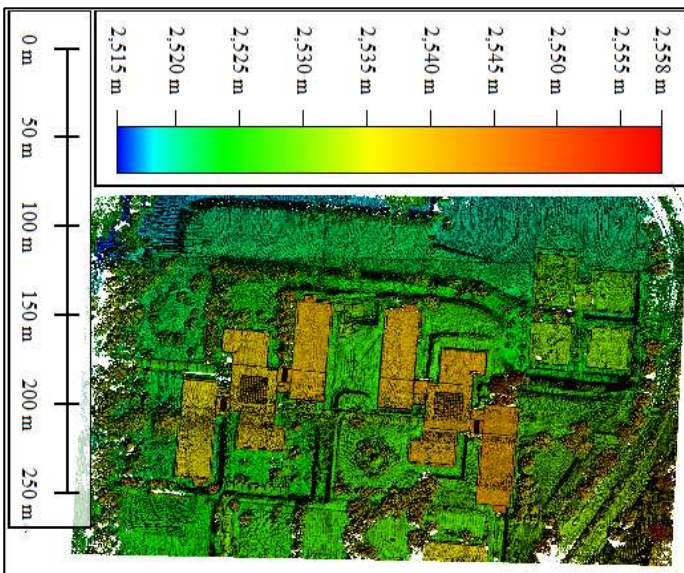


Figura 96.

Resultado modelo digital de superficie vuelo 7

**Figura 97.**

Resultado modelo digital de superficie vuelo 8



Resultados de Modelos digitales de elevación. Los modelos digitales de elevación se ilustran a partir de la Figura 98 hasta la Figura 101. El criterio de altura es el mismo que en el apartado anterior, las zonas más bajas se encuentran en color azul, las más altas

en este caso en la gama de amarillo y naranja; ya que, se han eliminado los elementos superficiales.

Figura 98.

Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 1

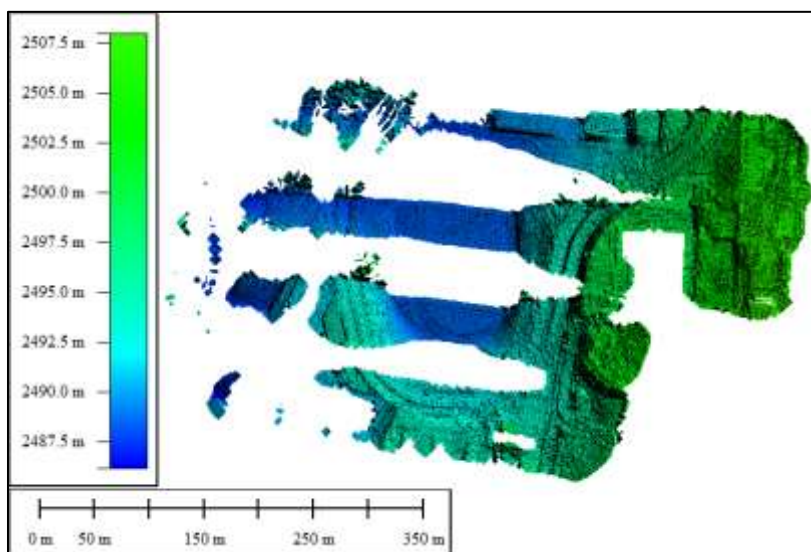


Figura 99.

Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 3

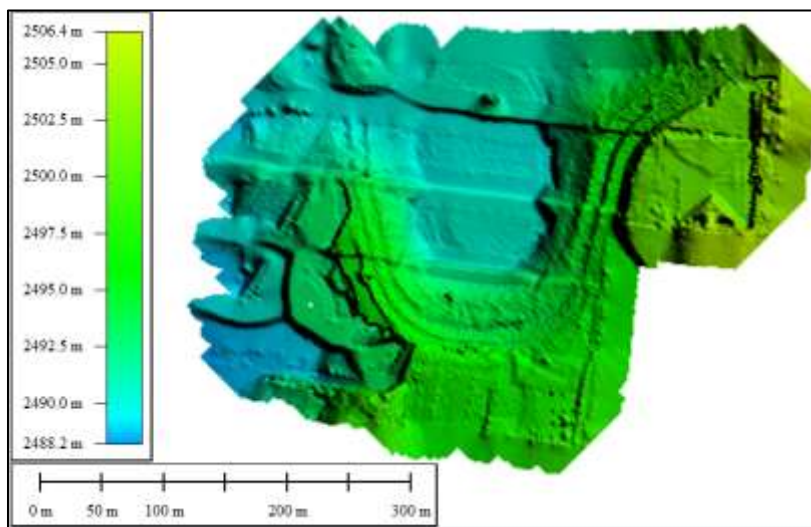
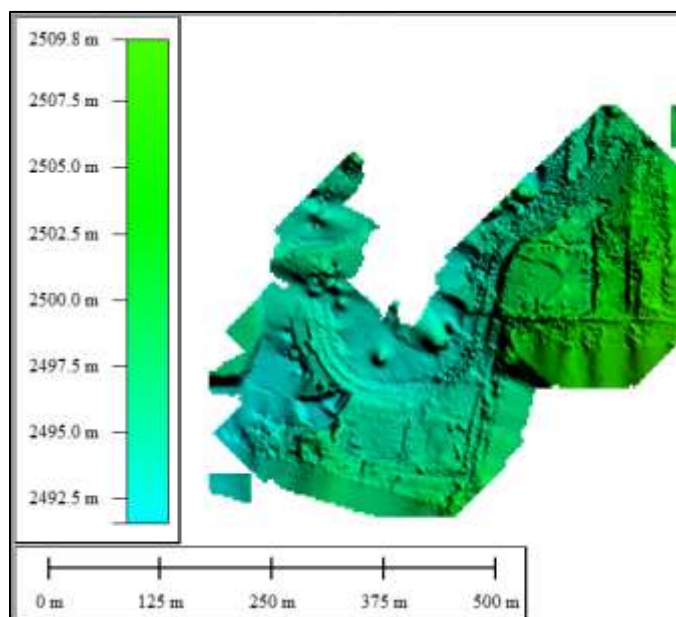
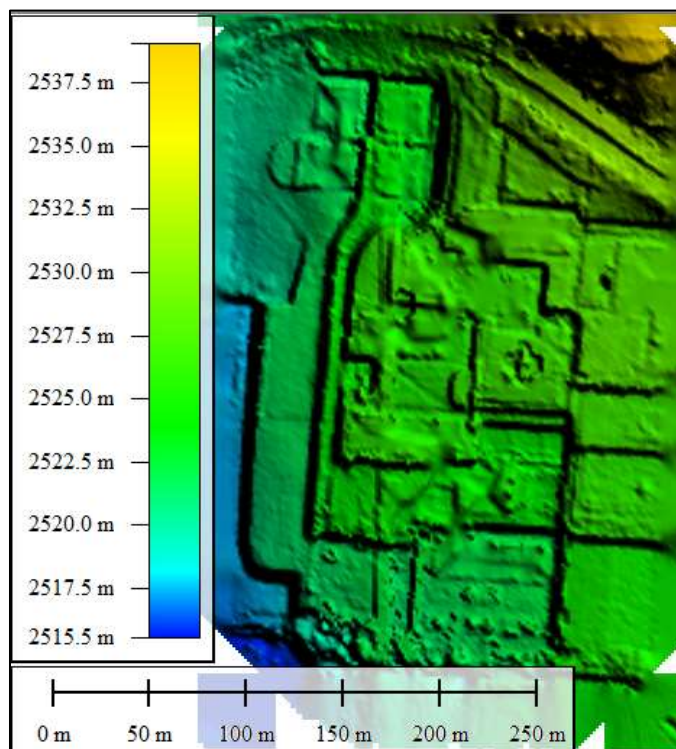


Figura 100.

Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 7

**Figura 101.**

Resultado del modelo digital de elevación del vuelo 8



Resultados de exactitud posicional

Resultados puntos de control y puntos de evaluación

Resultados de puntos de control. En la Figura 102 es posible visualizar la distribución de los puntos de control en la zona piloto 1, se procuró que los elementos superen los 20 puntos, en el área existen 29 puntos de control.

Figura 102.

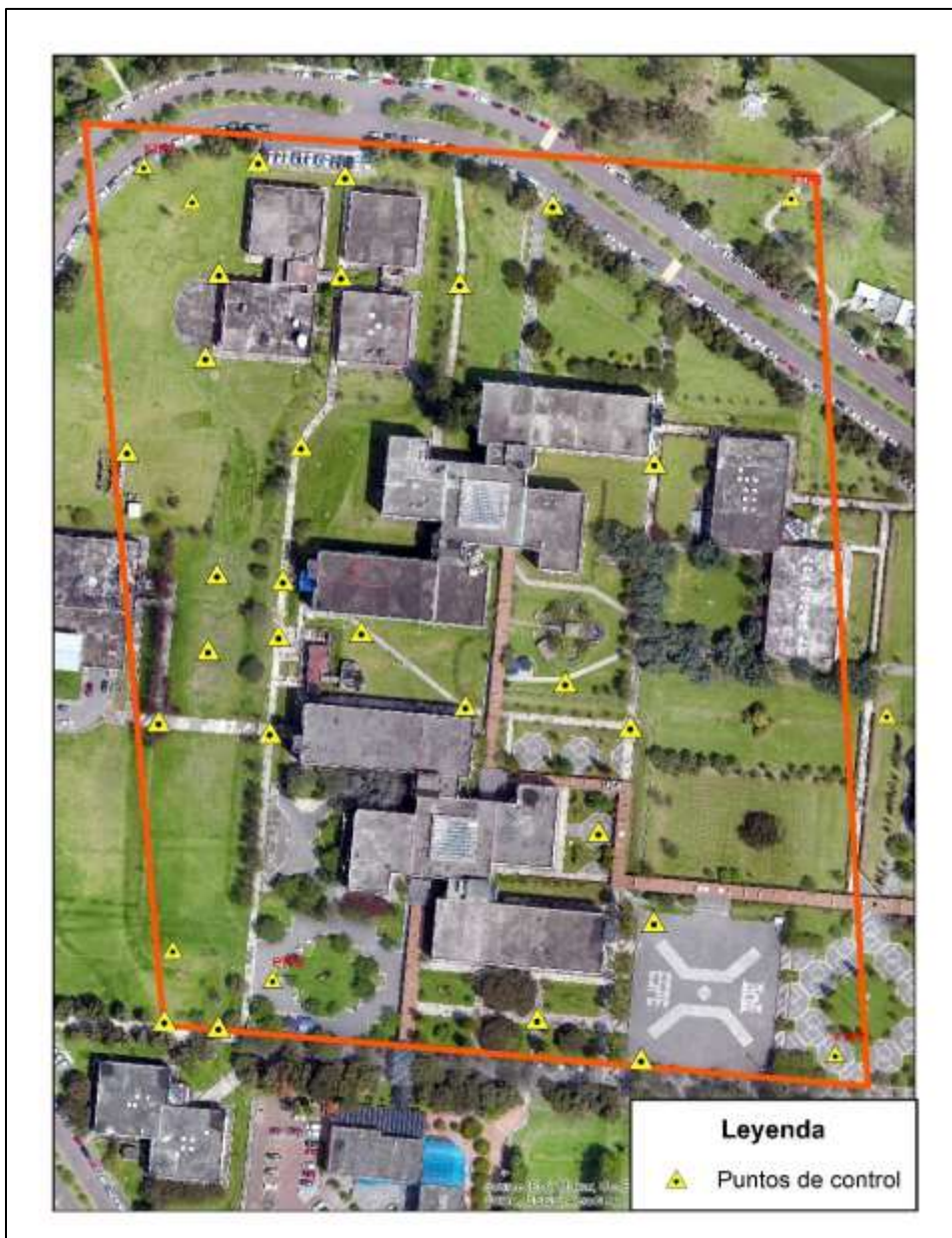
Resultado ubicación de puntos de control zona piloto 1



En la Figura 103 se identifica la distribución de los puntos de control en la zona piloto 2, bajo la consideración anterior, el área de prueba 2 se complementó, con un total de 31 puntos.

Figura 103.

Resultado ubicación de puntos de control zona piloto 2



Resultados de puntos de evaluación. En la primera área de prueba se consideró un total de 25 puntos de evaluación, distribuidos en el edificio de posgrados, el coliseo, edificio de la CAFDER, el estadio y polígonos pequeños junto al coliseo. La Figura 104 ejemplifica la cantidad de puntos que se han levantado en esta zona.

Figura 104.

Resultado ubicación de puntos de evaluación zona piloto 1



Con respecto al área de prueba 2, se levantaron 28 puntos de evaluación, distribuidos en: el bloque A, bloque B, bloque C, bloque D y el edificio de los laboratorios de electrónica. En la Figura 105 se ilustra la cantidad de puntos que se han levantado para esta área, son un total de 25 puntos.

Figura 105.

Resultado ubicación de puntos de evaluación zona piloto 2



Resultados de Exactitud posicional externa horizontal en infraestructura. Los resultados de este análisis se muestran en la Tabla 11, con respecto a las edificaciones; es más sencillo verificar el desplazamiento planimétrico, ya que son elementos geométricos identificables.

Tabla 11.

Resultados de planimetría en infraestructura zona piloto 1

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES		
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δy Norte metros	Distancia Euclidiana
POSGRADO1	784129,820	9964740,119	784129,025	9964739,018	0,795	1,101	1,358
POSGRADO2	784140,328	9964715,531	784140,281	9964714,203	0,047	1,328	1,329
POSGRADO4	784145,687	9964718,578	784146,023	9964716,905	-0,336	1,673	1,707
POSGRADO6	784170,736	9964689,590	784170,684	9964688,709	0,052	0,881	0,882
POSGRADO5	784173,405	9964701,571	784173,395	9964700,515	0,010	1,056	1,056
POSGRADO7	784190,671	9964684,881	784190,756	9964684,060	-0,085	0,821	0,825
POSGRADO10	784197,159	9964686,136	784197,398	9964685,075	-0,239	1,061	1,088
POSGRADO8	784193,810	9964697,072	784193,646	9964696,525	0,164	0,547	0,571
POSGRADO9	784199,618	9964696,130	784199,770	9964695,214	-0,152	0,916	0,928
POSGRADO11	784217,617	9964681,009	784217,546	9964680,439	0,071	0,570	0,574
COLISEO5	784460,163	9964842,414	784459,152	9964842,225	1,011	0,189	1,028
POSGRADO13	784218,918	9964721,346	784217,405	9964721,298	1,513	0,048	1,514
POSGRADO12	784227,914	9964719,759	784226,459	9964719,214	1,455	0,545	1,554
COLISEO4	784461,359	9964873,643	784460,399	9964873,664	0,960	-0,021	0,960
COLISEO3	784488,535	9964872,580	784488,251	9964871,843	0,284	0,737	0,790
COLISEO2	784498,834	9964872,115	784498,680	9964871,465	0,154	0,650	0,668
COLISEO1	784526,333	9964871,407	784526,574	9964870,992	-0,241	0,415	0,480
CAFDER3	784526,498	9964839,790	784525,413	9964839,493	1,085	0,297	1,125
CAFDER1	784525,558	9964803,582	784524,191	9964803,599	1,367	-0,017	1,367
CAFDER2	784513,940	9964804,031	784512,736	9964804,139	1,204	-0,108	1,209
COLISEO6	784471,259	9964842,082	784470,192	9964841,818	1,067	0,264	1,099
BODEGAC3	784544,817	9964919,727	784544,569	9964919,156	0,248	0,571	0,622
BODEGAC2	784549,491	9964919,537	784549,448	9964918,989	0,043	0,548	0,549
BODEGAC1	784549,852	9964912,560	784549,543	9964912,092	0,309	0,468	0,561
BODEGAC4	784544,855	9964912,674	784544,644	9964912,291	0,211	0,383	0,437
Numero de puntos de evaluación					25	25	25
Error medio (m)					0,440	0,597	0,971
Desviación Estándar (m)					0,591	0,440	0,365
RMSE (m)					0,727	0,737	
RMSEr (m) =SQRT(RMSEx2 + RMSEy2)						1,035	
NSSDA Precisión horizontal al 95% de confianza						1,791	

Nota: En donde: los campos LiDAR, Este y Norte fueron obtenidos a través de la herramienta "Calculate Geometry".

Es importante resaltar que el valor del error cuadrático medio en la variable X es de 0,727 metros y en la variable Y 0,597 metros; estos en conjunto conforman el error cuadrático medio horizontal (RMSEr) que en este caso es de 1,035 metros. Al utilizar la metodología NSSDA al 95% de confianza se multiplica este valor por el estándar 1,035, por lo tanto, de acuerdo a la norma mencionada el error sería de 1,791 metros.

Resultados del análisis exploratorio. A continuación, las Tablas 12, 13 y 14 muestran los resultados de los análisis exploratorios de los residuales para X y Y, además, los resultados con respecto a la distancia euclidiana.

Tabla 12.

Resultados del estadístico Δx Este

Δx Este	
Media	0,440
Mediana	0,211
Moda	-
Desviación estándar	0,591
Rango	1,849
Mínimo	-0,336
Máximo	1,513
Cuenta	25

En los resultados de los estadísticos para Δx Este se puede observar que el valor mínimo es de -0,336 que corresponde al punto POSGRADOS 4 y un máximo de 1,513 relacionado al punto POSGRADOS 13. El error promedio en los residuales X de 0,44 metros equivalente a 44 cm.

Tabla 13.

Resultados del estadístico Δy Norte

Δy Norte	
Media	0,597
Mediana	0,548
Moda	-
Desviación estándar	0,440
Rango	1,781
Mínimo	-0,108
Máximo	1,673
Cuenta	25

En la variable Y es posible determinar que el máximo error se ubica en el punto POSGRADOS 4, igual que en la variable X. Por otra parte, el mínimo es de -0,108 metros y este valor corresponde al punto CAFDER 2. En promedio el error tiende a 60 cm.

Tabla 14.*Resultados del estadístico distancia euclidiana*

Distancia Euclidiana	
Media	0,971
Mediana	0,960
Moda	-
Desviación estándar	0,365
Rango	1,269
Mínimo	0,437
Máximo	1,707
Cuenta	25

La distancia euclidiana refleja la distancia entre dos puntos, con respecto a la media presenta un valor de 0,971 metros con una desviación estándar de 0,365 metros; la mínima diferencia entre los valores es de 0,437 metros, mientras que el valor de diferencia máximo es de 1,707 metros.

A continuación, la Tabla 15 muestra el resumen del análisis de residuales y distancia euclidiana en el área de prueba 2.

Tabla 15.*Resultados de planimetría en infraestructura zona piloto 2*

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES		Distancia Euclidean metros
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δy Norte metros	
A1	784341,236	9965217,216	784340,575	9965217,309	0,661	-0,093	0,668
A2	784341,756	9965236,450	784342,352	9965236,622	-0,596	-0,172	0,620
A3	784398,212	9965232,032	784397,500	9965231,538	0,712	0,494	0,866
A4	784396,652	9965212,537	784395,775	9965212,388	0,877	0,149	0,890
B1	784352,933	9965276,219	784352,443	9965276,544	0,490	-0,325	0,588
B2	784354,752	9965296,493	784354,094	9965295,791	0,658	0,702	0,962
B3	784298,609	9965300,911	784298,914	9965300,782	-0,305	0,129	0,331
B4	784297,309	9965281,417	784297,154	9965281,666	0,155	-0,249	0,293
C1	784302,381	9965332,268	784301,974	9965331,381	0,407	0,887	0,976
C2	784304,004	9965349,783	784303,651	9965350,492	0,353	-0,709	0,792
C3	784357,044	9965326,818	784356,924	9965326,275	0,120	0,543	0,556
C4	784358,215	9965345,292	784358,588	9965345,543	-0,373	-0,251	0,449
D1	784356,264	9965386,958	784355,731	9965386,661	0,533	0,297	0,610
D2	784357,851	9965405,571	784357,509	9965405,913	0,342	-0,342	0,484
D3	784412,713	9965400,743	784412,596	9965400,810	0,117	-0,067	0,135
D4	784411,390	9965383,148	784410,974	9965381,775	0,416	1,373	1,434
DEP1	784326,161	9965239,310	784325,921	9965239,006	0,240	0,304	0,387
DEP2	784312,125	9965240,349	784312,916	9965240,135	-0,791	0,214	0,820
DEP3	784315,037	9965265,381	784315,229	9965265,977	-0,192	-0,596	0,626
DEP4	784334,998	9965264,262	784334,809	9965264,213	0,189	0,049	0,196

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES		Distancia Euclídeana metros
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δy Norte metros	
DEP5	784333,611	9965244,981	784333,097	9965244,783	0,514	0,198	0,551
DEP6	784326,421	9965244,768	784326,485	9965245,419	-0,064	-0,651	0,654
DEP7	784379,093	9965247,918	784379,387	9965247,128	-0,294	0,790	0,843
DEP8	784359,223	9965248,667	784359,837	9965248,914	-0,614	-0,247	0,662
E1	784280,699	9965449,611	784280,162	9965448,328	0,537	1,283	1,391
E2	784302,064	9965449,545	784302,869	9965448,243	-0,805	1,302	1,531
E3	784303,718	9965468,397	784304,594	9965468,768	-0,876	-0,371	0,952
E4	784282,220	9965469,323	784282,085	9965470,854	0,135	-1,531	1,537
Numero de puntos de evaluación					28	28	28
Error medio (m)					0,091	0,111	0,743
Desviación Estándar (m)					0,504	0,662	0,377
RMSE (m)					0,503	0,660	
RMSEr (m) =SQRT(RMSEx2 + RMSEy2)					0,830		
NSSDA Precisión horizontal al 95% de confianza					1,437		

En cuanto al error cuadrático medio para la coordenada Este el valor es de 0,503 metros, de la coordenada Norte 0,662 metros; la suma de los cuadrados de cada uno representa el error cuadrático medio horizontal (RMSEr), dando un valor de 0,830 metros. Bajo la norma NSSDA se obtiene un error planimétrico de a 1,437 metros.

Resultados del análisis exploratorio. En las Tablas: 16, 17 y 18 se presentan los resultados obtenidos de los análisis exploratorios de datos con respecto a las variables Δx Este, Δy Norte y distancia euclidiana.

Tabla 16.

Resultados del estadístico Δx Este

Δx Este	
Media	0,091
Mediana	0,172
Moda	-
Desviación estándar	0,504
Rango	1,754
Mínimo	-0,876
Máximo	0,877
Cuenta	28

En el área de prueba 2 el mayor error en X se determina en el bloque A en la coordenada A4 y el mínimo en el laboratorio de electrónica con la coordenada E3; a su vez refleja un promedio de 0,091.

Tabla 17.*Resultados del estadístico Δy Norte*

Δy Norte	
Media	0,111
Mediana	0,089
Moda	-
Desviación estándar	0,662
Rango	2,904
Mínimo	-1,531
Máximo	1,373
Cuenta	28

Los resultados obtenidos para la variable Norte son: el error promedio de 0,111 metros; presenta un valor mínimo de -1,531 y como máximo de 1,373; cabe destacar que el conjunto de datos no presenta valores repetidos es por este motivo que no se determina la moda.

Tabla 18.*Resultados del estadístico Distancia Euclidiana*

Distancia Euclidiana	
Media	0,743
Mediana	0,658
Moda	-
Desviación estándar	0,377
Rango	1,402
Mínimo	0,135
Máximo	1,537
Cuenta	28

Con respecto a la distancia euclidiana, se puede observar que el error promedio es 0,743 metros; al igual que en el caso anterior no presenta valores repetidos y la distancia máxima recae en el punto E4.

Resultados de Exactitud posicional externa vertical en infraestructura

A continuación, en la Tabla 19 se presenta el conjunto de datos obtenidos, que posteriormente serán analizados

Tabla 19.

Resultados de altimetría en infraestructura zona piloto 1

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES
	Elevación (H) metros	Elevación (H) metros		Δz Elevación metros
POSGRADO1	2500	2500,850		-0,850
POSGRADO2	2504	2500,842		3,158
POSGRADO4	2515	2500,864		14,136
POSGRADO6	2510	2505,832		4,168
POSGRADO5	2509	2505,837		3,163
POSGRADO7	2510	2505,818		4,182
POSGRADO10	2510	2505,834		4,166
POSGRADO8	2510	2505,821		4,179
POSGRADO9	2510	2505,843		4,157
POSGRADO11	2510	2505,834		4,166
COLISEO5	2506	2503,315		2,685
POSGRADO13	2509	2505,803		3,197
POSGRADO12	2504	2505,794		-1,794
COLISEO4	2506	2503,268		2,732
COLISEO3	2505	2503,266		1,734
COLISEO2	2507	2503,256		3,744
COLISEO1	2505	2503,300		1,700
CAFDER3	2512	2509,343		2,657
CAFDER1	2512	2509,334		2,666
CAFDER2	2512	2509,321		2,679
COLISEO6	2506	2503,329		2,671
BODEGAC3	2506	2502,561		3,439
BODEGAC2	2505	2502,545		2,455
BODEGAC1	2505	2502,551		2,449
BODEGAC4	2505	2502,556		2,444
Numero de puntos de evaluación				25
Error medio (m)				3,203
Desviación Estándar (m)				2,698
RMSE (m)				4,153
NSSDA Precisión Vertical al 95% de confianza				8,140

En esta evaluación se mantiene la cantidad 25 puntos levantados en zonas altas, se puede diferenciar de la parte planimétrica ya que el valor en elevación es alto, en este caso el error promedio es de 3,203 metros con una desviación estándar de 2,698 metros y con respecto a la norma NSSDA presenta un incremento hasta los 8,140 metros.

Resultados del análisis exploratorio. La Tabla 20 presenta los estadísticos de la variable Δz Elevación.

Tabla 20.*Resultados del estadístico Δz Elevación*

Δz Elevación	
Media	3,203
Mediana	2,732
Moda	4,166
Desviación estándar	2,698
Rango	15,930
Mínimo	-1,794
Máximo	14,136
Cuenta	25,000

La Tabla 20 analiza la variable elevación teniendo como resultados: un error promedio de 3,203 metros; a diferencia de los datos evaluados con anterioridad se distingue la moda en 4,166 metros. Se hace alusión al error máximo correspondiente al punto POSGRADOS 4.

A continuación, en la Tabla 21 se visualizan los resultados de los valores obtenidos en la variable Z.

Tabla**21.**

Resultados de altimetría en infraestructura zona piloto 2

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE EVALUACIÓN	RESIDUALES
	Elevación (H) metros	Elevación (H) metros	Δz Elevación metros
A1	2512	2505,847	6,153
A2	2511	2505,846	5,154
A3	2499	2505,861	-6,861
A4	2511	2505,861	5,139
B1	2514	2509,220	4,780
B2	2515	2509,200	5,800
B3	2506	2509,236	-3,236
B4	2515	2509,254	5,746
C1	2515	2509,199	5,801
C2	2514	2509,220	4,780
C3	2515	2509,247	5,753
C4	2514	2509,263	4,737
D1	2517	2511,852	5,148
D2	2517	2511,827	5,173
D3	2517	2511,827	5,173

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE EVALUACIÓN	RESIDUALES
	Elevación (H) metros	Elevación (H) metros	Δz Elevación metros
D4	2517	2511,842	5,158
DEP1	2513	2507,502	5,498
DEP2	2500	2507,521	-7,521
DEP3	2509	2507,499	1,501
DEP4	2513	2507,614	5,386
DEP5	2512	2507,639	4,361
DEP6	2513	2507,477	5,523
DEP7	2512	2507,462	4,538
DEP8	2512	2507,681	4,319
E1	2502	2497,105	4,895
E2	2502	2497,115	4,885
E3	2503	2497,048	5,952
E4	2502	2497,042	4,958
Numero de puntos de evaluación			28
Error medio (m)			3,882
Desviación Estándar (m)			3,597
RMSE (m)			5,248
NSSDA Precisión Vertical al 95% de confianza			10,286

Por lo general en elevación siempre existe mayor error, sin embargo, el error promedio en este caso es de 3,882 metros; pero, al calcular el error cuadrático medio con la metodología NSSDA este se triplica, obteniendo 10,286 metros.

Resultados del análisis exploratorio. La Tabla 22 presenta los estadísticos de la variable Δz Elevación.

Tabla 22.

Resultados del estadístico Δz Elevación

Δz Elevación	
Media	3,882
Mediana	5,144
Moda	4,780
Desviación estándar	3,597
Rango	13,674
Mínimo	-7,521
Máximo	6,153
Cuenta	28

Un valor que resalta en la Tabla 21 es el rango, debido a que es la diferencia entre el mínimo y máximo del conjunto de datos, en este caso se debe a que valor mínimo es de

-7,521 correspondiente al punto DEP4 y el valor máximo es de 6,153 metros con lo cual se obtiene un rango elevado.

Resultados de Exactitud posicional externa horizontal en terreno

En comparación con los elementos de infraestructura, en la imagen de intensidad es difícil identificar objetos geométricos en suelo, con los cuales se puede llevar a cabo un análisis para las variables planimétricas. A pesar de lo mencionado, se utilizó los puntos identificables para realizar este análisis.

Tabla 23.

Resultados de planimetría en suelo zona piloto 1

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE CONTROL		RESIDUALES		
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δy Norte metros	Distancia Euclidiana metros
FTP14	784229,525	9964739,625	784228,540	9964739,480	0,985	0,145	0,995
FTP15	784393,634	9964732,305	784392,208	9964732,160	1,426	0,145	1,433
FTP11	784522,793	9964912,927	784522,685	9964912,245	0,108	0,682	0,691
adicion24	784531,920	9964801,473	784530,130	9964800,501	1,790	0,972	2,036
adicion25	784533,110	9964835,207	784534,402	9964835,999	-1,292	-0,792	1,515
adicion26	784533,242	9964865,608	784532,807	9964867,252	0,435	-1,644	1,701
adicion1	784482,945	9964906,248	784484,005	9964904,426	-1,060	1,822	2,108
P8	784416,261	9964849,535	784416,236	9964848,831	0,025	0,704	0,705
adicion21	784391,996	9964751,957	784390,919	9964751,180	1,077	0,777	1,328
adicion20	784371,768	9964726,094	784371,591	9964726,783	0,177	-0,689	0,711
adicion17	784201,033	9964750,055	784198,978	9964750,942	2,055	-0,887	2,238
adicion15	784205,589	9964815,325	784205,725	9964815,089	-0,136	0,236	0,273
adicion16	784215,896	9964769,916	784217,219	9964771,590	-1,323	-1,674	2,133
adicion14	784255,647	9964875,546	784252,403	9964876,072	3,244	-0,526	3,286
Numero de puntos de evaluación					14	14	14
Error medio (m)					0,537	-0,052	1,511
Desviación Estándar (m)					1,327	1,021	0,810
RMSE (m)					1,386	0,985	
RMSEr (m) =SQRT(RMSEx2 + RMSEy2)						1,701	
NSSDA Precisión horizontal al 95% de confianza						2,944	

En la Tabla 23 con lo descrito anteriormente, es necesario aclarar que en esta zona se obtuvieron 28 puntos de control, de los cuales únicamente 14 puntos fueron identificados en la imagen de intensidad utilizada.

Según la norma NSSDA al nivel de confianza del 95% se obtiene un error cuadrático medio (RMSEr) de 1,701 metros en planimetría. Para la variable X el error cuadrático medio es 1,386 y para la variable Y es 0,985 metros.

Resultados del análisis exploratorio. En las Tablas: 24, 25 y 26 se presentan los resultados obtenidos de los análisis exploratorios de datos con respecto a las variables Δx Este, Δy Norte y distancia euclidiana.

Tabla 24.

Resultados del estadístico Δx Este

Δx Este	
Media	0,537
Mediana	0,306
Moda	-
Desviación estándar	1,327
Rango	4,567
Mínimo	-1,323
Máximo	3,244
Cuenta	14

La Tabla 24 refleja las medidas de tendencia central de la variable X, el error medio es 0,537 metros con respecto al área de prueba 1, el mayor error en X es 3,244 metros y el mínimo es -1,323 metros, al igual que en cálculos anteriores no es posible identificar el valor de moda ya que no se identifican valores repetidos.

Tabla 25.

Resultados del estadístico Δy Norte

Δy Norte	
Media	-0,052
Mediana	0,145
Moda	-
Desviación estándar	1,021
Rango	3,496
Mínimo	-1,674
Máximo	1,822
Cuenta	14

Para la la variable Norte los resultados se muestran en la Tabla 25, teniendo: el valor máximo de 1,822 y el mínimo -1,674; cabe destacar que el error promedio es un valor negativo.

Tabla 26.*Resultados del estadístico Distancia Euclidiana*

Distancia Euclidiana	
Media	1,511
Mediana	1,474
Moda	-
Desviación estándar	0,810
Rango	3,014
Mínimo	0,273
Máximo	3,286
Cuenta	14

Se observa que en promedio se tiene una diferencia de 1,511 metros con respecto a la distancia euclidiana; la distancia máxima se refleja en el punto adicional 14 ubicado en el estadio cerrado y la distancia mínima es de 0,273 que se encuentra en una acera cerca del edificio de posgrados.

La Tabla 27 presenta los estadísticos de los residuales Δx Este, Δy Norte y distancia euclidiana.

Tabla**27.**

Resultados de planimetría en suelo de la zona piloto 2

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES		
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δx Norte metros	Distancia Euclidiana metros
FTP6	784288,333	9965210,235	784287,755	9965210,566	0,578	-0,331	0,666
GCP-20	784423,097	9965444,806	784422,582	9965445,070	0,515	-0,264	0,578
P2	784261,011	9965466,626	784261,347	9965466,179	-0,336	0,447	0,559
adicionales33	784413,304	9965229,308	784413,074	9965229,449	0,230	-0,141	0,270
adicionales34	784409,527	9965184,588	784408,882	9965184,463	0,645	0,125	0,657
adicionales35	784374,670	9965197,555	784374,706	9965197,642	-0,036	-0,087	0,094
GCP29	784299,694	9965254,843	784299,533	9965255,458	0,161	-0,615	0,636
adicionales2	784286,983	9965292,754	784286,845	9965291,667	0,138	1,087	1,096
adicionales3	784249,691	9965294,843	784250,363	9965295,189	-0,672	-0,346	0,756
adicionales7	784239,550	9965383,762	784239,924	9965383,985	-0,374	-0,223	0,435
adicionales32	784395,374	9965258,747	784394,874	9965258,924	0,500	-0,177	0,530
adicionales31	784405,830	9965293,786	784405,310	9965293,583	0,520	0,203	0,558
adicionales19	784350,919	9965300,536	784351,199	9965300,363	-0,280	0,173	0,329
adicionales23	784316,825	9965324,807	784316,984	9965324,682	-0,159	0,125	0,202
adicionales26	784296,466	9965384,258	784297,133	9965385,542	-0,667	-1,284	1,447

NOMBRE	LIDAR		PUNTO DE EVALUACIÓN		RESIDUALES		
	Este (E) metros	Norte (N) metros	Este (E) metros	Norte (N) metros	Δx Este metros	Δx Norte metros	Distancia Euclidiana metros
adicionales18	784413,668	9965381,002	784413,220	9965380,115	0,448	0,887	0,994
adicionales13	784310,170	9965440,867	784310,260	9965441,387	-0,090	-0,520	0,528
adicionales16	784379,918	9965464,326	784379,803	9965464,828	0,115	-0,502	0,515
adicionales12	784311,467	9965473,666	784311,596	9965474,266	-0,129	-0,600	0,613
adicionales9	784270,089	9965442,705	784270,147	9965442,412	-0,058	0,293	0,298
adicionales8	784265,882	9965415,227	784265,699	9965414,889	0,183	0,338	0,384
Numero de puntos de evaluación					21	21	21
Error medio (m)					0,059	-0,067	0,578
Desviación Estándar (m)					0,393	0,534	0,310
RMSE (m)					0,388	0,525	
RMSEr (m) =SQRT(RMSEx2 + RMSEy2)					0,653		
NSSDA Precisión horizontal al 95% de confianza					1,130		

En la Tabla 27, es importante señalar que en el área piloto 2 se obtuvieron 25 puntos de control, de los cuales únicamente 21 puntos se lograron identificar en la imagen de intensidad. De la variable X se obtiene un error cuadrático medio de 0,388 metros y para la variable Y es 0,525 metros; utilizando la norma NSSDA, se obtiene un error cuadrático medio (RMSEr) de 1,130 metros.

Resultados del análisis exploratorio. A continuación, las Tablas 28, 29 y 30 muestran los resultados de los análisis exploratorios de los residuales para X y Y, además, los resultados con respecto a la distancia euclidiana

Tabla 28.

Resultados del estadístico Δx Este

Δx Este	
Media	0,059
Mediana	0,115
Moda	-
Desviación estándar	0,393
Rango	1,317
Mínimo	-0,672
Máximo	0,645
Cuenta	21

La Tabla 28 representa el análisis estadístico para la variable Este, los resultados son: el valor máximo de 0,645 y el mínimo -0,672; con un error promedio de 0,059 metros y una desviación estándar de 0,393 metros.

Tabla 29.

Resultados del estadístico Δy Norte

Δx Norte	
Media	-0,067
Mediana	-0,141
Moda	-
Desviación estándar	0,534
Rango	2,371
Mínimo	-1,284
Máximo	1,087
Cuenta	21

Las medidas de tendencia central de la variable Y se identifican en la Tabla 29, con un promedio de -0,067 metros en la zona piloto 2, el máximo residual en Y es 1,087 metros y el menor -1,284 metros, no se obtiene el valor de la moda, debido a que ya que no se identifican valores repetidos.

Tabla 30.

Resultados del estadístico Distancia Euclidiana

Distancia Euclidiana	
Media	0,578
Mediana	0,558
Moda	-
Desviación estándar	0,310
Rango	1,353
Mínimo	0,094
Máximo	1,447
Cuenta	21

La media de la distancia euclidiana es 0,578 metros con una desviación estándar de 0,310 metros; la distancia mínima entre los valores es de 0,094 metros, mientras que el valor de diferencia máximo es de 1,447 metros.

Resultados de Exactitud posicional externa vertical en terreno

En la Tabla 31 se tiene el resumen del análisis de residuales en elevación para el área de prueba 1.

Tabla 31.

Resultados de altimetría en suelo zona piloto 1

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE CONTROL	Δz Elevación metros
	Elevación E (H) metros	Elevación (H) metros	
FTP14	2496	2495,668	0,332
FTP15	2496	2495,668	0,332
FTP11	2502	2500,836	1,164
adicion24	2505	2505,088	-0,088
adicion25	2502	2503,435	-1,435
adicion26	2504	2503,447	0,553
adicion1	2499	2497,798	1,202
P8	2496	2495,024	0,976
adicion23	2499	2500,166	-1,166
adicion21	2495	2493,078	1,922
adicion20	2495	2492,802	2,198
adicion19	2496	2494,289	1,711
adicion18	2496	2493,971	2,029
adicion17	2493	2493,128	-0,128
adicion15	2494	2494,246	-0,246
adicion16	2496	2495,796	0,204
adicion11	2490	2489,178	0,822
adicion12	2491	2489,161	1,839
adicion13	2491	2488,133	2,867
GCP-33	2490	2489,559	0,441
adicion10	2490	2489,045	0,955
adicion9	2490	2489,739	0,261
adicion14	2490	2488,310	1,690
adicion5	2491	2488,034	2,966
adicion3	2491	2489,345	1,655
adicion6	2491	2488,091	2,909
adicion4	2491	2489,962	1,038
adicion22	2496	2495,183	0,817
Numero de puntos de evaluación			28
Error medio (m)			0,994
Desviación Estándar (m)			1,119
RMSE (m)			1,481
NSSDA Precisión Vertical al 95% de confianza			2,903

Para la evaluación en altura se trabajó con 28 puntos de control, obteniendo: un error promedio de 0,994 metros con una desviación estándar de 1,119 metros y un error cuadrático medio correspondiente a 1,481 metros; en función de la norma NSSDA este valor cambia a 2,903 metros.

Resultados del análisis exploratorio. La Tabla 32 presenta los estadísticos de la variable Δz Elevación.

Tabla 32.

Resultados del estadístico Δz Elevación

Δz Elevación	
Media	0,994
Mediana	0,965
Moda	0,332
Desviación estándar	1,119
Rango	4,401
Mínimo	-1,435
Máximo	2,966
Cuenta	28

Los resultados obtenidos en la Tabla 32 analizan la variable elevación teniendo: un máximo diferencial de aproximadamente 3 m, el mínimo residual es -1,435 y la moda en este caso es 0,332.

En la Tabla 33 se identifican los residuales para la variable elevación con respecto al área de prueba 2.

Tabla 33.

Resultados de altimetría en suelo zona piloto 2

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE EVALUACIÓN	RESIDUALES
	Elevación (H) metros	Elevación (H) metros	Δz Elevación metros
FTP6	2495	2491,955	3,045
GCP-20	2504	2501,831	2,169
P2	2494	2490,157	3,843
adicionales33	2498	2493,830	4,170
adicionales34	2499	2493,803	5,197
adicionales35	2497	2491,922	5,078
adicionales36	2492	2487,339	4,661
GCP29	2498	2494,591	3,409
adicionales2	2498	2493,320	4,680
adicionales3	2495	2491,286	3,714
adicionales5	2496	2491,600	4,400
adicionales7	2493	2488,915	4,085
adicionales32	2498	2493,613	4,387

NOMBRE	LIDAR	PUNTO DE EVALUACIÓN	RESIDUALES
	Elevación (H) metros	Elevación (H) metros	Δz Elevación metros
adicionales31	2500	2495,251	4,749
adicionales19	2500	2495,200	4,800
adicionales23	2500	2495,287	4,713
adicionales26	2498	2493,084	4,916
adicionales18	2502	2497,697	4,303
adicionales13	2498	2493,061	4,939
adicionales14	2501	2496,409	4,591
adicionales16	2504	2499,340	4,660
GCP-27	2509	2497,674	11,326
adicionales12	2499	2494,045	4,955
adicionales9	2496	2490,829	5,171
adicionales8	2495	2490,556	4,444
Numero de puntos de evaluación			25
Error medio (m)			4,656
Desviación Estándar (m)			1,558
RMSE (m)			4,900
NSSDA Precisión Vertical al 95% de confianza			9,604

En elevación se puede determinar que existe un error mayor con respecto a la planimetría analizada, observando que el error cuadrático medio en este caso es de 4,9 metros; que al multiplicarse por lo sugerido en la metodología NSSDA este se duplica, obteniendo un valor de 9,604 metros como RMSEz.

Resultados del análisis exploratorio. Los estadísticos de la variable Δz Elevación se visualizan Tabla 34 presenta los.

Tabla 34.

Resultados del estadístico Δz Elevación

Δz Elevación	
Media	4,656
Mediana	4,660
Moda	-
Desviación estándar	1,558
Rango	9,157
Mínimo	2,169
Máximo	11,326
Cuenta	25

Un valor que se destaca en la Tabla 34 es el error máximo ya que este es de 11,326 metros y corresponde a un punto de control ubicado al límite del polígono determinado como área de prueba 2. Por otra parte, en este análisis no se identifica un valor de moda como en los demás cálculos para la variable elevación.

Finalmente, en la Tabla 35 se muestra el resumen de los principales estadísticos calculados.

Tabla 35.

Resumen de estadísticos evaluados en planimetría y altimetría

EXACTITUD POSICIONAL EXTERNA					
Evaluación	Parametros	INFRAESTRUCTURA		SUELO	
		ZONA 1	ZONA 2	ZONA 1	ZONA 2
Planimétrica	RMSEr	1,035	0,830	1,701	0,653
	NSSDA	1,795	1,437	2,944	1,130
	Media X	0,440	0,091	0,537	0,059
	Media Y	0,500	0,111	0,052	0,067
	Media DE	0,971	0,743	1,511	0,578
Altimétrica	RMSEz	4,153	5,248	1,481	4,900
	NSSDA	8,140	10,286	2,903	9,604
	Media	3,203	3,882	0,994	4,650

Lo que refleja que en la Zona 2 de mayor densidad de puntos la planimetría tiene mejores resultados cuando se realiza la evaluación del desplazamiento horizontal con un RMSEr de 1,130 metros y en la Zona 1 de menor densidad de puntos, el análisis de elevación el error cuadrático medio se obtiene el menor valor 2,903 metros.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

En conclusión se han cumplido todos los objetivos y metas de este proyecto, obteniendo una metodología de procesamiento de datos LIDAR que incluye: conocimiento del sensor, objetivo de la toma, planificación del vuelo y control, parámetros ideales de vuelo, obtención del archivo LAS, cambio de la densificación de la nube de puntos, depuración de errores groseros y ruido, clasificación de diferentes categorías, obtención de productos (MDS y MDE) y evaluación de la exactitud posicional externa en planimetría y altimetría.

Para hacer un levantamiento de información con tecnología LIDAR, en conclusión: en cuanto al vuelo con dron, se debe conocer las características del sensor, principalmente, la altura de vuelo, el FOV y la densidad de puntos establecida por el fabricante; en relación a la altura, velocidad, FOV y traslape, en esta investigación se considera que los parámetros ideales serían: 50 metros de altura, 4.5 m/s, 90° y 20% de traslape lateral; luego del vuelo es importante, inmediatamente, procesar las tomas por líneas independientes debido a que reducen los ruidos y mejoran la interpretación en la etapa de clasificación; con respecto a la densificación de puntos, esta dependerá del objetivo de análisis, en este caso una reducción de 100 puntos a 10, provoca una menor apreciación de los elementos clasificados, aunque mejoran el procesamiento y almacenamiento de la información; finalmente, a más de la clasificación automática, es indispensable la clasificación manual utilizando una imagen (ortofoto) para la colorización de la nube de puntos, siempre y cuando la imagen no esté desplazada con respecto a los puntos LIDAR.

De acuerdo a la exactitud posicional externa planimétrica en infraestructura en el vuelo 3 (Zona de menor densidad de puntos) es 1, 795 metros de RMSEr y en el vuelo 8 (Zona de mayor densidad de puntos) de 1, 437 metros RMSEr, con referencia a la metodología NSSDA, proporcionando mejores resultados en el vuelo 8; analizando la distancia euclidiana se obtiene un valor promedio de 0,971 metros y 0,743 metros en las dos zonas respectivamente, confirmando el análisis anterior. Al evaluar la exactitud altimétrica en infraestructura el RMSEz del vuelo 3 en el área de prueba 1 es 8,140 metros y en el vuelo 8 del área de prueba 2 un RMSEz de 10,286 metros ; en conclusión tanto en planimetría como en altimetría estos datos están desplazados respecto a una escala 1:1000, lo que no concuerda con la teoría, en cuanto a exactitud altimétrica de 15 cm según Ibañez (2008), indicando que el sensor probablemente se encuentra descalibrado y demostrando la importancia de esta investigación en cuanto al análisis de todo el proceso y especialmente, en la valoración de los desplazamientos que pueden ocurrir en X, Y e Z.

En el área con menos registro de información para el criterio posicional en suelo, el RMSEr es de 2,94 metros y el RMSEz 2,903m. Por otra parte, para el área de mayor densidad el valor del RSMER es de 1,130 metros en horizontal y es 9,604 m para el RMSEz, manteniendo la conclusión anterior donde el mayor desplazamiento se identifica en la variable elevación, en el vuelo 3 (Zona de menor densidad).

Recomendaciones

Se recomienda seguir la metodología propuesta en cuanto a LIDAR aerotransportado en UAV con fines cartográficos, considerando: los parámetros técnicos internos del sensor, la obtención de archivos separados propios de LIDAR, la resolución del modelo digital que se quiere obtener, la memoria RAM del equipo a utilizar y algo que no se menciona en la tesis, pero que es importante, la cantidad de personas detrás de un proceso de estos

Se tiene resultados preliminares enfocados a los equipos utilizados, se recomienda realizar más pruebas con otras aeronaves en función de las características de las mismas y el sensor, probar con diferente altura de vuelo, aumentar la velocidad a 5m/s o 6 m/s, modificar el FOV, realizar pruebas con menos traslape, para contrastar si mejoran las condiciones y el tiempo de vuelo; por ejemplo, haciendo uso de equipos no tripulados que sigan la trayectoria del terreno. Manejar el criterio de densificación, en que tanto se debe reducir la nube de puntos y si es factible hacerlo; a su vez el proceso de clasificación encontrarse bien fragmentado por líneas de vuelo para tener en claro los solapes ya que estos tendrán información duplicada e innecesaria, o a su vez que una pasada contenga información que la otra no y se complementen.

Con respecto al control de calidad, la recomendación va a orientada en primer lugar en infraestructura es necesario contar con mínimo 20 puntos de control, que a su vez permitan identificar al menos 3 de los vértices de la figura que se plantea evaluar, estos puntos deben estar bien distribuidos en toda el área, la seguridad de equipo y el personal. Para finalizar, antes de cualquier proyecto realizar una prueba de calibración para el sensor o también el detalle de que se realizó este proceso previamente; este contraste de lo puede realizar con otro sensor o vuelos posteriores al inicio de proyecto.

Finalmente, para la información obtenida, a futuro se podrían evaluar los componentes internos, con el uso de los datos LIDAR separados por líneas de vuelo y puntos de chequeo de la misma nube, enfocado en la sección de los traslapes, para conocer el error interno del sensor, sobre todo en la variable altura, ya que es la clave en LIDAR y como se presenta en la investigación es donde existe mayor desplazamiento, y se presenta que más que criterios de vuelo este error puede estar ubicado en un aspecto mecánico del sensor.

CAPITULO VI

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J. N. (2017). *Definición de Indicadores de calidad en el proceso de generación de Imágenes Ortorectificadas a partir de sensores remotos de media resolución* (Vol. 4). Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Acosta, M. H. (2011). Aprobación Operacional de vuelo para un UAS [Universidad Politecnica de Catalunya]. In *Universidad Politecnica de Catalunya*. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/12465/memoria.pdf?sequence=1>
- Albacete, A. S. J. (2011). *Facultad de Geografía e Historia Procesamiento de datos LiDAR con ArcGIS Desktop 10*.
- American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. (2013). LAS SPECIFICATION VERSION 1.4 – R13. In *The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing* (Vol. 30, Issue 231, pp. 45–47). <https://doi.org/10.1179/sre.1989.30.231.45>
- American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. (2014). *ASPRS Positional Accuracy Standards for Digital Geospatial Data*. 81, 1–26. <https://doi.org/10.14358/PERS.81.3.A1-A26>
- American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. (2019). LAS Specification 1.4 - R15. *The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing, July 2019*. <https://www.asprs.org/divisions-committees/lidar-division/laser-las-file-format-exchange-activities>
- Arbeck. (2015). *Archivo: La diferencia entre el modelo de superficie digital (DSM) y los modelos de terreno digital (DTM) cuando se habla de modelos de elevación digital*

(DEM) [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_difference_between_Digital_Surface_Model_\(DSM\)_and_Digital_Terrain_Models_\(DTM\)_when_talking_about_Digital_Elevation_models_\(DEM\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_difference_between_Digital_Surface_Model_(DSM)_and_Digital_Terrain_Models_(DTM)_when_talking_about_Digital_Elevation_models_(DEM).svg)

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_difference_between_Digital_Surface_Model_\(DSM\)_and_Digital_Terrain_Models_\(DTM\)_when_talking_about_Digital_Elevation_models_\(DEM\).svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:The_difference_between_Digital_Surface_Model_(DSM)_and_Digital_Terrain_Models_(DTM)_when_talking_about_Digital_Elevation_models_(DEM).svg)

Ariza, F. J., Xavier, E., Chicaiza, E., & Buenaño, X. (2017). Métodos de evaluación de la calidad posicional en Hispanoamérica: análisis de la situación. *Revista Cartográfica*, 94, 89–109. <https://doi.org/10.35424/rcarto.v0i94.342>

Arranz, J. J. (2013). *Diseño, optimización y análisis de sistemas basados en técnicas láser, para el modelado geométrico, registro y documentación, aplicados a entidades de interés patrimonial*. Universidad Politécnica de Madrid.

Balaguer, M. (2019). Conceptos básicos. *Fotogrametría de Objeto Cercano. Conceptos Básicos*, 3–22. <https://doi.org/10.2307/j.ctvh9w0ht.4>

Baltsavias, E. P. (1999). A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 54(2–3), 83–94. [https://doi.org/10.1016/S0924-2716\(99\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0924-2716(99)00014-3)

Barragán, W. B., Escobar, L. K., & García, L. (2017). Obtención de parámetros óptimos en la clasificación de nubes de puntos LiDAR, a partir de sensores aerotransportados. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 14, 9. <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.1280>

Barrientos, A., Del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Grupo de Robótica y Cibernética, Universidad Politécnica de Madrid*, 1–29.

Berné, J. L., Anquela, A. B., & Garrido, N. (2014). GNSS GPS: fundamentos y

aplicaciones en Geomática. In *Duke Law Journal* (Vol. 1, Issue 1).
<https://ebookcentral.proquest.com/lib/bibliouansp/reader.action?docID=3228085&pg=1>

Campoverde, R., & Satián, D. (2015). *Generación de Cartografía Catastral rural a partir de datos LIDAR, cantón Otavalo* [Universidad de las Fuerzas Armadas- ESPE].
repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/12063/5/T-ESPE-049354.pdf

Castaño, S., Reyes, J., & Vela, A. (1996). La Teledetección sus bases. *Revista de La Facultad de Educación de Albacete*, 183–194.

Chuquitarco, A. (2018). *ANÁLISIS DE LOS MÉTODOS DE AEROTRIANGULACIÓN Y NÚMERO DE PUNTOS DE CONTROL SOBRE LA CALIDAD DE LAS ORTOFOTOS CON ERDAS LPS CORE Y ORIMA*. Universidad de las Fuerzas Armadas “ESPE.”

Chuvieco, E. (2008). *TELEDETECCIÓN AMBIENTAL La observación de la Tierra desde el Espacio* (3° edición).

Civco, D., Kiefer, R., & Maclean, A. (1993). La enseñanza de la teledetección en las actividades de la American Society for Photogrammetry and Remote Sensing. *Serie Geográfica*, 2(2), 39–50.

Crespo, M., & Manso, M. I. (2014). *Control De Calidad Del Vuelo Lidar Utilizado Para La Modelización 3D De Las Fallas De Alhama (Murcia) Y Carboneras (Almería)* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID]. <http://oa.upm.es/33673/>

DJI. (2018). *MATRICE 600 PRO Manual de usuario*. <http://www.dji.com/matrice600-pro%0ASi>

Doddi, A. (n.d.). Vertical Take-off and Landing (VTOL). *American Institute of Aeronautics and Astronautics*, 1–8.

https://www.colorado.edu/faculty/kantha/sites/default/files/attached-files/158128-154174_-_abhiram_doddi_-_dec_13_2016_228_pm_-_doddi_report.pdf

Duque, J. (2015). *Comparación Estadística de Métodos Interpolación Determinísticos y Estocásticos para la generación de Modelos Digitales del Terreno a partir de datos LIDAR, en la parroquia de Tumbabiro, cantón San Miguel de Urucuquí, provincia de Imbabura*. San Francisco de Quitp.

EcuRed. (2019). *TightVNC*. Información de «TightVNC Server». <https://www.tightvnc.com/>

Fagua, J., Campo, A., & Posada, E. (2011). Desarrollo de dos metodologías para la generación de modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS) empleando datos LiDAR y programas de licencia libre. *Revista de Tecnologías Geoespaciales Al Servicio Del Desarrollo Territorial, Análisis G*, 85–95.

Fontal, B., Suárez, T., Reyes, M., Bellandi, F., Contreras, R., & Romero, I. (2015). *El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones* (ESCUELA VENEZOLANA PARA LA ENSEÑANZA DE LA QUIMICA (ed.)). https://recursos.salonesvirtuales.com/wp-content/uploads/bloques/2012/07/espectro_electromagnetico.pdf

Galarza, M. (2014). Control de calidad de datos LIDAR aerotransportado en la zona austral del Ecuador. *Departamento de Posgrados*, 55. <http://dspace.uazuay.edu.ec/bitstream/datos/4027/1/10626.pdf>

GEODETICS. (2018). *Geodetics User Manual* (Issue 858).

Global Mapper. (2020). *GLOBAL MAPPER EN COLOMBIA*.

González Alcaraz, D. P. (2010). *Levantamiento Mediante Gps de una red de puntos establecidos para correlacionar los distintos espacios de la universidad en el mismo*

sistema de coordenadas [Universidad Politécnica de Cartagena].
<https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/4651/pfc5890.pdf>

- Harrap, R., & Lato, M. (2006). An Overview of LIDAR for Urban Applications. *Earth*.
- Herrera, M., Porras, L., & Estrella, C. (2019). Propuesta De Declaración Del Espectro Electromagnético Para Ecuador. *Revista Geoespacial*, 15(1), 15.
<https://doi.org/10.24133/geoespacial.v15i1.1356>
- Hetherington, D. (2009). Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing. In J. Shan & C. Toht (Eds.), *International Journal of Remote Sensing* (Vol. 31, Issue 12).
<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431160903112612>
- Ibañez, E. (2008). *Validación de Modelos Digitales de Terreno de Precisión a partir de Datos Láser Escáner aerotransportado; aplicación a la Marisma de Parque Nacional de Doñana*. Universidad Politécnica de Cataluña.
- INGEOEXPERT. (2020). Módulo 2 -Topografía de grandes extensiones. *Curso de Levantamientos Topográficos Con Captura Masiva de Datos*, 6–10, 60.
- Instituto Geográfico Nacional y Centro Nacional de Información Geográfica. (2014a). *Especificaciones Técnicas para la realización del vuelo lidar que permita la obtención de información altimétrica en el ámbito de Castilla y León SW* (pp. 1–9).
- Instituto Geográfico Nacional y Centro Nacional de Información Geográfica. (2016). *Especificaciones Técnicas Generales de levantamiento de información mediante SENSOR LIDAR*.
- Instituto Geográfico Nacional y Centro Nacional de Información Geográfica. (2014b). Teoría. In Licencia de Creative Commons (Ed.), *Curso de teledetección*,

fotogrametría, lidar y ocupación del suelo (pp. 1–14).

Jin, S. (2010). Ciudad 3D a partir de los datos LiDAR y la Ortofoto. In *Proyecto Fin de Máster*. Universidad de Salamanca.

Lin, Y., Hyypä, J., & Jaakkola, A. (2011). Mini-UAV-borne LIDAR for fine-scale mapping. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 426–430. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2010.2079913>

Liu, X. (2011). Accuracy assessment of lidar elevation data using survey marks. *Survey Review*, 43(319), 80–93. <https://doi.org/10.1179/003962611X12894696204704>

Mariño, J. (2019). IMPORTANCIA DE LOS SISTEMAS DE AERONAVE NO TRIPULADA “UAS”, EN LA CLASIFICACIÓN DE COBERTURAS DEL SUELO, VARIABLE FUNDAMENTAL UTILIZADA EN LOS AVALÚOS RURALES EN EL MUNICIPIO DE TENA – CUNDINAMARCA. . En *Universidad Santo Tomas*. <https://repository.usta.edu.co/bitstream/handle/11634/21429/2019jesusmarino.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Martínez Blanco, M. (2016). Evaluación y propuesta de metodologías de clasificación a partir del procesado combinado de datos LiDAR e imágenes aéreas georreferenciadas. En *Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría*. Universidad de Cantabria.

McGaughey, R. J. (2018). *FUSION / LDV: Software for LIDAR Data Analysis and Visualization*. (p. 123). http://forsys.cfr.washington.edu/Software/FUSION/FUSION_manual.pdf

Melin, M., Shapiro, A. C., & Glover-Kapfer, P. (2017). LIDAR for ecology and conservation. *WWF Conservation Technology Series*, 1(3), 40.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.22352.76801>

Molina, P. X. (2016). *Geografía del carbono en alta resolución en bosque tropical Amazónico del Ecuador mediante sensores aerotransportados* [Universidad Politécnica de Madrid]. file:///C:/Users/GI1/Documents/Downloads/T-SENESCYT-01315.pdf

Oromí, P., & Quintero, I. (2019). Drones panorama actual y aplicaciones a la ingeniería civil. *Revista Del Colegio de Ingenieros Técnicos de Obras Públicas e Ingenieros Civiles, Drones*, 16–25. <https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/ctpmmedia/publicaciones/Cimbra414/2/index.html>

Pardo, J. (2016). Implementación de un sistema de comunicación inalámbrico entre un UAV/RPA con su estación terrena para la transmisión de Imágenes térmicas entiendo Real y su utilización en el control de Incendios. [Pontificia Universidad Católica del Ecuador]. I En *Maestría en Redes de comunicación*. [http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12152/Caso de Estudio Jorge Pardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.puce.edu.ec/bitstream/handle/22000/12152/Caso%20de%20Estudio%20Jorge%20Pardo.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Pc, F. (2018). *ArcGeek*. Diferencias Entre Un DSM, DEM & DTM. <https://acolita.com/diferencias-dsm-dem-dtm/>

Péter, R., János, T., Gábor, N., Attila, N., Tünde, F., & Tamás, J. (2012). *A 3D lézerszkenner kertészeti alkalmazhatósága*. 12–15.

Real, E. A. (2011). *El Modelado Geomático del LIDAR: de la fusión SVM a la noción de Prosdetección* [CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN GEOGRAFÍA Y GEOMÁTICA “ING. JORGE L. TAMAYO”]. <https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/45/1/25-2011-Tesis-Real%0ASánchez%2C%0AEdson%0AArmando->

Maestro%0Aen%0AGeomática.pdf

- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). Uav Photogrammetry for Mapping and 3D Modeling – Current Status and Future Perspectives. *ISPRS - International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/(September), 25–31. <https://doi.org/10.5194/isprsarchives-xxxviii-1-c22-25-2011>
- Renslow, M., & ASPRS. (2012). *Manual of Airborne Topographic Lidar* (M. Bethesda & A. S. for P. R. Sensing (eds.); Libro impr). The Imaging and Geospatial Information Society. www.asprs.org
- Richards, J. A. (2013). Remote Sensing Digital Image Analysis. In *Remote Sensing Digital Image Analysis* (Fifth). <https://doi.org/10.1007/978-3-662-03978-6>
- RPAS Drones. (2020). Metodología de Trabajo para levantamiento LIDAR-Fotogramétrico mediante UAV de ala rotativa. *Obras Urbanas 77*, 42–47. <https://www.obrasurbanas.es/revistas/revista-obras-urbanas-77/>
- Ruano, M. (2008). *Primer Borrador de Control de Exactitud Posicional en Cartografía* (p. 16pp). http://www.geoportaligm.gob.ec/portal/?wpfb_dl=50
- Ruíz, P., Garro, J. F., & Soto, G. J. (2014). El uso de imágenes lidar en Costa Rica: Casos de estudio aplicados en geología, ingeniería, y arqueología. *Revista Geológica de América Central*, 51(1), 7–31. <https://doi.org/10.15517/rgac.v51i1.16849>
- Samberg, A. (2007). An Implementation of the ASPRS LAS Standard. *Iaprs*, XXXVI, 363–372. http://www.isprs.org/proceedings/XXXVI/3-W52/Final_papers/Samberg_2007.pdf
- Sellers, C., Corbelle, E., Buján, S., & Miranda, D. (2015). Morfología Interpretativa de alta

resolución con datos LIDAR en la cuenca del río Paute-Ecuador. *Universidad Verdad* 66, 66, 133–180.

Torres, G. (n.d.). Clasificación de nube de puntos LIDAR mediante software Global Mapper. *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*.

Trimble. (2006). *Software de oficina Trimble Business Center* (p. 4). https://geotronics.es/files/products/200/TBC_DS_2015_ESP_GSE.pdf

Trimble. (2017). *Sistema Trimble R8 GNSS*. https://instrumentalyoptica.com.ec/wp-content/uploads/2019/07/Trimble-R8s_ESP_2019-06-09-2017.pdf

Velodyne Acoustics INC. (2015). *Velodyne LiDAR PUCK™*.

Wallace, L., Lucieer, A., Watson, C., & Turner, D. (2012). Development of a UAV-LiDAR system with application to forest inventory. *Remote Sensing*, 4(6), 1519–1543. <https://doi.org/10.3390/rs4061519>

Zhilin, L., Zhu, Q., & Gold, C. (2005). *DIGITAL TERRAIN MODELING Principles and Methodology* (CRC Press (ed.)).

ANEXOS