

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



**GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE
TERRENO OBTENIDOS A TRAVÉS DE
LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS Y LIDAR
CON DRON GEORREFERENCIADO CON GNSS RTK Y
ASOCIADOS AL SISTEMA DE REFERENCIA
GEODÉSICO DE EL SALVADOR SIRGAS-ES2007**

PRESENTADO POR:

JOSUÉ SALVADOR CLAVEL QUIJADA

JAVIER ALBERTO MADRID GALDÁMEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO 2026.

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

M.Sc. JUAN ROSA QUINTANILLA

SECRETARIO GENERAL:

LIC. PEDRO ROSALÍO ESCOBAR CASTANEDA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

ING. LUIS SALVADOR BARRERA MANCÍA

SECRETARIO :

ARQ. RAÚL ALEXANDER FABIÁN ORELLANA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

M.Eng. Ing. CARLOS ALBERTO ESCOBAR FLORES

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

Trabajo de Grado Modalidad Trabajo de Investigación, previo a la opción
de:

INGENIERO CIVIL

Título :

**GENERACIÓN DE MODELOS DIGITALES DE
TERRENO OBTENIDOS A TRAVÉS DE
LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMÉTRICOS Y LIDAR
CON DRON GEORREFERENCIADO CON GNSS RTK Y
ASOCIADOS AL SISTEMA DE REFERENCIA
GEODÉSICO DE EL SALVADOR SIRGAS-ES2007**

Presentado por :

JOSUÉ SALVADOR CLAVEL QUIJADA

JAVIER ALBERTO MADRID GALDÁMEZ

Trabajo de Grado Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. WILFREDO AMAYA ZELAYA

San Salvador, Febrero 2026

Trabajo de Grado Aprobado por:

Docente Asesor :

ING. WILFREDO AMAYA ZELAYA

DEDICATORIA DE: JOSUÉ SALVADOR CLAVEL QUIJADA

En este momento quiero agradecer infinitamente a Dios Padre, Dios Hijo y Dios Espíritu Santo, que me han hecho culminar mis estudios superiores en la Universidad de El Salvador.

A lo largo de mi carrera he tenido muchas bajas, como ejemplo puedo mencionar mis fracasos en los exámenes a los que estuve a prueba en cada una de las materias. Recuerdo que mis primeras clases fueron difíciles de llevar, ya que muchas veces me quedaba sin asiento en las aulas en donde me impartían las materias, pues estas aulas se colapsaban de estudiantes queriendo tomar asiento; muchas veces no entendía los temas y las explicaciones que daban los ingenieros y no sabía ¿qué y cómo estudiar?, la mayor cantidad de veces no tenía amigos con quienes poder estudiar y me tocaba hacerlo solo sin saber que podría venir en cada examen que realizaba, es por ello que reprobé muchas asignaturas. De vez en cuando me encontraba con amigos en cada materia, pero no estudiábamos, sino que pasábamos el tiempo solo hablando entre nosotros sin abrir los libros para repasar los temas, si abríamos los libros solo estudiábamos poco o casi nada; pasaba perdiendo el tiempo haciendo cosas que no necesitaba, hasta que el tiempo pasó y me iba dando cuenta de mis errores. Al darme cuenta comencé a estudiar de manera disciplinada. A menudo los exámenes eran de aproximadamente 4 horas, en los que no sabía cómo iba resultar y muchas veces salía mal.

Con el paso del tiempo fui tomando conciencia de que no tenía que rendirme, por consiguiente, le tomaba dedicación a cada materia olvidando los errores que antes cometía. De esa manera iba aprobando las materias y saliendo del hoyo en el que me encontraba. Siempre había caídas, ya que a pesar de que tomaba empeño en pasar las materias, lo que estudiaba no era suficiente y algunas veces incluso volvía a reprobado; no obstante, seguía insistiendo en querer egresar de mi carrera. Cuando inscribía las últimas materias de mi Pensum, ya me sentía un poco más aliviado. Tenía muchas ganas de querer ser ingeniero de la mejor Universidad de El Salvador. Con el paso del tiempo me esforzaba cada vez más y más para que ese sueño se hiciera realidad.

En el momento de inscribir mi último ciclo sentí que fue un gran logro, ya que me acercaba más a mi objetivo. Le dediqué tiempo y esfuerzo a cada una de estas materias, aunque cabe mencionar que en esos momentos yo me encontraba laborando, pero a pesar de ello siempre mi prioridad fue mis estudios. De esta forma pude aprobar mis últimas materias y salir victorioso de cada una de ellas. Acepto que muchas veces quise arrojar la toalla, pensaba que la ingeniería no era para mí, pues me exigía demasiado.

Todo el esfuerzo realizado fue gracias a Dios que me dio la mano en cada momento de mi vida, sin olvidarme como fiel católico que soy de la virgen María, ya que yo creo que es la madre de Dios y asumió el reto de llevar en su seno al salvador de la humanidad, así es como quise también proponerme lograr ese reto en mi vida.

No puedo terminar mis agradecimientos sin mencionar a mis padres que siempre estuvieron pendientes de mí y de mis estudios. Mi padre Sabas Clavel Fuentes, fue el motor que me impulsó a iniciar todo este proceso académico en todos los aspectos; A mi madre Ana Margarita Quijada de Clavel que fue la que me llevaba en sus oraciones y que siempre estaba pendiente de mí; A mis hermanos que me hicieron sentir ese propósito de lograr mi objetivo académico, pues ellos pasaron por las mismas pruebas que yo en cada uno de los estudios que ellos realizaron en sus vidas. Tampoco quiero dejar de lado a mis amigos que me impulsaron a continuar, especialmente a mi amigo Baudilio Ceas Pérez que siempre me dio ánimos y fuerzas necesarias en los momentos más difíciles. Me ayudó a estudiar las materias más complicadas de la carrera y al que siempre le agradeceré por brindarme su amistad.

Sin más no dejo de agradecer infinitamente a Dios por toda esta experiencia que sin duda quedará grabada siempre en mi vida y en mi corazón.

DEDICATORIA DE: JAVIER ALBERTO MADRID GALDÁMEZ

Primeramente, dar gracias a Dios, ya que sin él nada podría ser posible, porque me ha permitido que llegue a donde estoy gracias a su infinita misericordia. En este mundo principalmente quisiera agradecer infinitamente a mi madre Corina Dinora Galdámez por ser una inspiración y un ejemplo por seguir, para mí una mujer de admiración y de orgullo, pues si algo he aprendido de ella es que se puede lograr todo lo que uno se proponga sin importar las dificultades que se presenten en la vida, para mí ella es símbolo de fortaleza y una de las personas más importantes en mi vida a quien le dedico este logro.

A todos mis familiares en general que han aportado por poco o mucho ya sea moral y/o económico para que pueda lograr culminar este logro universitario, dado que a pesar de que hubo días difíciles siempre estuvieron motivándome para seguir adelante. Así mismo a esas amistades y compañeros únicos y representativos que estuvieron mano a mano para aportar ese grano de arena necesario para seguir, hasta llegar a la meta.

Desde que empecé mi carrera universitaria fue un poco difícil, debido a que como muchos de mis compañeros debía trasladarme desde el lugar de habitación hasta la Universidad y el tiempo de llegada en ocasiones era hasta de 3 horas o más, dependiendo del tráfico y a veces uno no llegaba a realizar a tiempo las evaluaciones, dado que algunas clases se tenían que empezar muy temprano por la mañana o muy tarde por la noche. Por eso mismo quiero agradecer a todos esos docentes que comprendieron la situación y de alguna u otra manera nos

apoyaron para poder resolver este tipo de inconvenientes, sus consejos que nunca faltaron para prepararnos para el mañana. En general agradezco a todos ellos que nos han transmitido esos conocimientos invaluable para forjarnos cómo excelentes profesionales.

Me gustaría mencionar a Lizeth Estefany Flores Jiménez, mi pareja, que desde que empecé este largo proyecto de formación profesional siempre ha estado a mi lado colaborando en todo lo posible, es por eso que quiero agradecerle porque a pesar de las dificultades entre el estudio y lo laboral siempre estuvo mano a mano apoyándome para seguir adelante, ella es la madre de mis hijos, los cuales se han convertido en mi motivación y lo más preciado de mi vida, ellos son mi razón de ser y a quienes les dedico este logro.

Por último, pero no menos importante me gustaría mencionar a nuestro docente asesor el ingeniero Wilfredo Amaya, por habernos apoyado en todo el proceso de este trabajo de graduación reconociendo el compromiso que demuestra como docente y la entrega hacia sus alumnos, utilizando el equipo de su propiedad con fines educativos. Además de lograr haber contactado al Ingeniero José Bonilla, Gerente de la Empresa Topcom S.A de C.V. con quien también nos sentimos agradecidos por permitirnos el acceso a la finca Lutecia, donde realizamos el levantamiento en campo de nuestro trabajo de grado y facilitándonos los datos LIDAR.

Me gustaría mencionar el nombre de muchos docentes, amigos, compañeros, familiares, que aportaron ese granito de arena, pero por la razón de no dejar a alguno fuera me despido de esta dedicatoria agradeciendo a Dios por poner a estas personas en mi camino.

ÍNDICE

DEDICATORIA DE: JOSUÉ SALVADOR CLAVEL QUIJADA.....	V
DEDICATORIA DE: JAVIER ALBERTO MADRID GALDÁMEZ.....	VIII
INTRODUCCIÓN.....	XXVII
1. CAPÍTULO I: GENERALIDADES.....	1
1.1. Antecedentes.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	3
1.3. Objetivos.....	4
1.3.1. Objetivo General:	4
1.3.2. Objetivos Específicos:	4
1.4. Alcances.....	5
1.5. Limitaciones.....	5
1.6. Justificación.....	6
2. CAPÍTULO II: SISTEMAS DE COORDENADAS	8
2.1. Fundamentos teóricos en geodesia.....	8
2.1.1. Teorías de Mitos sobre animales que sostenían la tierra	8
2.1.2. Teoría de la tierra como forma cúbica.....	12
2.1.3. Teoría de la tierra en forma plana	14
2.1.4. Teoría de la forma de la tierra como un cilindro	19

2.1.5.	Teoría de la forma de la tierra como una esfera	22
2.1.6.	Teoría de la tierra como un esferoide.....	30
2.1.7.	Forma de la tierra exacta (Geoide).....	33
2.2.	Coordenadas geográficas	36
2.2.1.	Antecedentes históricos	37
2.2.2.	Conceptos clave del sistema de coordenadas geográficas.....	38
2.2.3.	Posicionamiento	42
2.2.4.	Importancia	43
2.3.	Coordenadas planas	44
2.3.1.	Proyecciones cilíndricas.....	46
2.3.2.	Proyecciones cónicas:.....	48
2.3.3.	Proyecciones planas	49
2.3.4.	Proyecciones modificadas.....	49
3.	CAPÍTULO III: SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO	52
3.1.	Sistema de referencia global.	52
3.1.1.	Elipsoide WGS-84.....	52
3.1.2.	Datum WGS-84.....	56
3.2.	Sistema de referencia local.	58
3.2.1.	Elipsoide Clarke 1866	61

3.2.2.	Datum NAD27	63
3.2.3.	Sistema de referencia local moderno.....	67
3.2.4.	Elipsoide WGS-84/GRS80/SIRGAS-ES2007	70
3.2.4.1.	Elipsoide WGS84.....	70
3.2.4.2.	El elipsoide GRS80.....	73
3.2.4.3.	SIRGAS-ES2007	76
3.3.	DATUM WGS 84	79
3.3.1.	Proyección Cartográfica	81
3.3.2.	Cónica Conformal De Lambert.....	90
4.	CAPÍTULO IV. SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS)	93
4.1.	Sistema de Posicionamiento Global (GPS).....	95
4.2.	Sistema Global De Navegación Por Satélite (GLONASS).....	105
4.3.	Sistema europeo de radionavegación por satélite (GALILEO)	111
4.4.	Sistema De Navegación Por Satélite (BEIDOU).....	114
5.	CAPÍTULO V: FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA Y SISTEMA LIDAR.....	120
5.1.	Topografía	120
5.1.1.	Altimetría	125

5.1.2.	Planimetría	128
5.2.	La fotogrametría	129
5.2.1.	Historia de la fotogrametría	130
5.2.2.	Tipos de la fotogrametría	134
5.3.	LIDAR.....	135
6.	CAPÍTULO VI: DRONES.....	147
6.1.	Dron fotogramétrico.....	158
6.1.1.	Definición	158
6.1.2.	Partes de un dron.....	159
6.1.3.	Cámaras.....	163
6.1.4.	Sensores	169
6.1.5.	Especificaciones.....	174
6.1.6.	Tipos de dron	177
6.1.7.	RTK EN DRON.....	180
6.1.8.	Preparación de vuelo	181
6.1.9.	Puntos de control	184
6.1.10.	Intervenciones imprevistas.....	186
6.2.	Dron LIDAR	190
6.2.1.	Definición	190

6.2.2.	Partes de un dron.....	194
6.2.3.	Cámaras.....	197
6.2.4.	Sensores	202
6.2.5.	Especificaciones.....	207
6.2.6.	Tipos de dron	210
6.2.7.	RTK en dron.....	214
6.2.8.	Preparación de vuelo	218
6.2.9.	Puntos de control	225
6.2.10.	Intervenciones imprevistas.....	230
7.	CAPITULO 7 LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMETRICOS CON DRON .	237
7.1.	Levantamiento en campo	237
7.1.1.	Descripción y ubicación del lugar	237
7.1.2.	Pix4D Capture.....	238
7.1.3.	Preparación y configuración del equipo	240
7.1.4.	Recolección de información durante el vuelo.....	252
7.1.5.	Finalización y obtención de la toma de información.....	253
7.2.	Proceso de datos.....	259
7.2.1.	PIX4D MAPPER.....	259
7.2.2.	Creación de un nuevo proyecto	259

7.2.3.	Importación de la información obtenida en campo	260
7.2.4.	Definir el sistema geodésico	263
7.2.5.	Procesamiento del programa	267
7.2.6.	Creación de puntos de paso	271
7.2.7.	Georreferenciar con los puntos de control	275
7.2.8.	Obtención de la nube de puntos	278
7.2.9.	Orto mosaico.....	281
7.2.10.	Modelo Digital de Superficie (MDS)	284
7.2.11.	Modelo Digital de Elevación (MDT).....	285
7.2.12.	Clasificación de puntos y curvas de nivel en Global Mapper 26.0285	
8.	CAPÍTULO VIII: LEVANTAMIENTO CON SISTEMA LIDAR Y DRON.....	306
8.1.	Levantamiento en campo.	306
8.1.1.	Pix4D Capture o Pilot 2.....	306
8.1.2.	Preparación y configuración del equipo.	309
8.1.3.	Recolección de información durante el vuelo.....	314
8.1.4.	Finalización y obtención de la toma de información.....	315
8.2.	Procesamiento de la información obtenida en campo.	316
8.2.1.	Global Mapper.....	316
8.2.2.	Importación de la información obtenida en campo.....	318

8.2.3.	Definir el sistema geodésico	320
8.2.4.	Obtención de la nube de puntos	323
8.2.5.	Aplicación de colores a la nube de puntos	324
8.2.6.	Clasificación automática de la nube puntos.	330
8.2.7.	Clasificación manual de la nube puntos.	336
8.2.8.	Modelo Digital de Superficie (MDE)	339
8.2.9.	Modelo Digital de Elevación (MDS).....	351
8.2.10.	Curvas de nivel.....	355
8.3.	Análisis de resultados.....	356
9.	CAPÍTULO IX: ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO	358
9.1.	Comparación de levantamiento fotogramétrico vs LIDAR	358
9.2.	Comparativo De Modelos Digitales De Terreno.	361
10.	CAPÍTULO X CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	364
10.1.	CONCLUSIONES.....	364
10.2.	RECOMENDACIONES	366
	BIBLIOGRAFÍA.....	369
	Anexos.....	371

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Tierra sostenida por cuatro elefantes y una tortuga.....	9
Figura N° 2. Tierra sostenida por Atlas.....	10
Figura N° 3. La Tierra como forma cúbica.....	14
Figura N° 4. La Tierra en su forma plana.....	19
Figura N° 5. La Tierra en su forma cilíndrica.....	22
Figura N° 6. La Tierra en su forma esférica.....	24
Figura N° 7. Ruta de la expedición de Magallanes.....	30
Figura N° 8. Forma ovalada de la tierra.....	33
Figura N° 9. Forma GEOIDE de la tierra.....	36
Figura N° 10. Proyecciones ortográficas de la Tierra con las líneas de paralelos y meridianos.....	41
Figura N° 11. La relación entre sistema de coordenadas.....	43
Figura N° 12. Representación de tres proyecciones.....	45
Figura N° 13. Representación derivada de las proyecciones.....	45
Figura N° 14. Plano normal, transversal y oblicuo.....	46
Figura N° 15. Proyección transversal de Mercator.....	47
Figura N° 16. Zonas de longitud y latitud sistema UTM.....	48
Figura N° 17. Representación de la proyección cónica.....	48

Figura N° 18. Azimutal normal, azimutal transversal, azimutal oblicua.....	49
Figura N° 19. Representación de Homolosena de Goode.....	50
Figura N° 20. Representación Homolográfica de Mollweide.....	50
Figura N° 21. Representación de Mercator vs Peters.....	51
Figura N° 22. Representación del elipsoide WGS84.	55
Figura N° 23. Representación del Datum WGS84.....	58
Figura N° 24. Representación del Datum NAD27.....	63
Figura N° 25. Representación del Datum NAD27.....	67
Figura N° 26. Datum WGS 84.....	80
Figura N° 27. Proyección Cartográfica De La Tierra,.....	81
Figura N° 28. Tipos De Proyecciones.....	84
Figura N° 29. Proyección Cilíndrica	85
Figura N° 30. Proyección Cónica.....	86
Figura N° 31. Proyección Azimutal.	86
Figura N° 32. Geógrafo Gerardus Mercator.....	87
Figura N° 33. Proyección Cónica Conforme de Lambert	90
Figura N° 34. Paralelo Central.	91
Figura N° 35. Meridiano de Madrid	92
Figura N° 36. Sistema Global de Navegación por Satélite.....	93

Figura N° 37. Sistema de Posicionamiento Global	96
Figura N° 38. Satélites de GPS	100
Figura N° 39. Altitud de los Sistemas de GPS	103
Figura N° 40. Sistema GLONASS.....	107
Figura N° 41. Satélites Antípodas GLONASS.....	110
Figura N° 42. Sistema GALILEO.....	111
Figura N° 43. Sistema BEIDOU	114
Figura N° 44. Mediciones topográficas	120
Figura N° 45. Tipos de mediciones topográficas	122
Figura N° 46. Medición directa.....	123
Figura N° 47. Importancia de la topografía.	124
Figura N° 48. Altimetría.....	126
Figura N° 49. Planimetría.....	128
Figura N° 50. Curvas de nivel en fotogrametría	130
Figura N° 51. Coronel Francés Aimé Laussedat, Inventor de la Fotogrametría.	131
Figura N° 52. Fotos Aéreas.	132
Figura N° 53. Sistema LIDAR	135
Figura N° 54. Sistema LIDAR Aéreo.....	139

Figura N° 55. Sistema LIDAR Terrestre.....	140
Figura N° 56. Kettering Bug	149
Figura N° 57. Ryan Model 147.....	152
Figura N° 58. El Lockheed MQM-105 Aquila	154
Figura N° 59. Dron Moderno.....	157
Figura N° 60. Phantom 4 pro.	158
Figura N° 61. Partes de un Dron fotogramétrico.....	161
Figura N° 62. Cámaras RGB dji.....	164
Figura N° 63. Parrot Sequoia+.....	164
Figura N° 64. Ubicación de Finca Lutecia.....	237
Figura N° 65. Mapa Satelital de la Finca.....	238
Figura N° 66. Pix4D Capture	238
Figura N° 67. Colocación de estaciones para puntos de control.	241
Figura N° 68. Preparando el equipo para el vuelo	242
Figura N° 69. Dron Mavic 2 Pro	242
Figura N° 70. Colocando la Aero nave no tripulada en el suelo.....	248
Figura N° 71. Vinculación de control remoto con teléfono móvil.....	249
Figura N° 72. Opciones de Aero nave a utilizar	249
Figura N° 73. Opciones para el Área a sobre volar	250

Figura N° 74. Configuración para el vuelo fotogramétrico en pix4D Capture..	251
Figura N° 75. Encendido del Dron	252
Figura N° 76. Inicio del vuelo fotogramétrico	252
Figura N° 77. Recorrido del Vuelo Fotogramétrico	252
Figura N° 78. Descargando imágenes tomadas con el Dron	253
Figura N°. 79 Ensamblando el jalón con el colector.....	256
Figura N° 80. Configuración de la aplicación Nuwa	257
Figura N° 81. Toma de puntos de control PCF	258
Figura N° 82. Interfaz de Pix4 Mapper.....	259
Figura N° 83. Nuevo Proyecto	260
Figura N° 84. Selección de fotografías.	261
Figura N° 85. Carpeta de fotografías	261
Figura N° 86. Colocación de fotografías	262
Figura N° 87. Imágenes colocadas	262
Figura N° 88. Insertar el sistema de coordenadas geodésico.....	263
Figura N° 89. Seleccionando el sistema de coordenadas geodésico	264
Figura N° 90. Proyección Cartográfica, Sistema de coordenadas conocido...	264
Figura N° 91. SRG Colocado	265
Figura N° 92. Configuraciones previas realizadas	266

Figura N° 93. Sistema de referencia geodésico sirgas colocado en el software	267
Figura N° 94. Configuraciones iniciales	268
Figura N° 95. Inicio del Procesamiento del paso #1	268
Figura N° 96. Procesamiento inicial finalizado	269
Figura N° 97. Reporte de calidad del Procesamiento inicial	270
Figura N° 98. Nube de puntos dispersa	271
Figura N° 99. Colocación de puntos de paso.....	272
Figura N° 100. Verificando colocación de puntos de paso.....	272
Figura N°101. Primer punto de paso colocado	273
Figura N° 102. Puntos de paso colocados en la nube de puntos dispersa.....	274
Figura N° 103. Opciones de Proyecto.....	275
Figura N° 104. Importando puntos de apoyo	276
Figura N° 105. Carpeta con los puntos de paso obtenidos en campo	277
Figura N° 106. Georreferenciar el proyecto	277
Figura N° 107. Puntos de control colocados en la nube dispersa.....	278
Figura N° 108. Configuración para nube de puntos	279
Figura N° 109. Configuración de Malla 3D con textura	279
Figura N° 110. Inicio del procesamiento del Paso N°2	280

Figura N° 111. Nube de puntos densa.....	281
Figura N° 112. Opciones de procesamiento	282
Figura N° 113. Opciones de procesamiento	282
Figura N° 114. Inicio del paso N°3.....	283
Figura N° 115. Orto mosaico	284
Figura N° 116. Modelo digital de superficie.	284
Figura N° 117. Modelo digital de terreno	285
Figura N° 118. Global Mapper 26.0	286
Figura N° 119. Nube de puntos Densa	286
Figura N° 120. Nube de puntos densa en la opción de color by Elevation	287
Figura N° 121. Configuración de puntos de ruido	288
Figura N° 122. Clasificación de puntos de ruido	289
Figura N° 123. Clasificación de Puntos de suelo	290
Figura N° 124. Clasificación de puntos de suelo	291
Figura N° 125. Clasificación de nube de puntos	292
Figura N° 126. Clasificación de puntos manual	292
Figura N° 127. Nube de puntos clasificada automática y manualmente	293
Figura N° 128. Conexión con los servidores.....	294
Figura N° 129. Chequeando georreferenciación de nuestro proyecto.	295

Figura N° 130. perfectamente georreferenciada	295
Figura N° 131. Obteniendo el Modelo Digital de Superficie y de Terreno	296
Figura N° 132. Obteniendo el Modelo digital de Superficie.....	297
Figura N° 133. Modelo Digital De Superficie.....	297
Figura N° 134. Modelo Digital De Terreno	298
Figura N° 135. Conexión con datos en línea	299
Figura N° 136. Seleccionando fuentes populares	299
Figura N° 137. Conectando con datos en línea	299
Figura N° 138. ASTER GDEM	300
Figura N° 139. Exportación a un nuevo archivo.....	301
Figura N° 140. Opción de modelado a utilizar	302
Figura N° 141. Selección del ASTER GDEM.....	302
Figura N° 142. Aceptando todos los parámetros a utilizar	302
Figura N° 143. Seleccionando área para el DEM	303
Figura N° 144. Ruta donde estará guardado el DEM.....	303
Figura N° 145. Creando curvas de nivel	304
Figura N°146. Curvas de nivel a 1 metro	305
Figura N° 147. Dron: DJI matrice 350 RTK y sensor LIDAR Dji Zenmuse L2	310
Figura 148. Dron: DJI matrice 350 RTK – Preparación de las hélices	312

Figura 149. Sensor LIDAR Dji Zenmuse – Colocación	313
Figura 150. Control de mando – selección de plan de vuelo.	314
Figura 151. Vista de control de mando durante el vuelo.....	315

INTRODUCCIÓN

En el siguiente trabajo se llevará a cabo un análisis comparativo a partir de modelos digitales de terrenos específicos que se obtendrán a través de levantamientos fotogramétricos y LIDAR utilizando Dron georreferenciado; esto nos permitirá la obtención de datos utilizando ambos métodos, ya que al hacer estos tipos de levantamientos encontramos terrenos demasiado obstruidos. Por lo tanto, es más factible utilizar esta técnica LIDAR para lograr obtener mediciones más precisas, debido a que este logra determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz láser pulsado. Todo esto lo haremos para poder determinar las facilidades de utilizar esta técnica de medición LIDAR, con el propósito de utilizar métodos innovadores para medición de áreas de terreno, ya que, los métodos anteriormente utilizados han quedado desfasados y por lo mismo puede llevarnos a cometer errores de medición. Utilizando esta técnica podemos obtener mediciones más precisas a la hora de realizar levantamientos fotogramétricos. La idea es mejorar e impulsar a las futuras generaciones a manejar estos sistemas de medición en todo el país.

Es por ello por lo que, hablaremos sobre cómo surgió la idea de construir estos sistemas de medición, dado que, en topografía la medición de distancias con láser para aplicaciones de mapas está revolucionando la toma de datos digitales relativos a la elevación de terrenos. Como sabremos los sistemas LIDAR registran datos de posición X, Y y de elevación en Z en intervalos predefinidos y

los datos obtenidos dan lugar a una red de puntos muy densa, típicamente a intervalos de 1 a 3 metros.

Por lo anteriormente dicho se hará el uso de estos equipos sofisticados para poder así desarrollar el análisis de los puntos que se tomarán, incluidos los temas y enfoques a la historia de estos equipos de medición, el uso correcto de los aparatos y la importancia del cuidado de los mismos, ya que al ser un sistema nuevo de medición geográfica en el país surgen muchas interrogantes de manipulación de estos aparatos para el proceso de tomas de mediciones. Es por ello que presentamos el enfoque principal de nuestro estudio, así como la metodología que desarrollaremos para esta investigación.

CAPÍTULO I: GENERALIDADES

1.1. Antecedentes

En los últimos años, los avances tecnológicos en materia de la Fotogrametría y Topografía han tenido un gran auge y desarrollo que ahora es posible realizar mediciones de esta índole con vehículos aéreos no tripulados conocidos como drones, usando tecnología fotogramétrica y LIDAR para estas disciplinas.

Desde la aparición de la fotogrametría entre los años 1850 y 1900 a la que se le llamó fotogrametría terrestre, hasta la invención del avión, en la primera guerra mundial cuando la fotografía aérea alcanzó su máximo reconocimiento.

El último gran auge de la fotogrametría surgió con la llegada de la informática y los avances tecnológicos dando paso primero a la fotogrametría analítica y después a la digital.

Gracias a ellos se ha podido montar cámaras fotográficas digitales, con gran calidad y precisión, sobre drones para obtener imágenes perfectas y sin errores.

Además, esta tecnología permite acceder a terrenos de difícil acceso, aporta más agilidad y rapidez en la toma de datos, así como una alta precisión y permite resolver los problemas que pueden aparecer.

Todos esos avances han permitido que la fotogrametría amplíe su ámbito de actuación. Desde su aparición, la principal aplicación ha sido la generación de mapas topográficos y planos.

En la actualidad también se utiliza en arqueología y documentación del patrimonio cultural, arquitectura, planeamiento y ordenación del territorio, medio ambiente y también en campos como la investigación policial, la medicina, etc.

Por otra parte, la tecnología LIDAR (Light Detection and Ranging /Detección de luz y rango), por sus siglas en inglés emplean pulsos láser para escanear el entorno y generar modelos tridimensionales detallados.

Esta tecnología permite capturar datos de manera rápida y eficiente, lo que reduce significativamente tanto el tiempo de levantamiento como el tiempo de procesamiento posterior. Además, la precisión de los datos obtenidos es excepcional.

Esta capacidad de capturar datos tridimensionales precisos y de alta resolución hace que los sistemas LIDAR sean invaluable en una amplia gama de aplicaciones, desde la topografía y la cartografía hasta la planificación urbana y la gestión de recursos naturales.

El prototipo LIDAR fue construido en 1961 por Hughes Aircraft Company. La empresa también había construido el primer láser un año antes. Los sistemas

LIDAR y sus usos realmente se dieron a conocer durante la misión Apolo 15 de 1971, que lo utilizó para cartografiar la Luna. Después, los usos científicos de LIDAR continuaron evolucionando. La investigación científica en universidades como Stuttgart en Alemania ha demostrado la precisión y evolución de este sistema.

1.2. Planteamiento del problema

Para los profesionales de la topografía y la cartografía, el LIDAR y la fotogrametría han sido durante mucho tiempo herramientas o tecnologías; que, aunque complejas, muy utilizadas.

Con el reciente aparecimiento de los drones, la forma de capturar los datos está revolucionando, de tal manera que los avances en esta tecnología prometen un abanico versátil en sus aplicaciones. Sin embargo; analizaremos las ventajas y desventajas de estos métodos, al ser aplicados y sometidos a la prueba in situ, para la generación de modelos digitales de terreno y otros productos cartográficos; atendiendo a las características del proyecto y precisiones esperadas.

No se trata de valorar uno en detrimento del otro, ambos parecen prometer eficacia, la decisión en la decantación correcta por uno o ambos, dependerá de la tarea específica que se realice, de las habilidades del operador en cuestión y, como siempre, del presupuesto con el que se trabaje.

Es por ello que, nuestro enfoque será analizar la mejor opción que tendríamos en cuanto a estos sistemas que son desconocidos para nuestra investigación, por lo cual podríamos determinar cuál sistema nos permite un mejor resultado en nuestra investigación que llevaremos a cabo y con ello poder determinar y decidir el mejor camino a seguir para los mejores resultados que queremos conseguir.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General:

Generar, analizar y utilizar los modelos digitales de terreno obtenidos a través de levantamientos fotogramétricos y LIDAR con dron, georreferenciado con GNSS RTK y asociado al sistema de referencia geodésico de El Salvador SIRGAS-ES2007.

1.3.2. Objetivos Específicos:

- Planificar el área de terreno de cubrimiento de cada vuelo, dependiendo de la tecnología empleada.
- Establecer especificaciones técnicas en el plan de vuelo con el dron en cada tecnología.
- Evaluar el tipo de datos recolectados en cada vuelo, para la elección correcta del software y hardware para su procesamiento.
- Evaluar la precisión alcanzada en la información procesada por medio de la fotogrametría y LIDAR mediante la comparación de productos cartográficos generados a partir de los modelos digitales de terreno.

- Analizar la eficiencia de cada tecnología en términos de tiempo y costo requeridos para un proyecto.
- Identificar ventajas y desventajas de cada tecnología en un proyecto en términos de accesibilidad, precisión y costos.

1.4. Alcances

- Identificar a través de levantamientos fotogramétricos y LIDAR y sus procesos respectivos las precisiones, tiempos, costos, accesibilidad, etc., entre una y la otra tecnología.
- Comparar e identificar ventajas y desventajas en base a lo antes mencionado y también a las diferentes condiciones a las que se aplique, ya sean estas ambientales o geográficas.
- Con base a lo generado después del procesamiento de la información, se harán recomendaciones sobre las mejores prácticas para implementar cada tecnología.
- Enfocar los procedimientos técnicos con base a especificaciones para lograr un rendimiento óptimo en los levantamientos y su procesamiento respectivo.

1.5. Limitaciones

- Las condiciones meteorológicas como el viento, la lluvia, la niebla, incluso la luz solar, ya que dependiendo de la intensidad de estas condiciones

pueden afectar y/o interferir a la hora de la toma de datos a la hora de la realización del levantamiento.

- Áreas cubiertas u obstáculos como edificios altos o árboles muy densos, podríamos clasificarlos como zonas complejas que afectarían el levantamiento fotogramétrico en la precisión, además del tiempo de vuelo de los drones ya que este último es limitado.
- Para el procesamiento de datos la cantidad de imágenes de alta resolución requiere una exigencia de capacidad alta en el equipo de computación para la realización de los modelos 3D y ortomosaicos lo que, a su vez, dependiendo de la cantidad de datos se tarda un tiempo demasiado considerable.
- Limitaciones legales y normativas pueden complicar el levantamiento en ciertas zonas sensibles donde restringe la privacidad y/o altura máxima permitida de lugares colindantes.
- Los costos de inversión en hardware, software y operarios cualificados son elevados.

1.6. Justificación

En el campo de la Ingeniería Civil se requiere tecnología que permita garantizar la optimización y mejoramiento de los procesos constructivos, utilizando para ello herramientas novedosas.

Un ejemplo muy particular son los vehículos aéreos no tripulados conocidos como drones, los cuales son dispositivos capaces de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, son amigables con el medio ambiente, versátiles que permiten llegar a sitios de difícil acceso o de seguridad.

En los levantamientos o vuelos con drones, la elección entre fotogrametría y LIDAR depende en gran medida de la aplicación exacta, teniendo en cuenta también los factores operativos como el costo y la complejidad.

La palabra clave entre estas tecnologías tiene que ver con las capacidades de cada uno y sus resultados, además del costo el cual es un factor determinante.

CAPÍTULO II: SISTEMAS DE COORDENADAS

2.1. Fundamentos teóricos en geodesia

2.1.1. Teorías de Mitos sobre animales que sostenían la tierra

La idea de que la Tierra está sostenida por elefantes sobre una tortuga que flota en el espacio proviene de la mitología hindú, específicamente de una parte del "Mahābhārata", un antiguo poema épico de la India. Esta visión cosmológica es parte de una tradición más amplia de mitos que describen el mundo en términos de seres y criaturas fantásticas.

En el "Mahābhārata", y en otros textos hindúes como el "Vishnu Purana", se habla de la tortuga (Kurma) que sostiene el universo, y sobre esta tortuga se encuentran varios elefantes. Cada uno de los elefantes sostiene una parte del mundo, lo que representa una cosmología en la que seres divinos y criaturas mitológicas juegan un rol en la estructura del cosmos.

Este tipo de cosmología, llena de figuras simbólicas, fue en su momento un modo de explicar lo inexplicable, utilizando seres poderosos para sostener y mantener el orden del universo.



Figura N° 1. Tierra sostenida por cuatro elefantes y una tortuga.

Fuente: [Escritor Pablo Capanna.](#)

Aunque esta idea que la tierra esta sostenida por animales, como elefantes y una tortuga, no es exclusiva de la tradición hindú; representaciones similares aparecen en otras culturas alrededor del mundo, aunque con variaciones en los detalles. Aquí hay ejemplos de países y culturas que tuvieron conceptos relacionados:

- **China (mitología china)**

En la mitología china, existe la creencia de que el mundo estaba sostenido por una tortuga gigante, tal leyenda se encuentra en textos como el Clásico de las Montañas y los Mares (Shan Hai Jing), cuya composición data del período entre el siglo IV a.C. y el siglo II d.C.

Las tradiciones asociadas con estas creencias probablemente existieron desde tiempos prehistóricos, adaptándose con el desarrollo de las primeras dinastías chinas.

Este concepto se asocia con el mito de la tortuga Ao, cuyo caparazón se usó para formar el cielo y la tierra tras una gran inundación.

- **Grecia antigua**

Los griegos no usaban la tortuga o elefantes, pero tenían una visión similar en términos de simbolismo. Según el mito de Atlas, un titán sostiene los cielos sobre sus hombros, lo cual refleja una idea de un soporte físico para el cosmos. La idea del titán Atlas proviene de la mitología griega arcaica, documentada por primera vez en el siglo VIII a.C. en la Teogonía de Hesíodo. Estas creencias probablemente se desarrollaron durante la Edad Oscura Griega (1100-800 a.C.) o antes.



Figura N° 2. Tierra sostenida por Atlas.

Fuente: www.reddit.com

- **Nativos Americanos**

En varias culturas de los pueblos indígenas de América del Norte, como los iroqueses y los lenape, existe el mito de la "Tierra sobre la tortuga". Según esta narrativa, la Gran Tortuga lleva la tierra sobre su caparazón, flotando en un vasto océano. Aunque no se puede fechar con precisión, estas narrativas podrían haber existido desde hace al menos 5,000 años, cuando comenzaron a formarse las primeras culturas agrícolas.

- **África**

En algunas tradiciones africanas, aunque no hay menciones específicas de elefantes o tortugas gigantes, existen cosmologías que describen animales como pilares fundamentales del mundo, reflejando una concepción similar de apoyo cósmico. Las tradiciones orales ancestrales que datan de períodos prehistóricos. Estas cosmovisiones se transmitieron antes de la llegada de las religiones abrahámicas y persistieron en regiones donde la religión tradicional africana era predominante (más de 3.000 años atrás).

- **Sudeste Asiático**

En varias culturas del sudeste asiático influenciadas por el hinduismo y el budismo, también se hace referencia a tortugas y otros animales en mitos cosmológicos, como parte del soporte del universo o del equilibrio cósmico, comenzando a difundirse en el sudeste asiático alrededor del siglo I a.C. y se

consolidaron entre los siglos IV y XII d.C., durante el auge de reinos como el Imperio Khmer o Srivijaya.

Estas ideas surgen principalmente en tiempos prehistóricos o en períodos antiguos (2000 a.C. en adelante), cuando las culturas usaban mitos para explicar el cosmos antes del desarrollo de la ciencia. Aunque las narrativas específicas varían según la región y se adaptaron a los contextos culturales y religiosos locales, estas creencias reflejan un intento temprano de comprender la estructura del cosmos mediante figuras conocidas en la naturaleza, como animales, que simbolizan estabilidad, fuerza y conexión con la tierra y el cielo.

2.1.2. Teoría de la tierra como forma cúbica

La idea de una Tierra cúbica es menos común en la historia de las cosmovisiones humanas, pero ha surgido ocasionalmente en contextos filosóficos, religiosos o especulativos. Aunque la mayoría de las culturas antiguas concebían la Tierra como plana, redonda o sobre animales, las teorías de una Tierra cúbica aparecen en ciertos momentos específicos:

- **Mesopotamia**

En algunas interpretaciones de las creencias de la antigua Mesopotamia, la Tierra era vista como una estructura sólida con forma rectangular o cúbica, rodeada por agua y cubierta por un cielo sólido.

Esto se relaciona con textos antiguos como la Epopeya de Gilgamesh (alrededor del 2000 a.C.) y las tablillas babilónicas, que describen un universo ordenado con

formas geométricas claras. Sin embargo, la idea de un "cubo" aquí es más una interpretación simbólica que un concepto preciso.

- **Grecia Antigua (Pitagóricos)**

Algunos filósofos pitagóricos, especialmente aquellos que exploraban las propiedades de los sólidos geométricos, especularon sobre la posibilidad de que la Tierra tuviera formas geométricas regulares, incluido el cubo, ya que el cubo era considerado un sólido perfecto en la filosofía griega, asociado con estabilidad y solidez.

Estas ideas se desarrollaron durante el siglo VI a.C., cuando filósofos como Pitágoras y sus seguidores reflexionaban sobre la geometría y su relación con el cosmos.

- **Textos Medievales Cristianos y Judíos**

En algunas interpretaciones medievales de la cosmología bíblica, se consideraba que la Tierra tenía límites angulares o un diseño rectangular, lo que ha llevado a especulaciones sobre una posible forma cúbica.

Estas ideas aparecen en comentarios religiosos entre los siglos VI y XIV d.C., aunque no eran generalizadas ni ampliamente aceptadas.

La tendencia de algunas culturas antiguas a relacionar el cosmos con formas geométricas simples fue parte de la evolución en el desarrollo histórico de la forma de la tierra, sin embargo, la idea de la Tierra cúbica nunca fue ampliamente

aceptada en ninguna cultura o periodo y quedó opacada por las concepciones esféricas o planas de la Tierra, que eran más comunes y consistentes con las observaciones empíricas.

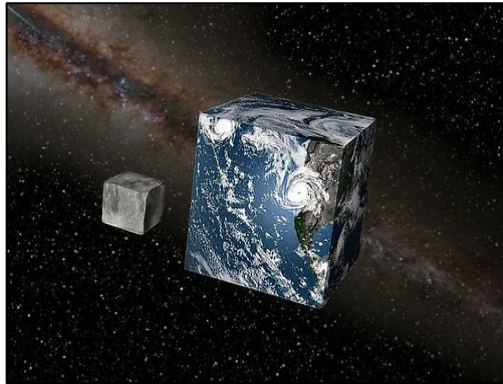


Figura N° 3. La Tierra como forma cúbica.

Fuente: maikelnai.naukas.com

2.1.3. Teoría de la tierra en forma plana

La idea de que la Tierra es plana es una de las creencias cosmológicas más antiguas y comunes en la historia de la humanidad, desarrollada en diferentes culturas antes de que los avances en la ciencia confirmaran su forma esférica. Las épocas y culturas en las que predominó esta teoría:

Culturas Antiguas:

- **Mesopotamia y Egipto (alrededor del 3000 a.C.)**

En estas civilizaciones, la Tierra se concebía como un disco plano rodeado por un océano.

Los cielos eran representados como una cúpula que cubría la Tierra, con dioses o astros moviéndose sobre ella.

- **India Antigua (Vedas, 1500-500 a.C.)**

En los primeros textos védicos, la Tierra también se describe como plana, aunque con el tiempo, la cosmología hindú adoptó representaciones más complejas.

- **China Antigua**

Hasta aproximadamente el siglo XVII, en la cosmología china se representaba la Tierra como un plano cuadrado (terrestre) bajo un cielo hemisférico.

- **Grecia Antigua**

Homero y Hesíodo (Siglo VIII a.C.)

En las obras de Homero y Hesíodo, se describe la Tierra como un disco plano flotando en el océano.

Esta visión se basaba en las observaciones básicas y la tradición oral.

- **Filósofos griegos tempranos**

Filósofos como Anaximandro y Anaxímenes (siglo VI a.C.) también pensaron en una Tierra plana, pero con diferentes estructuras.

Por ejemplo, Anaximandro la consideraba como un tambor suspendido en el aire.

- **Edad Media (Europa y otras regiones)**

Durante la Edad Media, la creencia en una Tierra plana persistió en algunos contextos, especialmente en regiones influenciadas por ideas religiosas:

En la Europa cristiana, aunque la mayoría de los estudiosos aceptaban la esfericidad de la Tierra (heredada de la astronomía griega, como la de Ptolomeo), ciertas interpretaciones bíblicas llevaron a algunos a imaginarla plana.

Algunas culturas islámicas tempranas también consideraron la Tierra plana antes de adoptar cosmologías más precisas.

Tales de Mileto (624 a.C. - 547 a.C.), uno de los primeros filósofos presocráticos y considerado el padre de la filosofía griega, también tuvo ideas relacionadas con la forma de la Tierra, aunque sus conceptos eran muy primitivos en comparación con los desarrollos posteriores.

Ideas de Tales sobre la Tierra:

- **Forma de la Tierra**

Tales creía que la Tierra era plana y flotaba sobre un cuerpo de agua. Esta concepción se basaba en su observación de que el agua era fundamental para la vida y posiblemente también para el soporte de la Tierra.

Imaginaba la Tierra como un disco flotando sobre un vasto océano primordial. Esta idea se alineaba con las cosmovisiones babilónicas y egipcias de su tiempo.

- **Agua como principio fundamental (arché):**

Tales sostenía que el agua era la sustancia primordial de la que se originaba todo. Según él, todo lo existente tenía su base en el agua, lo que también influía en su visión de la Tierra como flotante sobre este elemento.

- **Influencia cultural:**

Sus ideas reflejaban la influencia de las culturas mesopotámicas y egipcias, con las cuales los jonios (su región de origen) tenían contacto a través del comercio y la transmisión de conocimientos.

- **Relevancia de su teoría**

Aunque la idea de una Tierra plana era común en su época, Tales marcó un avance significativo al intentar explicar el cosmos basándose en principios naturales, en lugar de atribuirlo exclusivamente a deidades o mitos. Su enfoque racional influyó en los filósofos posteriores, incluso si sus ideas sobre la forma de la Tierra eran incorrectas.

Tales de Mileto defendió la idea de una Tierra plana como un disco flotante sobre agua, lo que refleja el pensamiento cosmológico de su época. Sin embargo, su importancia radica en su enfoque racional y naturalista, que sentó las bases para el pensamiento filosófico y científico.

- **Resurgimiento moderno de la teoría de la tierra plana**

Siglo XIX:

En 1849, Samuel Rowbotham publicó el libro "Zetetic Astronomy", defendiendo que la Tierra era plana, basándose en interpretaciones erróneas y pseudociencia.

Esta idea dio origen a movimientos modernos como la Flat Earth Society (Sociedad de la Tierra Plana) en el siglo XX.

Siglo XXI:

En la actualidad, aunque las evidencias científicas demuestran que la Tierra es un esferoide, el movimiento de la Tierra plana ha resurgido en redes sociales, mezclado con teorías conspirativas.

Razones detrás de la teoría:

- ❖ **Observación limitada:** Sin conocimientos de astronomía, el horizonte parecía plano, lo que daba la impresión de una superficie plana.
- ❖ **Interpretaciones religiosas:** Textos sagrados en varias culturas ofrecían imágenes simbólicas que a menudo eran interpretadas literalmente.
- ❖ **Falta de exploración:** Antes de los viajes marítimos y la astronomía avanzada, no había evidencia tangible de la curvatura de la Tierra.



Figura N° 4. La Tierra en su forma plana.

Fuente: www.istockphoto.com

2.1.4. Teoría de la forma de la tierra como un cilindro

Anaximandro de Mileto (610 a.C. - 546 a.C.), filósofo presocrático y discípulo de Tales, desarrolló una cosmología innovadora para su tiempo al proponer que la Tierra no era plana, como se pensaba tradicionalmente, sino cilíndrica.

Teoría de la Tierra cilíndrica de Anaximandro

Forma de la Tierra:

Según Anaximandro, la Tierra tenía forma de un cilindro, con una relación aproximada de 3:1 entre su diámetro y su altura.

La superficie en la que vivimos estaría situada sobre una de las caras planas del cilindro.

Ubicación de la Tierra en el cosmos:

Anaximandro afirmó que la Tierra se encontraba suspendida en el centro del universo, sin necesidad de soporte físico. Esto representó un cambio revolucionario respecto a la idea de que la Tierra estaba sostenida por agua, animales o pilares.

Argumentó que la Tierra permanecía inmóvil debido a su equidistancia de todos los puntos del cosmos, lo que anulaba cualquier tendencia a moverse hacia un lado u otro.

Explicación de fenómenos celestes:

Describió el universo como compuesto por esferas concéntricas que contenían los astros, incluyendo el Sol, la Luna y las estrellas.

Creía que los cuerpos celestes estaban hechos de fuego y giraban alrededor de la Tierra en órbitas circulares.

Razones detrás de la idea de la Tierra cilíndrica

Razonamiento lógico:

Anaximandro utilizó la lógica para superar la idea de que la Tierra necesitaba un soporte físico (como el agua en la cosmología de Tales). En su modelo, la Tierra permanecía suspendida por la armonía y el equilibrio cósmico.

Influencia geométrica:

Aunque el cilindro no es esférico, representa un paso intermedio hacia concebir formas tridimensionales para la Tierra, alejándose de la idea de una superficie plana.

Importancia de su teoría:

- **Innovación cosmológica:**

Su modelo marcó un avance hacia un pensamiento cosmológico más abstracto, alejándose de las creencias mitológicas tradicionales.

- **Influencia en la astronomía griega:**

Su idea de un universo ordenado influyó en filósofos posteriores, como Pitágoras, quien desarrolló la idea de una Tierra esférica basándose en principios geométricos y observaciones astronómicas.

Evolución posterior:

Aunque la teoría de Anaximandro de una Tierra cilíndrica fue reemplazada más tarde por la concepción esférica de Pitágoras y Aristóteles, sigue siendo notable como uno de los primeros intentos de explicar la forma y el lugar de la Tierra en el cosmos de forma racional y sin recurrir a soportes físicos o sobrenaturales.

La propuesta de Anaximandro sobre una Tierra cilíndrica fue un paso fundamental en la historia del pensamiento científico, marcando el inicio de explicaciones más abstractas y racionales sobre el universo.

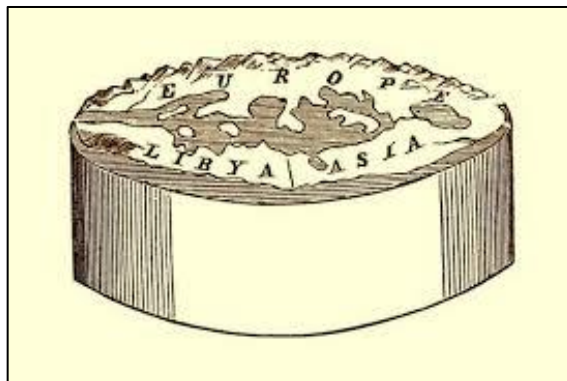


Figura N° 5. La Tierra en su forma cilíndrica.

Fuente: Astrosigma.com

2.1.5. Teoría de la forma de la tierra como una esfera

Los filósofos griegos tempranos aluden a una Tierra esférica, aunque con cierta ambigüedad. Pitágoras (siglo VI a. C.) está entre aquellos que se dice que originaron la idea, pero esto puede ser reflejo de la práctica de atribuir cada descubrimiento a uno u otro de los antiguos sabios. La escuela pitagórica es la responsable de la teoría sobre la armonía de las esferas, donde todos los cuerpos celestes, incluida la tierra, son reconocidos de forma esférica. Alguna idea sobre la esfericidad de la Tierra parece haber sido conocida tanto por Parménides como Empédocles en el siglo V a. C., pero lo mismo pudo haber sido formulada en la

escuela pitagórica en esa misma época. Después del siglo V a. C., ningún escritor griego de renombre pensó que la Tierra era otra cosa que esférica.

Razones de Pitágoras para proponer la Tierra esférica

- ❖ **Simetría y perfección de la esfera:** Pitágoras y su escuela creían que la esfera era la forma geométrica más perfecta, y dado que la naturaleza parecía seguir principios armónicos, concluyeron que la Tierra debía ser esférica.

Esta idea se basaba en su enfoque filosófico de que el cosmos estaba regido por principios matemáticos y geométricos.

- ❖ **Observación de los astros:** Pitágoras notó que la Luna y el Sol parecían tener formas circulares, lo que llevó a la hipótesis de que otros cuerpos celestes, incluida la Tierra, también debían ser esféricos.

- ❖ **Evidencia indirecta:** Aunque no se conocen observaciones astronómicas detalladas realizadas por Pitágoras, su razonamiento geométrico y su creencia en la armonía del cosmos le hicieron concluir que la Tierra es redonda.

Influencia de Pitágoras

- ❖ **En el pensamiento griego:** La idea de la Tierra esférica fue adoptada por filósofos posteriores, como Parménides, Platón y Aristóteles, quienes ofrecieron pruebas más concretas basadas en la observación empírica.

- ❖ **Herencia científica:** La escuela pitagórica no solo propuso que la Tierra era esférica, sino que también reflexionó sobre el movimiento de los astros, sentando las bases para teorías astronómicas más avanzadas.

Pruebas posteriores de la esfericidad de la Tierra

Aunque Pitágoras propuso la idea basándose en principios filosóficos y estéticos, fue más tarde que filósofos como Aristóteles ofrecieron pruebas observables, como:

- La sombra curva de la Tierra sobre la Luna durante un eclipse lunar.
- Los cambios en el horizonte al viajar grandes distancias.

Pitágoras fue el primer pensador conocido en afirmar que la Tierra era esférica, basándose en principios geométricos y filosóficos. Su idea marcó un punto de inflexión en la cosmología griega y preparó el terreno para futuros avances en la comprensión del cosmos.

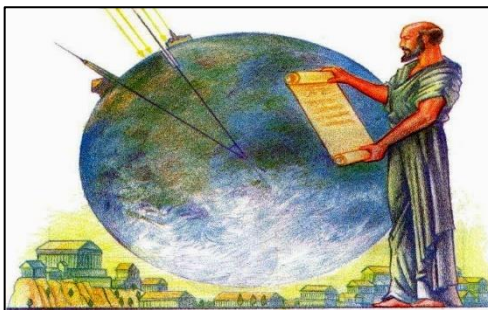


Figura N° 6. La Tierra en su forma esférica.

Fuente: Establopegaso.wordpress.com

Eratóstenes de Cirene

(276 a.C. - 194 a.C.), astrónomo, matemático y geógrafo griego, es famoso por ser el primero en realizar una medición precisa del tamaño de la Tierra, lo que también sirvió como una confirmación empírica de su esfericidad. Este logro ocurrió alrededor del año 240 a.C. y es uno de los experimentos más notables de la historia antigua.

El experimento de Eratóstenes

Eratóstenes usó observaciones simples y principios geométricos para demostrar la curvatura de la Tierra y calcular su circunferencia. Su método se basó en las siguientes observaciones:

- ❖ **Las sombras en diferentes ciudades:** En la ciudad de Siena (hoy Asuán, Egipto), el sol estaba directamente sobre la cabeza al mediodía del solsticio de verano (el 21 de junio), por lo que los objetos no proyectaban sombra.

Sin embargo, en Alejandría, al norte de Siena, los objetos sí proyectaban sombra al mismo tiempo.

- ❖ **El ángulo de la sombra en Alejandría:** Eratóstenes midió el ángulo que formaba la sombra de un obelisco o una vara vertical en Alejandría al mediodía del solsticio. Este ángulo era de aproximadamente 7,2 grados, lo cual corresponde a $\frac{1}{50}$ de un círculo completo (360 grados).

- ❖ **Distancia entre Siena y Alejandría:** Eratóstenes conocía (o estimó) que la distancia entre Siena y Alejandría era de unos 5.000 estadios (aproximadamente 800 km, dependiendo de la unidad exacta utilizada).
- ❖ **Cálculo de la circunferencia de la Tierra:** Dado que el ángulo entre las sombras era 7,2 grados, y esto representaba 1/50 del círculo completo, dedujo que la circunferencia total de la Tierra sería:

$$(\text{Circunferencia} = 5.000(\text{estadios}) \cdot (1/50) = 250.000(\text{estadios}).$$

Implicaciones del experimento

- ❖ **Demostración de la esfericidad:** El experimento de Eratóstenes no solo midió la circunferencia de la Tierra, sino que también proporcionó evidencia directa de que la Tierra es redonda, ya que la diferencia en los ángulos de las sombras solo es explicable si la superficie terrestre está curvada.
- ❖ **Impacto en la ciencia antigua:** La medición de Eratóstenes fue uno de los primeros ejemplos de cómo las matemáticas y la observación pueden usarse juntas para resolver un problema científico complejo.

Inspiró a otros geógrafos y astrónomos, como Hiparco y Ptolomeo, a desarrollar mapas y modelos más precisos del mundo y el cosmos.

Legado de Eratóstenes

El método de Eratóstenes es una muestra de cómo el pensamiento racional y la observación cuidadosa pueden superar las limitaciones tecnológicas de una época. Su medición de la Tierra, con un margen de error sorprendentemente pequeño, permanece como uno de los logros más destacados de la ciencia antigua.

La expedición liderada por Fernando de Magallanes

La expedición liderada por Fernando de Magallanes (1480-1521) y completada por Juan Sebastián Elcano es uno de los hitos más importantes en la historia de la humanidad que confirmó empíricamente la esfericidad de la Tierra. Aunque la idea de que la Tierra era esférica ya era ampliamente aceptada por los eruditos de la época, el viaje de Magallanes y Elcano proporcionó evidencia práctica al completar la primera circunnavegación del planeta.

El contexto antes de Magallanes

- ❖ **Conocimiento previo:** La esfericidad de la Tierra era conocida desde la antigüedad gracias a los trabajos de filósofos y científicos como Pitágoras, Aristóteles y Eratóstenes.

En la Edad Media, los astrónomos islámicos y europeos, como Al-Biruni y Cristóbal Colón, también asumieron que la Tierra era redonda, aunque Colón subestimó su tamaño.

- ❖ **Duda popular:** Si bien los académicos aceptaban que la Tierra era esférica, el concepto no era tan claro para el pueblo común, que todavía podía aferrarse a creencias mitológicas o cosmologías simplistas.

El viaje de Magallanes y su evidencia

- ❖ **Inicio de la expedición (1519):** Magallanes partió de Sevilla con una flota de cinco naves, con el objetivo de encontrar una ruta occidental hacia las Islas de las Especias (hoy Indonesia), navegando alrededor del mundo.
- ❖ **El estrecho de Magallanes (1520):** Magallanes descubrió y cruzó el estrecho que lleva su nombre en la punta sur de América del Sur, demostrando que era posible navegar hacia el oeste desde el Atlántico al Pacífico.
- ❖ **El océano Pacífico:** Tras cruzar el estrecho, Magallanes y su tripulación navegaron por un inmenso océano, al que llamaron "Pacífico". Esto reforzó la idea de que los océanos estaban interconectados.
- ❖ **La muerte de Magallanes:** Magallanes murió en 1521 en Filipinas, pero su expedición fue continuada por Juan Sebastián Elcano.
- ❖ **Regreso a España (1522):** La expedición finalmente regresó a España con una sola nave, la Victoria, completando la primera vuelta al mundo. Esto demostró de manera práctica que la Tierra era esférica, ya que viajaron continuamente hacia el oeste y regresaron al punto de partida.

Evidencia de la esfericidad de la tierra proporcionada por el viaje

Circunnavegación completa: La expedición fue el primer viaje que circunnavegó completamente el globo, probando que era posible viajar alrededor de la Tierra en una trayectoria continua.

Cambio en el día: Al regresar a España, los sobrevivientes notaron que habían perdido un día en sus registros de tiempo. Esto ocurrió porque viajaron continuamente hacia el oeste, un fenómeno explicado por la rotación de la Tierra.

Impacto y legado

- ❖ **Confirmación empírica:** Aunque los científicos ya sabían que la Tierra era esférica, la expedición de Magallanes y Elcano ofreció una prueba práctica que fue comprendida más ampliamente por las sociedades de la época.
- ❖ **Conexión global:** El viaje demostró que los océanos estaban interconectados y que todas las tierras formaban parte de un planeta esférico, cambiando la percepción del mundo y fomentando la exploración global.
- ❖ **Hito histórico:** La circunnavegación es considerada uno de los logros más importantes de la historia humana, simbolizando el triunfo de la exploración, la navegación y la ciencia.

Por lo tanto, la expedición de Magallanes (1519-1522) confirmó de manera definitiva la esfericidad de la Tierra al lograr la primera circunnavegación

Desarrollo de la teoría de la tierra como esferoide oblato

- ❖ **Isaac Newton (1687):** En su obra Principia Mathematica, Newton predijo que la Tierra debía ser un esferoide oblato, es decir, ligeramente aplastada en los polos y ensanchada en el ecuador.

Esta idea se basó en su teoría de la gravitación universal y el efecto de la fuerza centrífuga causada por la rotación de la Tierra.

- ❖ **La controversia Newton vs. Cassini:** Algunos científicos, como la familia Cassini en Francia, argumentaban que la Tierra era un esferoide prolato, es decir, alargada en los polos, basándose en observaciones erróneas.

Esta disputa fue resuelta por las mediciones realizadas en expediciones científicas en el siglo XVIII.

Confirmación de la forma oblata

Expediciones geodésicas: En el siglo XVIII, se llevaron a cabo expediciones en regiones ecuatoriales y polares para medir la curvatura de la Tierra. Las más destacadas fueron:

Expedición a Perú (1735-1744): Midió el arco de meridiano cerca del ecuador.

Expedición a Laponia (1736-1737): Midió el arco de meridiano cerca del polo norte.

Los resultados confirmaron que la Tierra es más ancha en el ecuador y más achatada en los polos, apoyando la teoría de Newton.

Karl Friedrich Gauss y la geodesia moderna: En el siglo XIX, Gauss desarrolló métodos matemáticos avanzados que ayudaron a modelar la Tierra como un elipsoide de revolución, ajustándose mejor a las mediciones.

Forma exacta de la Tierra (Geoide): Aunque el modelo de un esferoide oblato describe bastante bien la forma de la Tierra, su forma real es aún más irregular debido a variaciones gravitatorias locales causadas por montañas, océanos y densidades variables en el interior del planeta. Esta forma más precisa se llama geoide.

El geoide es la superficie teórica que representa el nivel medio del mar extendido por todo el planeta, teniendo en cuenta las variaciones de la gravedad.

Impacto de la teoría

❖ Navegación y cartografía:

La comprensión de la Tierra como un esferoide oblato permitió la creación de mapas y sistemas de navegación más precisos.

❖ Astronomía y física:

Esta forma influye en el movimiento de satélites y en cómo experimentamos la gravedad en diferentes puntos del planeta.

La idea de una Tierra ovalada, como un esferoide oblato, es una mejora científica de la antigua concepción de una esfera perfecta. Fue confirmada a través de observaciones y mediciones realizadas entre los siglos XVII y XVIII, y sigue siendo esencial para disciplinas como la geodesia, la astronomía y la navegación.



Figura N° 8. Forma ovalada de la tierra

Fuente: www.shutterstock.com

2.1.7. Forma de la tierra exacta (Geoide)

Se denomina geoide griego ($\gamma\epsilon\iota\alpha$), gueia, que significa "tierra", y ($\epsilon\iota\delta\omicron\varsigma$), eidos, "forma", o "apariciencia" . Por lo que significaría "forma que tiene la Tierra", al cuerpo definido por la superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre. La forma que tomaría la superficie del océano bajo la influencia de la gravedad de la Tierra, incluida la atracción gravitacional y la rotación de la Tierra, si otras influencias como los vientos y las mareas estuvieran ausentes. Esta superficie se extiende a través de los continentes (como con hipotéticos canales muy estrechos). Según Gauss, quien la describió por primera vez, es la "figura

matemática de la Tierra", una superficie lisa pero irregular cuya forma resulta de la distribución desigual de la masa dentro y sobre la superficie de la Tierra. Solo se puede conocer a través de extensas mediciones y cálculos gravitacionales. A pesar de ser un concepto importante durante casi 200 años en la historia de la geodesia y la geofísica, se ha definido con alta precisión solo desde los avances en la geodesia satelital a fines del siglo XX.

Características del geoide

- ❖ **Irregularidad:** Aunque el geoide se asemeja a un esferoide oblato (achatado en los polos y ensanchado en el ecuador), presenta ondulaciones debido a las diferencias en la densidad del interior de la Tierra y la distribución de la masa.

Estas ondulaciones pueden ser positivas (donde el geoide está por encima del elipsoide ideal) o negativas (donde está por debajo).
- ❖ **Referencia para la altitud:** El geoide es la base para medir las altitudes sobre el nivel del mar, como las alturas de montañas o las profundidades de valles.
- ❖ **Relación con la gravedad:** Es una superficie equipotencial del campo gravitacional terrestre, lo que significa que, en todos los puntos del geoide, la fuerza gravitatoria tiene la misma magnitud.

Diferencia entre el geoide y otras formas de la Tierra

- ❖ **Esfera:** Un modelo simplista que asume que la Tierra es una esfera perfecta, usado en la antigüedad.
- ❖ **Esferoide oblato:** Representa un achatamiento en los polos y un ensanchamiento en el ecuador debido a la rotación terrestre.
- ❖ **Geoide:** Es el modelo más realista, ya que tiene en cuenta las irregularidades causadas por la distribución desigual de la masa de la Tierra.

Importancia del geoide

- ❖ **Geodesia y cartografía:** Proporciona una referencia precisa para medir altitudes y niveles en todo el planeta.

Es crucial para diseñar mapas topográficos y sistemas de navegación GPS.

- ❖ **Ciencias de la Tierra:** Permite estudiar las variaciones en la gravedad terrestre, ayudando a comprender procesos internos como la tectónica de placas y la dinámica del manto.
- ❖ **Hidrología:** Es útil para modelar el flujo de agua, ya que el geoide define el nivel "natural" al que el agua tendería a equilibrarse.

Cómo se mide el geoide

El geoide se determina mediante técnicas avanzadas de geodesia, incluyendo:

Mediciones gravimétricas: Usan instrumentos que miden la fuerza de gravedad en diferentes puntos de la Tierra.

Observaciones satelitales: Misiones como GRACE y GOCE recopilan datos sobre las variaciones en la gravedad terrestre.

Nivelación: Comparaciones entre el nivel del mar en diferentes lugares y el campo gravitatorio local.

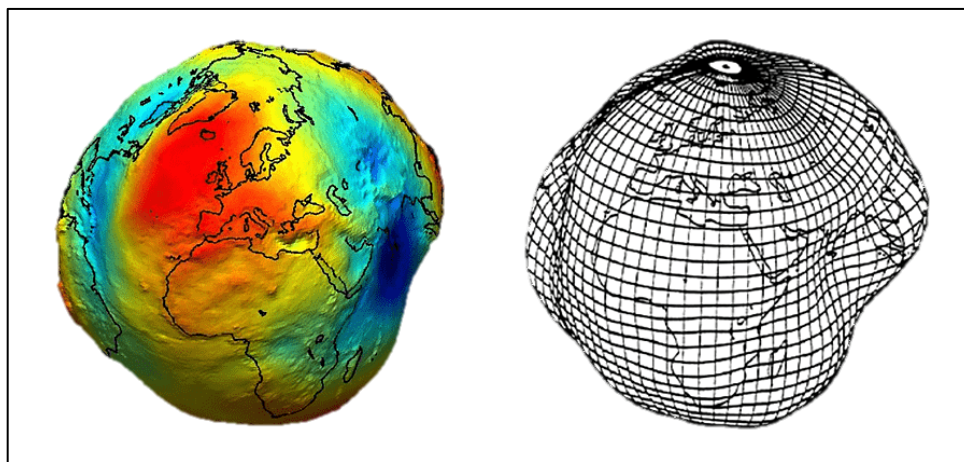


Figura N° 9. Forma GEOIDE de la tierra.

Fuente: www.pngegg.com.

2.2. Coordenadas geográficas

El sistema de coordenadas geográficas es un marco de referencia utilizado para identificar la posición exacta de cualquier punto en la superficie de la Tierra mediante un conjunto de valores numéricos. Este sistema es esencial para la navegación, la cartografía, la geodesia y diversas aplicaciones tecnológicas. Se basa en un modelo tridimensional de la Tierra y utiliza líneas imaginarias que

dividen el planeta para definir coordenadas, permitiendo describir con precisión ubicaciones en términos de latitud, longitud y, en ocasiones, altitud.

2.2.1. Antecedentes históricos

La invención de un sistema de coordenadas geográficas se atribuye generalmente a Eratóstenes de Cirene, que compuso su Geografía, perdida en la biblioteca de Alejandría en el siglo III a. C. C. Un siglo más tarde, Hiparco de Nicea mejoró este sistema determinando la latitud a partir de medidas estelares en lugar de la altitud solar y determinando la longitud mediante los tiempos de los eclipses lunares, más que por estimación. En el siglo I o II, Marino de Tiro compiló un extenso nomenclátor y un mapa del mundo matemáticamente trazado utilizando coordenadas medidas al este desde un meridiano principal a la tierra más occidental conocida, llamada Fortunatae insulae, frente a la costa de África occidental alrededor de Canarias o Cabo Verde, y medida al norte o al sur de la Isla de Rodas frente a Anatolia. Claudio Ptolomeo le atribuyó la adopción total de la longitud y la latitud, en lugar de medir la latitud en términos de la duración del día de medio verano.

La Geografía de Ptolomeo del siglo II utilizaba el mismo meridiano principal pero en cambio medía la latitud desde el ecuador. Después de que su trabajo fuera traducido al árabe en el siglo IX, el Libro de la descripción de la Tierra de Al-Juarismi corrigió los errores de Marinus y Ptolomeo sobre la longitud del mar Mediterráneo, haciendo que la cartografía árabe medieval utilizara un primer

meridiano alrededor de 10° en el este de la línea de Ptolomeo. La cartografía matemática se reanudó en Europa después de la recuperación por Máximo Planudes del texto de Ptolomeo un poco antes de 1300; el texto fue traducido al latín en Florencia por Jacopo de Angelo hacia 1407.

En 1884, Estados Unidos acogió la Conferencia Internacional del Meridiano, a la que asistieron representantes de veinticinco naciones. Veintidós de ellos acordaron adoptar la longitud del Real Observatorio de Greenwich, Inglaterra, como línea de referencia cero. La República Dominicana votó en contra de la moción, mientras que Francia y Brasil se abstuvieron. Francia adoptó la hora media de Greenwich en lugar de las determinaciones locales del Observatorio de París en 1911.

2.2.2. Conceptos clave del sistema de coordenadas geográficas

Geodesia: Estudia la forma y dimensiones de la Tierra, el estudio externo de la gravedad terrestre y la superficie de los fondos oceánicos. Dentro de este concepto se incluye la orientación y posición terrestre en el espacio. Una parte importante de la geodesia, es la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre, mediante coordenadas (latitud, longitud y altura).

La latitud: (abreviatura: Lat., ϕ , o phi) de un punto en la superficie de la Tierra es el ángulo entre el plano ecuatorial y la línea que pasa por este punto y el centro de la Tierra. Todos los puntos con la misma latitud forman un plano paralelo al

plano del ecuador. El ecuador es el paralelo 0° y divide el globo en hemisferios norte y sur; así el polo norte es 90° N y el polo sur es 90° S.

La longitud: (abreviatura: Long., λ , o lambda) de un punto en la superficie de la Tierra es el ángulo entre el meridiano de referencia y el meridiano que pasa por este punto. El meridiano de referencia mayormente aceptado es el meridiano que pasa por el Real Observatorio de Greenwich, situado al sureste de Londres, Inglaterra. Este primer meridiano determina los hemisferios este y oeste. Las líneas de longitud forman semicírculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos. Los meridianos junto con sus correspondientes antimeridianos forman circunferencias de 40 007.16 km de longitud. La distancia en km a la que equivale un grado de longitud depende de la latitud. A medida que la latitud aumenta, hacia Norte o Sur, disminuyen los kilómetros por grado. Para el paralelo del Ecuador, sabiendo que la circunferencia que corresponde al Ecuador mide 40 075.01 km, 1° equivale a 111 319 m (resultado de dividir el perímetro del ecuador entre los 360° de longitud).

Altitud (h): Es la distancia vertical de un punto respecto al nivel del mar, se mide en metros o pies. Aunque no es parte directa de las coordenadas geográficas bidimensionales (latitud y longitud), es un componente crucial en sistemas tridimensionales.

La indicación de la altitud exige la elección de un modelo de esferoide que represente la Tierra y estos modelos producen diferentes valores para la altitud.

Eso se resuelve utilizando un dato que representa la altitud en los diferentes modelos usados.

La insolación terrestre depende de la latitud. Dada la distancia que nos separa del Sol, los rayos luminosos que llegan hasta nosotros son prácticamente paralelos. La inclinación con que estos rayos inciden sobre la superficie de la Tierra es, pues, variable según la latitud. En la zona intertropical, a mediodía, caen casi verticales, mientras que inciden tanto más inclinados cuanto más se asciende en latitud, es decir cuanto más nos acercamos a los Polos. Así se explica el contraste entre las regiones polares, muy frías y las tropicales, muy cálidas.

Posición absoluta: se determina a través de las coordenadas geográficas (latitud y longitud).

Posición relativa: permite localizar distintos espacios territoriales a partir de tomar otro espacio territorial como referencia.

Líneas principales del sistema

- **Paralelos:**

Líneas horizontales imaginarias que son paralelas al ecuador.

Ejemplos:

Trópico de Cáncer (norte).

Trópico de Capricornio (sur).

Círculo Polar Ártico (norte).

Círculo Polar Antártico (sur).

- **Meridianos:**

Líneas verticales imaginarias que convergen en los polos y dividen la Tierra en hemisferios este y oeste.

Ejemplo:

Meridiano de Greenwich (referencia para la longitud).

Meridiano opuesto (también conocido como línea internacional de cambio de fecha).

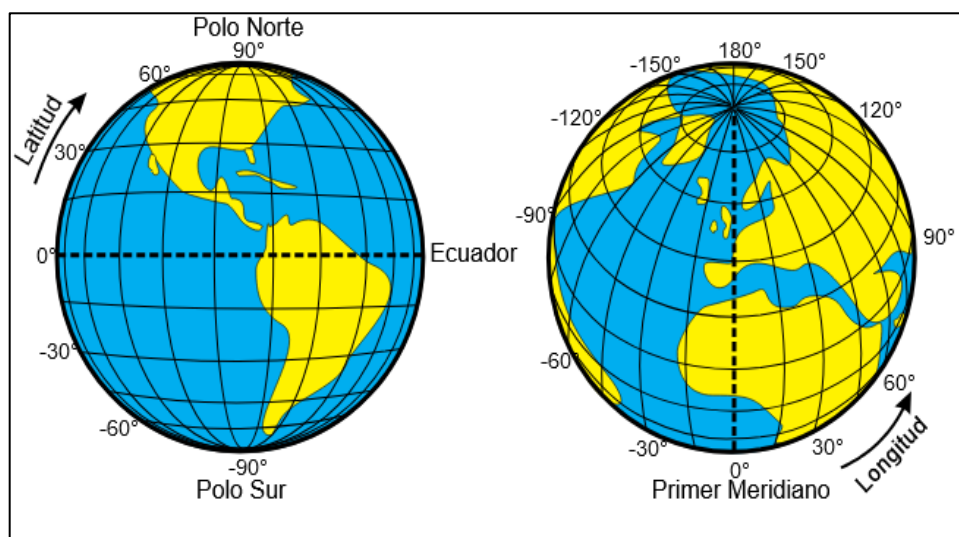


Figura N° 10. Proyecciones ortográficas de la Tierra con las líneas de paralelos y meridianos.

Fuente: www.geoenciclopedia.com

2.2.3. Posicionamiento

Combinando los dos ángulos, se puede especificar la posición en la superficie de la Tierra.

Por ejemplo, Baltimore (en Estados Unidos) tiene una latitud de 39.28° Norte y una longitud de 76.60° Oeste ($39^\circ 17' N$, $76^\circ 36' W$).

Las coordenadas geográficas se expresan tradicionalmente en el sistema sexagesimal, a veces anotado como «GMS»: grados ($^\circ$) minutos ($'$) segundos ($''$). La unidad básica es el grado de ángulo (una revolución completa equivale a 360°), luego el minuto de ángulo ($1^\circ = 60'$) y el segundo de ángulo ($1^\circ = 3600''$).

Para dar una comparación aproximada en distancia de estas unidades en la superficie de la Tierra, el perímetro de la Tierra que corresponde a 360° es de unos 40 000 km. Más concretamente, son 40 075.017 km en el ecuador; por tanto:

- Un grado equivale a unos 111 319 m (en el ecuador).
- Un minuto equivale a unos 1855 m (en el ecuador).
- Un segundo equivale a unos 30.92 m (en el ecuador).

Las mediciones inferiores a un segundo se anotan con el sistema decimal.

Estas distancias, que corresponden a una diferencia de longitud (en grados, minutos o segundos), varían en función de la latitud del lugar, ya que los

meridianos terrestres se acercan progresivamente desde el ecuador hacia los polos.

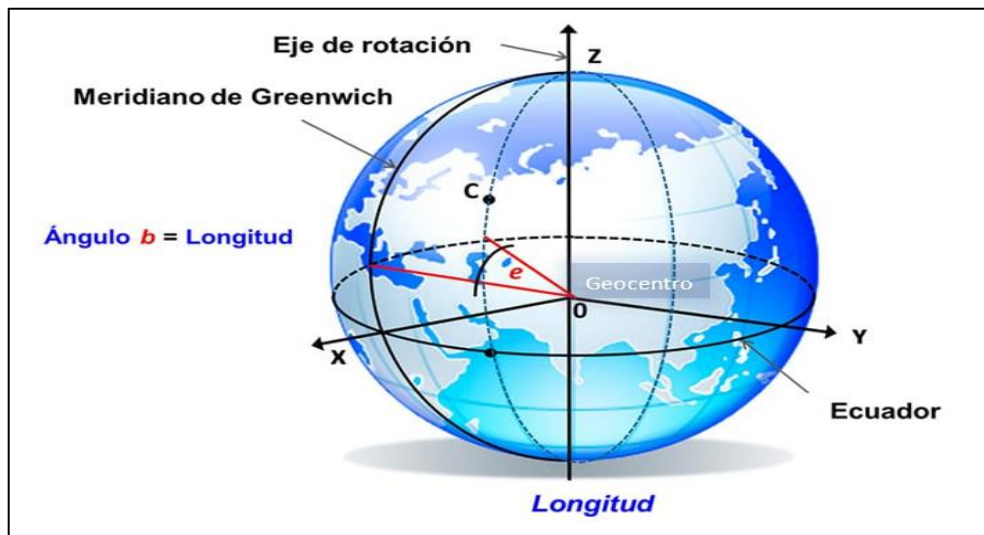


Figura N° 11. La relación entre sistema de coordenadas.

Fuente: blogs.upm.es

2.2.4. Importancia

- ❖ **Localización precisa:** Permite identificar cualquier punto en la superficie terrestre con exactitud.

Ejemplo: Las coordenadas de la Torre Eiffel son aproximadamente N, E.
- ❖ **Navegación:** Es esencial para la navegación marítima, aérea y terrestre, especialmente con el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS).
- ❖ **Cartografía y geodesia:** Se usa para crear mapas precisos y realizar estudios geográficos.

- ❖ **Gestión y planificación:** Ayuda en tareas como el control de recursos, la planificación urbana y el monitoreo de fenómenos naturales.

Relación con sistemas modernos

El sistema de coordenadas geográficas es la base para tecnologías modernas como:

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Herramientas para el análisis y gestión de datos espaciales.
- **GPS (Sistema de Posicionamiento Global):** Utiliza coordenadas geográficas para determinar ubicaciones en tiempo real.

2.3. Coordenadas planas

Un sistema de coordenadas proyectadas está definido en una superficie plana de dos dimensiones, que permite identificar la posición de un punto en un plano mediante un par de valores numéricos, pues una red ordenada de paralelos y meridianos utilizada como base para trazar un mapa sobre una superficie plana permite, que esta metodología se desarrolle. El objetivo es trasladar (proyectar) la red geográfica esférica a una superficie plana para representar la Tierra o parte de ella. Este sistema es ampliamente utilizado en cartografía, ingeniería, diseño y otras aplicaciones donde se trabaja con superficies planas o áreas limitadas.

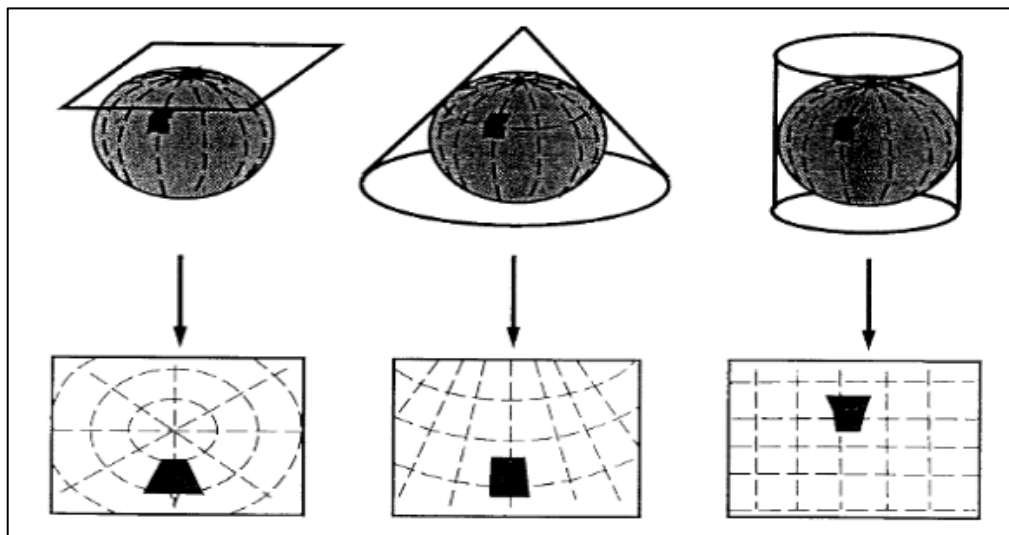


Figura N° 12. Representación de tres proyecciones.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

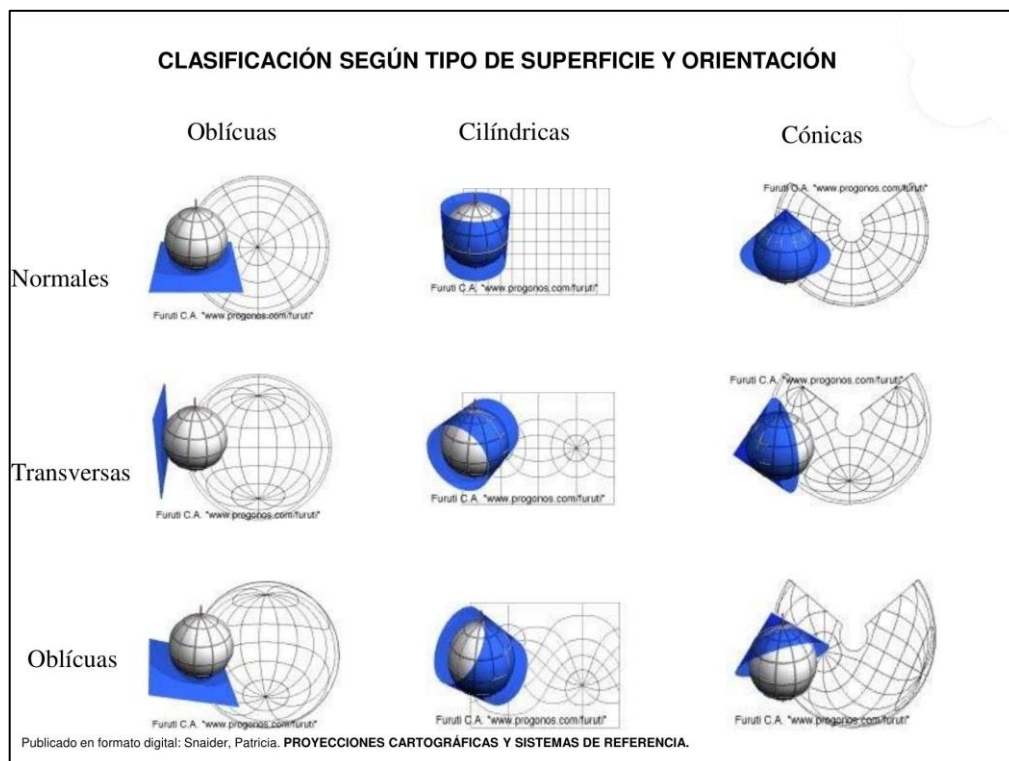


Figura N° 13. Representación derivada de las proyecciones.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

2.3.1. Proyecciones cilíndricas

Son proyecciones construidas a partir de un cilindro: paralelos y meridianos son rectos, permiten representar toda la superficie de la Tierra, el sector con menos deformación es la línea ecuatorial.

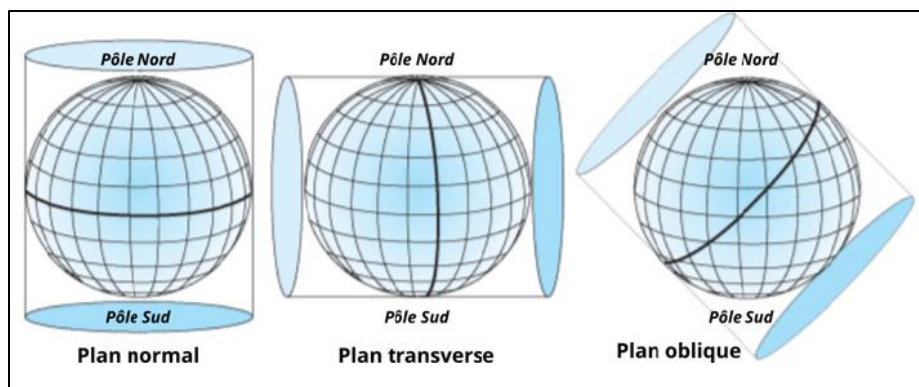


Figura N° 14. Plano normal, transversal y oblicuo.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

Sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM): Está basado en la proyección cartográfica, se proyecta el globo terrestre sobre un cilindro, El factor de escala en la dirección del paralelo y en la dirección del meridiano son iguales. Los meridianos se proyectan sobre el plano con una separación proporcional a la del modelo, así hay equidistancia entre ellos. Sin embargo, los paralelos se van separando a medida que nos alejamos del Ecuador, por lo que al llegar al polo las deformaciones serán infinitas.

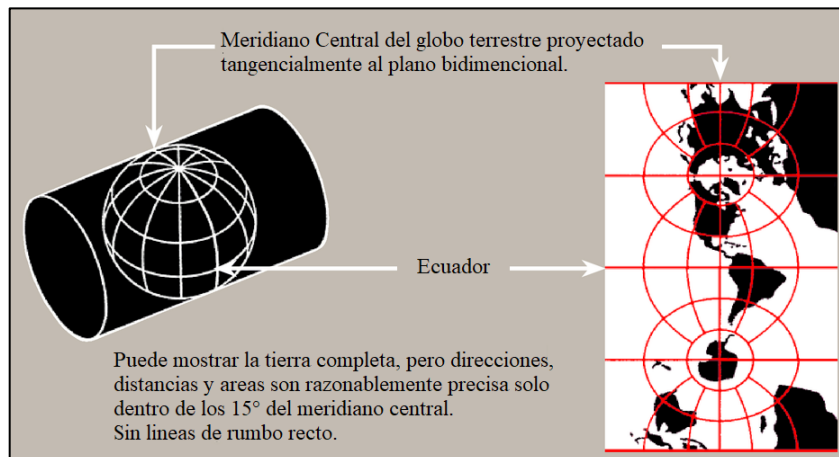


Figura N° 15. Proyección transversal de Mercator.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

Husos UTM: Se divide la Tierra en 60 husos de 6° de longitud, la zona de proyección de la UTM se define entre los paralelos 80° S y 84° N. Cada huso se numera con un número entre el 1 y e 160, estando el primer huso limitado entre las longitudes 180° y 174° W y centrado en el meridiano 177° W. Cada huso tiene asignado un meridiano central, que es donde se sitúa el origen de coordenadas, junto con el ecuador. Los usos se numeran en orden ascendente hacia el este.

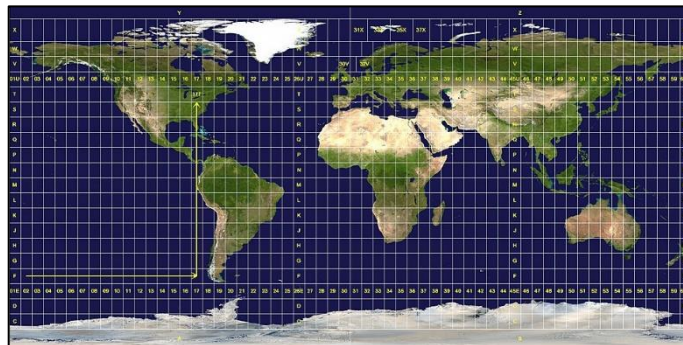


Figura N° 16. Zonas de longitud y latitud sistema UTM.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

2.3.2. Proyecciones cónicas:

Son proyecciones construidas a partir de un cono: los meridianos se juntan en un punto y los paralelos son curvos, es útil para representar latitudes medias. A lo largo del paralelo que toca el cono (tangente) se encuentra el sector con menos deformación, se origina una distorsión asimétrica que afecta, en gran medida, a las zonas polares, pero ofrece aceptable precisión en las zonas del hemisferio donde el cono de proyección es tangente.

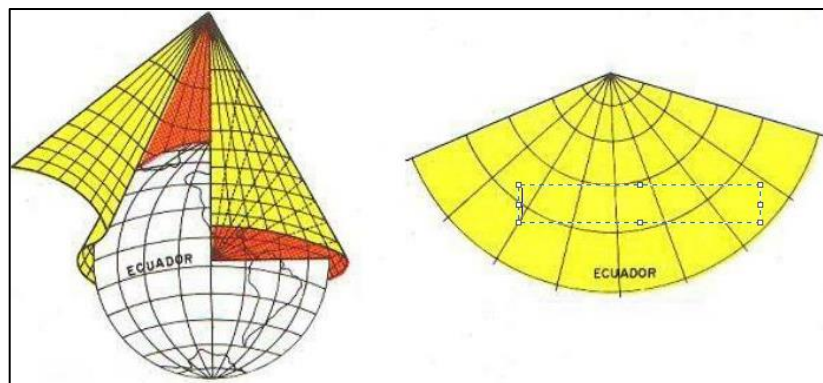


Figura N° 17. Representación de la proyección cónica.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

2.3.3. Proyecciones planas

La proyección se hace directamente sobre un plano tangente a la esfera. Una característica de este tipo de proyección, en todas sus variantes, es presentar como líneas rectas todos los círculos máximos que pasan por el centro de la proyección. Lo anterior y su contorno circular permite reconocer una proyección plana. Teniendo en cuenta la inclinación del plano respecto del eje de la esfera, las proyecciones cónicas se pueden clasificar en:

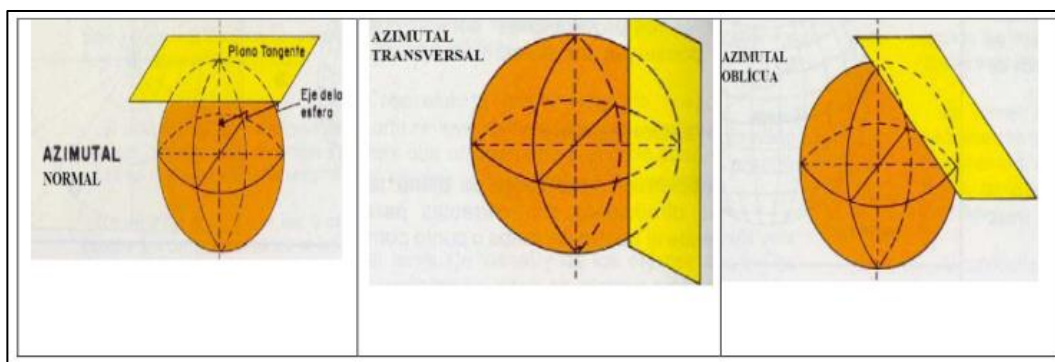


Figura N° 18. Azimutal normal, azimutal transversal, azimutal oblicua.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

2.3.4. Proyecciones modificadas

- **Homolosena de Goode:** Es una proyección discontinua en la que la Tierra se representa en partes irregulares unidas. Se consigue de esta manera mantener la sensación de esfera y una distorsión mínima de las zonas continentales.

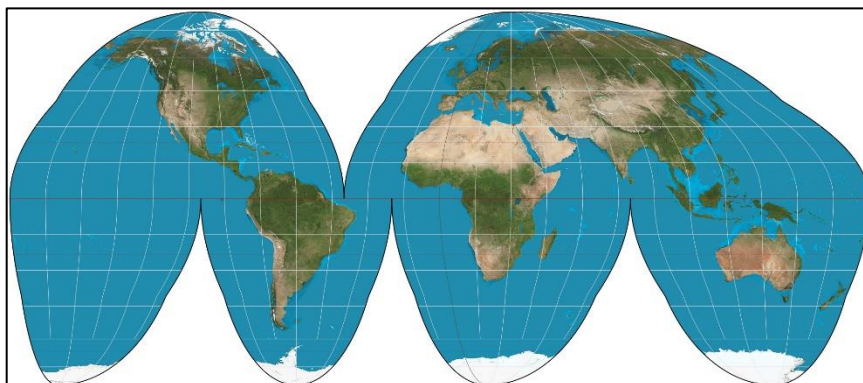


Figura N° 19. Representación de Homolosena de Goode.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

- **Homográfica de Mollweide:** Se dice que es un pseudocilíndrica, porque el mundo aparece dentro de una elipse. El Ecuador tiene doble de longitud que el meridiano central. Esa una proyección equivalente con una cuadrícula de coordenadas curvas.

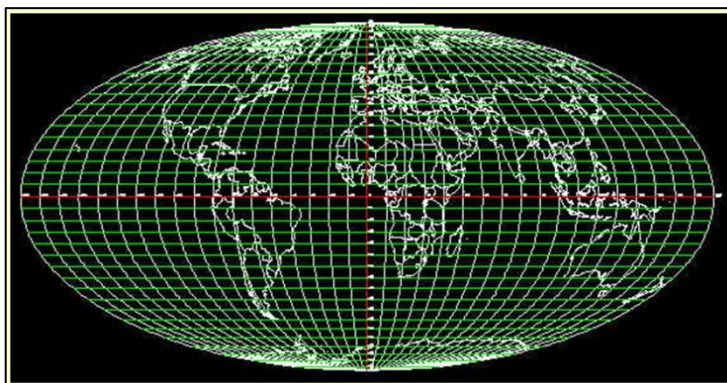


Figura N° 20. Representación Homográfica de Mollweide.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

- **Peters:** Es una proyección cilíndrica conforme como la de Mercator. La diferencia es que corrige matemáticamente la distorsión de las latitudes altas. Las menores deformaciones se encuentran en las latitudes medias, donde vive la mayor parte de la población. Las latitudes bajas tienen una escala algo más grande. Las latitudes altas tienen una escala más pequeña, pero se representan todas las latitudes. De todas las proyecciones existentes esta es la más ajustada al mundo real.

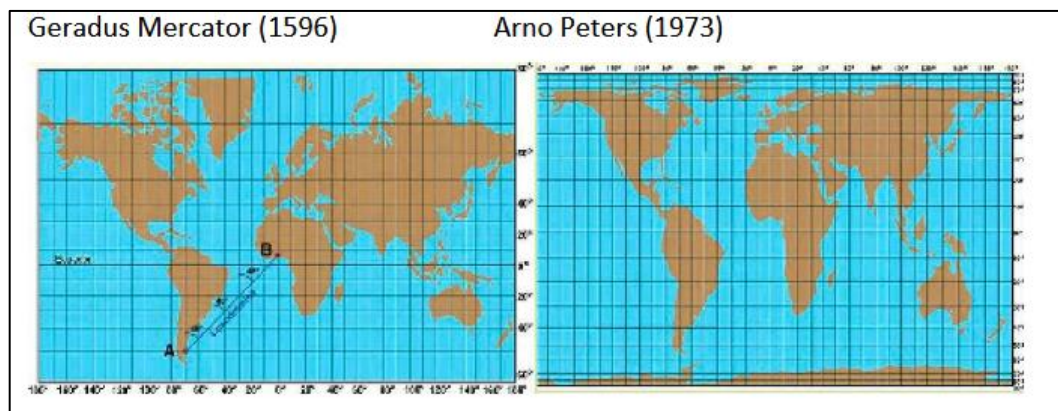


Figura N° 21. Representación de Mercator vs Peters.

Fuente: Gisfigempa.wordpress.com.

CAPÍTULO III: SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO

Un sistema de referencia geodésico es un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre. Son utilizados en geodesia, navegación, cartografía y sistemas globales de navegación por satélite para la correcta georreferenciación de elementos en la superficie terrestre. Estos sistemas son necesarios dado que la Tierra no es una esfera perfecta. Dentro de estos cabe distinguir los llamados sistemas locales, que utilizan para su definición un elipsoide determinado y un punto datum, y los sistemas globales cuyos parámetros están dados por una terna rectangular (X, Y, Z) cuyo origen se encuentra en el geo centro terrestre. Para definir las coordenadas geodésicas (latitud, longitud y altura) cuentan con un elipsoide de revolución asociado. En la realidad tanto el centro como los ejes son inaccesibles en la práctica.

3.1. Sistema de referencia global.

3.1.1. Elipsoide WGS-84

El elipsoide WGS84 (World Geodetic System 1984) es un modelo matemático utilizado para aproximar la forma de la Tierra. Es el elipsoide de referencia del sistema de coordenadas WGS84, que a su vez es la base del sistema de navegación global GPS (Global Positioning System). Este elipsoide es ampliamente adoptado para representar la superficie terrestre debido a su precisión y compatibilidad con sistemas globales.

Características del elipsoide WGS84

- ❖ **Forma:** La Tierra no es una esfera perfecta, sino que está achatada en los polos y ensanchada en el ecuador. El WGS84 modela esta forma como un elipsoide de revolución.
- ❖ **Parámetros principales:**
 - Semieje mayor:** 6,378,137 metros. Representa la distancia desde el centro de la Tierra hasta el ecuador.

El achatamiento describe cuánto está "aplanado" el elipsoide en los polos respecto al ecuador.
 - Semieje menor:** Aproximadamente 6,356,752.3142 metros. Representa la distancia desde el centro de la Tierra hasta los polos.
- ❖ **Sistema de referencia:** Es un sistema geocéntrico, lo que significa que su origen está en el centro de masa de la Tierra. Los ejes están alineados con los polos geográficos y el ecuador.
- ❖ **Geoide y elipsoide:** Aunque el WGS84 es una representación matemática uniforme, el geoide es el modelo físico más preciso de la Tierra, considerando su gravedad y forma irregular. El WGS84 se ajusta al geoide con alta precisión.

Aplicaciones del WGS84

- ❖ **Navegación por GPS:** El WGS84 es la base para calcular posiciones y trayectorias en sistemas de navegación global como el GPS. Es utilizado tanto en aplicaciones militares como civiles.
- ❖ **Cartografía global:** Base para la mayoría de los mapas digitales y sistemas de información geográfica (SIG). Se usa para crear mapas topográficos, marítimos y aéreos.
- ❖ **Geodesia y geografía:** Permite medir con precisión distancias, áreas y volúmenes en estudios geodésicos. Se utiliza en investigaciones científicas sobre la forma y dinámica de la Tierra.
- ❖ **Sistemas de coordenadas globales:** El WGS84 sirve como referencia para coordenadas geográficas (latitud, longitud y altitud), especialmente en aplicaciones internacionales.
- ❖ **Planificación e infraestructura:** Usado en ingeniería civil y proyectos de infraestructura global que requieren alta precisión en la ubicación.

Ventajas del elipsoide WGS84

- ❖ **Precisión:** Representa de manera muy precisa la forma promedio de la Tierra.
- ❖ **Compatibilidad global:** Es ampliamente adoptado en aplicaciones internacionales, lo que permite la interoperabilidad entre sistemas.

- ❖ **Actualización constante:** Desde su creación en 1984, el WGS84 ha sido actualizado varias veces para mejorar su precisión y adaptarse a cambios tectónicos y tecnológicos.

Limitaciones

- ❖ **Forma idealizada:** Aunque es un modelo preciso, el WGS84 no considera todas las irregularidades locales de la superficie terrestre (estas son modeladas por el geoide).
- ❖ **Distorsiones locales:** En aplicaciones regionales, otros sistemas (como SIRGAS en América Latina) pueden ser más adecuados al considerar movimientos tectónicos y particularidades locales.

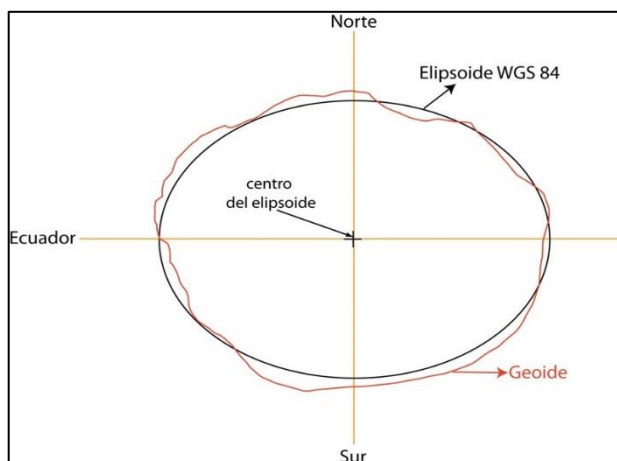


Figura N° 22. Representación del elipsoide WGS84.

Fuente: [Cursos-0-fc-ugr.github.io](https://cursos-0-fc-ugr.github.io)

El elipsoide WGS84 es un modelo esencial para representar la Tierra y es el estándar global en navegación, cartografía y geodesia. Su combinación de

precisión y simplicidad lo ha convertido en la referencia principal para aplicaciones geográficas y tecnológicas modernas.

3.1.2. Datum WGS-84

El WGS84 (World Geodetic System 1984) es un sistema geodésico global que define un sistema de coordenadas tridimensional para determinar posiciones en la superficie terrestre. Es el sistema de referencia utilizado por el GPS y otros sistemas de navegación por satélite, así como en diversas aplicaciones cartográficas. El WGS84 se basa en:

Un elipsoide de referencia:

Este elipsoide, conocido como el elipsoide GRS80 (que difiere muy ligeramente del elipsoide WGS84), modela la forma de la Tierra.

Un sistema de coordenadas tridimensional:

Utiliza la latitud, longitud y altura elipsoidal para definir la posición de un punto en la superficie terrestre.

Un centro de referencia:

El origen de WGS84 está definido en el centro de masa de la Tierra.

Un meridiano de referencia:

El meridiano cero de longitud en WGS84 se corresponde con el meridiano de Greenwich.

Características importantes del WGS84:

- **Precisión:** WGS84 ofrece una alta precisión en la determinación de posiciones.
- **Global:** Está diseñado para ser utilizado en cualquier parte del mundo.
- **Adaptabilidad:** Permite realizar conversiones a otros sistemas de referencia geodésicos.
- **Mantenimiento:** El WGS84 es mantenido y actualizado periódicamente para tener en cuenta los movimientos de las placas tectónicas.

Usos del WGS84:

- **Navegación por satélite:** El WGS84 es el sistema de referencia utilizado por el GPS y otros sistemas de navegación por satélite.
- **Cartografía:** Se utiliza para crear mapas y representar la información geográfica.
- **Geodesia:** Se utiliza para realizar mediciones geodésicas y determinar posiciones con precisión.
- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Es un estándar para la gestión y análisis de datos geográficos.
- **Aeronáutica:** Se utiliza en la aviación para la navegación y la planificación de rutas.
- **Navegación marítima:** Se utiliza en la navegación marítima para determinar la posición de los barcos y la planificación de rutas.

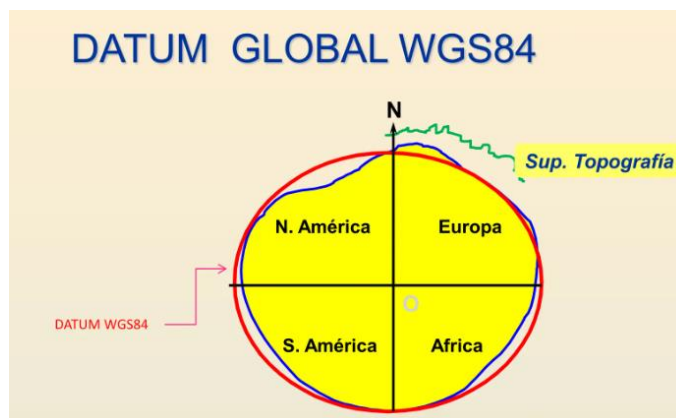


Figura N° 23. Representación del Datum WGS84.

Fuente: [Es.slideshare.net](https://www.slideshare.net)

3.2. Sistema de referencia local.

Un sistema de referencia local es un marco geodésico definido para una región, país o área específica. Su propósito principal es proporcionar una representación precisa de la superficie terrestre en un área limitada, considerando particularidades locales como movimientos tectónicos, irregularidades en el campo gravitacional y las necesidades prácticas de cartografía, infraestructura y navegación.

Características de un sistema de referencia local

- ❖ **Cobertura limitada:** Diseñado para una región o país específico. Permite mayor precisión al enfocarse en las particularidades de un área geográfica.

- ❖ **Elipsoide de referencia:** Se utiliza un elipsoide que mejor se ajuste al geoide en esa región. Ejemplo: Clarke 1866, utilizado históricamente en América, o el GRS80/SIRGAS en América Latina.
- ❖ **Datum local:** Incluye parámetros específicos como el origen (centro del sistema), orientación del eje y escala adaptados a la región. Ejemplos: NAD27 (Norteamérica), SAD69 (Sudamérica).
- ❖ **Proyección cartográfica:** Emplea proyecciones como UTM (Universal Transverse Mercator) o Lambert para traducir las coordenadas geográficas a un plano.

Ejemplos de sistemas de referencia locales

- ❖ **NAD27 (North American Datum 1927):** Utilizado en América del Norte hasta su reemplazo por NAD83. Basado en el elipsoide Clarke 1866.
- ❖ **SAD69 (South American Datum 1969):** Datum histórico para Sudamérica. Fue reemplazado por SIRGAS debido a movimientos tectónicos.
- ❖ **ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989):** Adoptado en Europa, está basado en el ITRS, pero fijo respecto a la placa Euroasiática.
- ❖ **PSAD56 (Provisional South American Datum 1956):** Usado en varios países de Sudamérica antes de la adopción de SAD69 y SIRGAS.

Sistema de referencia local en El Salvador

En El Salvador, históricamente se utilizó el sistema NAD27, que estaba basado en el elipsoide Clarke 1866. Sin embargo, este fue reemplazado por el sistema SIRGAS, que es compatible con estándares globales como WGS84, pero con ajustes para movimientos tectónicos locales.

Aplicaciones de sistemas locales

- **Cartografía nacional y catastral:** Generación de mapas detallados para gestión territorial, planificación urbana y desarrollo de infraestructura.
- **Sistemas de información geográfica (SIG):** Integración y análisis de datos geoespaciales a escala regional.
- **Obras de infraestructura:** Construcción de carreteras, puentes y redes de transporte.
- **Gestión de recursos naturales:** Planificación del uso de suelos, manejo de agua y conservación ambiental.
- **Monitoreo tectónico:** Seguimiento de movimientos de placas en regiones activas.

Ventajas de los sistemas locales

- Mayor precisión en áreas limitadas.
- Adaptados a las necesidades específicas del país o región.
- Facilitan la gestión de proyectos nacionales o regionales.

- Desventajas de los sistemas locales
- Dificultades para interoperar con sistemas globales sin transformaciones de datum.
- Pueden volverse obsoletos debido a cambios tectónicos o avances tecnológicos.

Los sistemas de referencia locales son fundamentales para aplicaciones de alta precisión dentro de un área específica, aunque su adopción suele complementarse con sistemas globales como WGS84 o SIRGAS para garantizar la interoperabilidad.

3.2.1. Elipsoide Clarke 1866

El elipsoide Clarke 1866 es un modelo matemático utilizado históricamente en geodesia para representar la forma de la Tierra. Fue definido en 1866 por el geodesta británico Alexander Ross Clarke y se convirtió en uno de los elipsoides más utilizados en América del Norte y Central durante el siglo XIX y gran parte del XX.

Este elipsoide fue adoptado como base del sistema de referencia NAD27 (North American Datum 1927), ampliamente utilizado para cartografía y levantamientos topográficos en Estados Unidos, Canadá, México y varios países de América Central, incluido El Salvador.

Características principales del elipsoide Clarke 1866

- ❖ **Parámetros principales:** Semieje mayor: 6,378,206.4 metros. Es la distancia desde el centro de la Tierra al ecuador.
Achatamiento: Representa el grado de aplanamiento del elipsoide en los polos.
Semieje menor: 6,356,583.8 metros. Es la distancia desde el centro de la Tierra a los polos.
- ❖ **Forma:** Representa un elipsoide de revolución, siendo más achatado en los polos que en el ecuador.
- ❖ **Región de ajuste:** Fue diseñado para ajustarse específicamente al geoide en América del Norte, proporcionando alta precisión en esa región.

Usos del elipsoide Clarke 1866

- ❖ **Base del sistema NAD27:** Fue el elipsoide de referencia para el sistema geodésico NAD27 (North American Datum 1927). Este sistema se utilizó para cartografía y levantamientos topográficos en gran parte de América del Norte y Central.
- ❖ **Cartografía local:** Proporcionó la base para mapas topográficos nacionales en Estados Unidos, México, Canadá y países centroamericanos como El Salvador.
- ❖ **Sistemas de coordenadas:** Permitió la definición de proyecciones cartográficas locales, como la proyección UTM en América del Norte.

Ventajas del elipsoide Clarke 1866

- **Adaptación regional:** Diseñado para ajustarse al geoide en América del Norte, lo que lo hizo altamente preciso en esta región durante su periodo de uso.
- **Simetría y simplicidad matemática:** Fácil de implementar en cálculos geodésicos con la tecnología de la época.

Limitaciones

- **Precisión global limitada:** Aunque es preciso en América del Norte.

3.2.2. Datum NAD27

El Datum NAD27 (North American Datum 1927) fue un sistema de referencia geodésico utilizado ampliamente en América del Norte, América Central y partes del Caribe durante gran parte del siglo XX. Se basaba en el elipsoide Clarke 1866, adaptado para representar con precisión la forma de la Tierra en esas regiones.

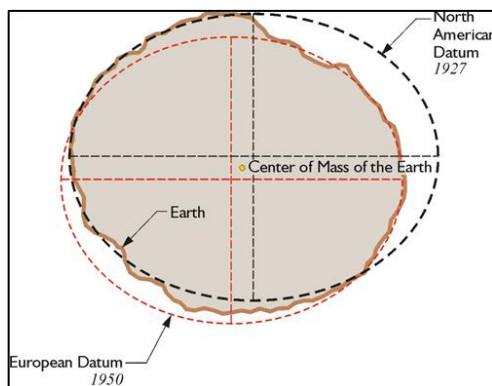


Figura N° 24. Representación del Datum NAD27.

Fuente: E-education.psu.edu

Características principales del Datum NAD27

- ❖ **Origen:** El origen del sistema se ubicó en Meades Ranch, Kansas (Estados Unidos), considerado un punto central para minimizar errores en toda América del Norte. Este punto fue definido como fijo en la superficie terrestre.
- ❖ **Elipsoide de referencia:** Basado en el elipsoide Clarke 1866, que ajusta bien el geoide en América del Norte.

Semieje mayor: 6,378,206.4 metros.
- ❖ **Tipo de sistema:** No geocéntrico: Su origen no se encuentra en el centro de masa de la Tierra, lo que lo hace menos preciso en aplicaciones globales modernas.

Localmente ajustado para la región de América del Norte.
- ❖ **Proyección cartográfica:** Comúnmente asociado con sistemas como UTM (Universal Transverse Mercator) y proyecciones cónicas para cartografía en zonas limitadas.
- ❖ **Región de cobertura:** Incluyó Estados Unidos, Canadá, México, América Central y el Caribe, con aplicaciones limitadas a su área de ajuste.

Ventajas del Datum NAD27

- ❖ **Alta precisión regional:** Diseñado para ajustarse específicamente al geoide en América del Norte, proporcionando mapas topográficos precisos en esta región.
- ❖ **Base para desarrollo cartográfico:** Sirvió como referencia para la elaboración de mapas nacionales y catastrales en varios países.
- ❖ **Facilidad de uso con la tecnología de la época:** Compatible con métodos tradicionales de levantamiento geodésico, como la triangulación.

Limitaciones del Datum NAD27

- ❖ **No geocéntrico:** Debido a que no está alineado con el centro de masa de la Tierra, no es adecuado para aplicaciones globales modernas como navegación por satélite.
- ❖ **Falta de precisión en otras regiones:** Aunque es preciso en América del Norte, su precisión disminuye en regiones alejadas de su origen, como América del Sur.
- ❖ **Obsolescencia:** Fue reemplazado por el NAD83 y otros sistemas más modernos, como WGS84, debido a las necesidades de precisión en aplicaciones globales.

Reemplazo por NAD83

El NAD83 (North American Datum 1983) sustituyó al NAD27, introduciendo un sistema geocéntrico basado en el elipsoide GRS80, con mayor precisión y compatibilidad para aplicaciones globales y modernas.

Aplicaciones históricas del Datum NAD27

- **Cartografía nacional:** Base para mapas topográficos y catastrales en América del Norte, América Central y el Caribe.
- **Sistemas de coordenadas locales:** Usado en sistemas de coordenadas proyectadas como UTM y Lambert.
- **Proyectos de infraestructura:** Fundamental para el diseño de redes de transporte, energía y obras civiles en el siglo XX.

El Datum NAD27 fue un pilar para la geodesia y cartografía en América, pero sus limitaciones llevaron a su reemplazo por sistemas más modernos como NAD83 y WGS84, que ofrecen mayor precisión y adaptabilidad global.

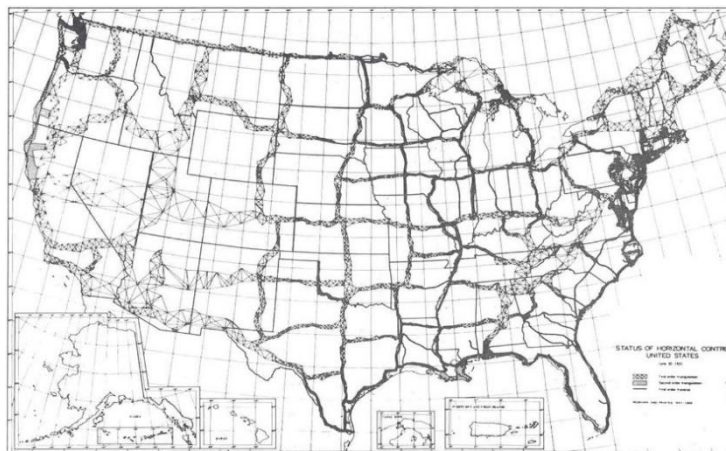


Figura N° 25. Representación del Datum NAD27.

Fuente: Gisgeography.com

3.2.3. Sistema de referencia local moderno.

Un sistema de referencia local moderno es un marco geodésico diseñado para representar con precisión la superficie terrestre en una región específica, utilizando tecnologías avanzadas como sistemas de posicionamiento global (GNSS) y datos actualizados sobre movimientos tectónicos. Estos sistemas están alineados con estándares globales, pero se adaptan a las necesidades y particularidades locales.

Características de un sistema de referencia local moderno

- ❖ **Basado en sistemas globales:** Generalmente están alineados con sistemas globales como el ITRS (International Terrestrial Reference System) o WGS84, garantizando compatibilidad internacional. Incorporan

ajustes específicos para reflejar la tectónica, geología y características físicas de la región.

- ❖ **Alta precisión:** Usan datos GNSS para definir posiciones con exactitud milimétrica. Toman en cuenta desplazamientos tectónicos y deformaciones locales.
- ❖ **Elipsoide de referencia:** Suelen emplear el GRS80 o el WGS84, que son modelos ampliamente aceptados y precisos.
- ❖ **Datum geodésico moderno:** Diseñado para corregir errores asociados a datums más antiguos, garantizando mayor exactitud en levantamientos y mapas.

Ejemplos de sistemas de referencia locales modernos

- ❖ **SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas):** Adoptado en América Latina, incluido El Salvador. Basado en el ITRF (International Terrestrial Reference Frame). Alineado con el elipsoide GRS80.
- ❖ **ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989):** Utilizado en Europa, ajustado a la placa tectónica Euroasiática. Compatible con GNSS y sistemas de navegación europeos.
- ❖ **GDA2020 (Geocentric Datum of Australia 2020):** Sistema moderno para Australia, ajustado a movimientos tectónicos locales. Basado en el elipsoide GRS80.

- ❖ **NAD83 (North American Datum 1983):** Reemplazo de NAD27 en América del Norte. Alineado con GRS80 y adaptado a las necesidades de Canadá, Estados Unidos.

Ventajas de los sistemas de referencia locales modernos

- ❖ **Compatibilidad internacional:** Alineados con estándares globales, lo que facilita el intercambio de datos entre países y sistemas.
- ❖ **Mayor precisión:** Incorporan tecnologías GNSS y correcciones tectónicas para mediciones milimétricas.
- ❖ **Soporte para aplicaciones avanzadas:** Esencial para sistemas de información geográfica (SIG), navegación satelital, monitoreo de desastres naturales y planificación territorial.
- ❖ **Actualizaciones regulares:** Los sistemas modernos se actualizan para reflejar cambios tectónicos y avances tecnológicos.

Aplicaciones

- **Cartografía y topografía:** Generación de mapas de alta precisión para infraestructura, planificación y manejo de recursos.
- **Gestión de riesgos naturales:** Monitoreo de movimientos tectónicos, deslizamientos de tierra y actividad volcánica.
- **Obras de infraestructura:** Diseño de carreteras, puentes y redes de transporte con precisión milimétrica.

- **Navegación y posicionamiento:** Soporte para GNSS y aplicaciones como transporte, agricultura de precisión y drones.

Un sistema de referencia local moderno combina precisión, adaptabilidad y compatibilidad con estándares globales, haciendo posible su uso en diversas aplicaciones científicas, tecnológicas y de desarrollo regional. En América Latina, el SIRGAS es el principal ejemplo de un sistema moderno ajustado a las necesidades locales.

3.2.4. Elipsoide WGS-84/GRS80/SIRGAS-ES2007

3.2.4.1. Elipsoide WGS84

El elipsoide WGS84 se puede usar como base para un sistema de referencia local, aunque está diseñado principalmente como un sistema de referencia global. En contextos locales, puede adoptarse cuando se requiere interoperabilidad con sistemas globales, como el GPS, o en regiones donde no se ha definido un sistema geodésico específico.

Características del WGS84 como sistema de referencia local

- ❖ **Compatibilidad global:** Su principal ventaja es que es el sistema base del GPS, lo que facilita su uso para navegación y posicionamiento en cualquier lugar del mundo.
- ❖ **Elipsoide de referencia:** Semieje mayor; 6,378,137 metros.

Achatamiento: Representa una aproximación global de la forma de la Tierra.

- ❖ **Geocéntrico:** El origen del sistema está en el centro de masa de la Tierra, lo que permite su aplicación global y su compatibilidad con otros sistemas modernos.
- ❖ **Proyecciones cartográficas locales:** Para su uso en sistemas locales, las coordenadas geográficas del WGS84 (latitud, longitud y altura) se proyectan en planos mediante sistemas como UTM (Universal Transverse Mercator) o proyecciones cónicas adaptadas a la región.
- ❖ **Adopción local:** En áreas donde no existen datums locales modernos o precisos, el WGS84 puede ser utilizado directamente para proyectos locales.

Ventajas del WGS84 como sistema de referencia local

- ❖ **Universalidad:** Su adopción mundial lo hace ideal para proyectos locales que necesitan interoperar con sistemas globales como GPS, SIG y mapas internacionales.
- ❖ **Precisión aceptable:** Aunque es un modelo global, proporciona una aproximación suficientemente precisa para muchas aplicaciones locales, especialmente en países sin sistemas geodésicos específicos.
- ❖ **Facilidad de uso:** Es compatible con la mayoría de herramientas modernas de geodesia, cartografía y navegación.

Limitaciones del WGS84 como sistema local

- ❖ **Falta de ajuste regional:** El WGS84 no toma en cuenta las particularidades locales, como movimientos tectónicos o anomalías gravitacionales.

Los sistemas locales modernos, como SIRGAS o ETRS89, pueden ser más precisos en regiones específicas.
- ❖ **Errores en proyectos de alta precisión:** En aplicaciones que requieren precisión milimétrica, como monitoreo tectónico o infraestructura crítica, el WGS84 puede no ser suficiente sin ajustes adicionales.
- ❖ **Adaptaciones necesarias:** En algunos casos, se requiere la transformación de coordenadas para integrarlo con sistemas locales existentes.

Usos del WGS84 como sistema de referencia local

- ❖ **Cartografía básica:** Generación de mapas y sistemas de información geográfica en áreas sin datums locales modernos.
- ❖ **Navegación:** Uso en sistemas GPS para ubicación y rutas en contextos locales.
- ❖ **Proyectos globales con enfoque local:** Infraestructura, agricultura de precisión, monitoreo ambiental y otros proyectos que necesiten compatibilidad con sistemas internacionales.

El WGS84 puede ser utilizado como sistema de referencia local cuando no se dispone de un sistema adaptado regionalmente o cuando se necesita compatibilidad con sistemas globales. Sin embargo, para aplicaciones que requieren alta precisión o ajustarse a características geográficas locales, es preferible usar un sistema como SIRGAS (en América Latina) o realizar ajustes locales al WGS84 para mejorar su precisión en la región.

3.2.4.2. El elipsoide GRS80

Elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System 1980) es un modelo matemático que describe la forma de la Tierra como un elipsoide de revolución. Fue adoptado en 1980 por la Asociación Internacional de Geodesia (IAG) y se utiliza como base para muchos sistemas modernos de referencia geodésica, como el NAD83 en América del Norte y el SIRGAS en América Latina.

Características principales del elipsoide GRS80

- ❖ **Definición global:** Diseñado para representar con precisión la forma promedio de la Tierra a nivel global.
- ❖ **Parámetros del elipsoide:** Semieje mayor; 6,378,137 metros. Distancia desde el centro de la Tierra al ecuador.
Achatamiento: Representa el grado de aplanamiento del elipsoide en los polos.
Semieje menor: 6,356,752.3141 metros. Distancia desde el centro de la Tierra a los polos.

- ❖ **Campo gravitacional:** Incluye un modelo del campo gravitacional de la Tierra, con valores precisos para la constante gravitacional y la velocidad angular.
- ❖ **Geocéntrico:** El centro del elipsoide coincide con el centro de masa de la Tierra, lo que permite aplicaciones globales y regionales.

Relación con otros sistemas

- **GRS80 y WGS84:** El GRS80 y el WGS84 tienen parámetros muy similares, ya que ambos están diseñados para representar la Tierra a nivel global.

La principal diferencia radica en que el WGS84 incluye constantes adicionales para aplicaciones satelitales.

- **Base de sistemas de referencia:** Es el elipsoide utilizado en sistemas como NAD83 (North American Datum 1983). En América del Norte.
SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas): En América Latina y el Caribe.
ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989): En Europa.

Ventajas del elipsoide GRS80

- ❖ **Alta precisión global:** Diseñado con datos geodésicos modernos y tecnología avanzada para representar con precisión el tamaño y la forma de la Tierra.

- ❖ **Compatibilidad con sistemas modernos:** Su estructura es compatible con sistemas GNSS (como GPS) y modelos gravitacionales globales.
- ❖ **Base de referencia regional:** Es el estándar para sistemas de referencia ampliamente utilizados en distintas regiones del mundo.

Limitaciones

- ❖ **No ajustado a características locales:** Aunque es preciso globalmente, el GRS80 no considera particularidades locales del geode. Para mayor precisión, se requiere un modelo geoidal complementario.
- ❖ **Transformaciones necesarias:** En aplicaciones locales, puede ser necesario transformar las coordenadas para ajustarlas a datums específicos.

Aplicaciones del elipsoide GRS80

- **Sistemas de referencia regionales:** Base para NAD83, SIRGAS y ETRS89, utilizados en cartografía, geodesia y navegación.
- **GNSS y SIG:** Integrado en sistemas de navegación satelital y análisis geoespacial.
- **Monitoreo tectónico:** Utilizado en estudios de deformación de placas tectónicas y movimientos terrestres.
- **Cartografía de precisión:** Generación de mapas detallados para planificación urbana, infraestructura y gestión de recursos naturales.

El elipsoide GRS80 es un modelo geodésico global de alta precisión, ampliamente utilizado en sistemas modernos de referencia y aplicaciones científicas. Su relevancia radica en su capacidad para representar con exactitud la forma promedio de la Tierra y en su integración en datums regionales como NAD83 y SIRGAS, que son esenciales para cartografía, navegación y geodesia a nivel local y global.

3.2.4.3. SIRGAS-ES2007

Para comprender el concepto de que es SIRGAS-ES2007, primero se necesita responder dos interrogantes que se muestran a continuación:

1. ¿Qué es un sistema o marco de referencia geodésico?

Un marco de referencia geodésico es un conjunto de convenciones y parámetros matemáticos que permiten determinar con precisión la posición de cualquier punto sobre la superficie terrestre, tanto en coordenadas horizontales (latitud, longitud) como verticales (altura).

Incluye: Un elipsoide de referencia (modelo matemático de la forma de la Tierra), Un sistema de coordenadas (tridimensional, geocéntrico), Una época de referencia (momento exacto en el tiempo para fijar coordenadas, por efectos del movimiento tectónico) y Un datum (la materialización física del sistema a través de redes de puntos geodésicos).

2. ¿Qué es SIRGAS?

SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) es el sistema geodésico oficial en América Latina y el Caribe, creado para unificar y modernizar los marcos de referencia de los países de la región. Sus principales características son:

- Basado en el Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS).
- Geocéntrico (el centro del sistema es el centro de masas de la Tierra).
- Compatible con tecnologías como GPS, GLONASS, Galileo, etc.
- Altísima precisión (centimétrica o mejor).
- Coordinado por instituciones científicas y geodésicas de cada país.

Por lo tanto, ¿Qué es SIRGAS-ES2007?

SIRGAS-ES2007 es el marco de referencia geodésico creado en el año 2007, sin embargo, oficialmente en El Salvador fue adoptado formalmente en el año 2021. Es la versión salvadoreña del sistema continental SIRGAS.

¿Por qué El Salvador adoptó SIRGAS-ES2007?

El Salvador, como muchos países de América, trabajaba con un sistema geodésico obsoleto (como NAD27), con limitaciones importantes:

- No compatible con GPS moderno.
- Basado en métodos tradicionales (triangulación).
- Errores de varios metros entre diferentes zonas del país.

- Moderniza el sistema nacional de coordenadas.
- Unifica todos los datos geospaciales oficiales.
- Permite usar tecnologías GNSS con precisión centimétrica.
- Mejora la interoperabilidad internacional.

Implementación: Red Geodésica Básica Nacional (RGBN-ES2007)

Para aplicar SIRGAS-ES2007, El Salvador instaló una red de puntos geodésicos distribuidos estratégicamente por todo el país. Cada uno tiene: Coordenadas determinadas por observación GNSS (GPS diferencial de alta precisión).

Validación con el marco internacional.

Publicación para su uso por instituciones, profesionales y empresas. Estos puntos sirven como referencia para:

- Cartografía oficial
- Levantamientos topográficos
- Catastro y propiedad inmueble
- Proyectos de ingeniería y obras públicas

Instituciones responsables

Centro Nacional de Registros (CNR) – Instituto Geográfico Nacional “Ing. Pablo Arnoldo Guzmán”

Usos actuales y ventajas

- Compatible con todos los sistemas GPS modernos.
- Ideal para la gestión de bases de datos espaciales (SIG/GIS).
- Fundamental para el ordenamiento territorial, la planificación urbana, y el diseño de infraestructura.
- Útil para monitoreo de deformaciones tectónicas, subsidencias o desplazamientos.
- Permite interoperabilidad internacional en proyectos de cooperación, desarrollo, y ayuda humanitaria.

3.3. DATUM WGS 84

El Sistema Geodésico Mundial 1984 (WGS84) es un datum definido a nivel mundial, desarrollado y mantenido por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA) de los Estados Unidos. Es coherente con el Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) a nivel de 1 cm. WGS84 nos permite relacionar una posición tridimensional con una coordenada consistente, en el formato latitud (Φ), longitud (λ), altura elipsoidal (H) y tiempo (t).

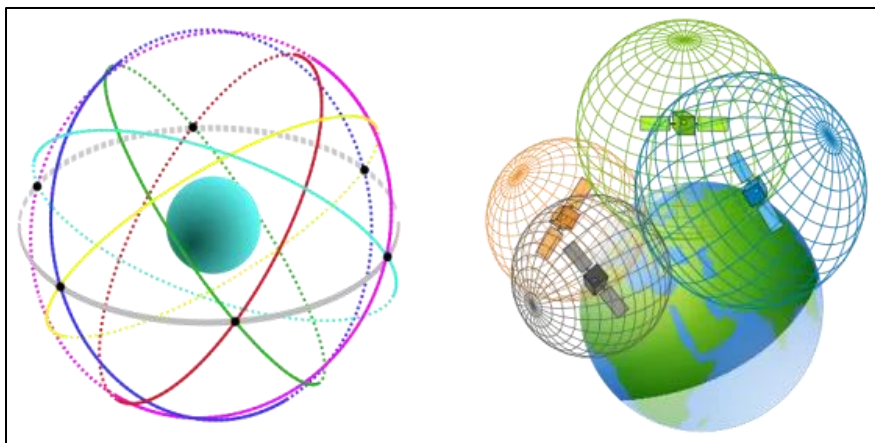


Figura N° 26. Datum WGS 84

Fuente: <https://Gisgeography.com>

Un datum geodésico es un sistema de referencia que define cómo se representan las posiciones.

Esto incluye:

- Un sistema de coordenadas
- Un elipsoide de referencia
- Modelos adicionales, como un modelo de deformación .

El elipsoide de referencia del sistema de referencia WGS84 también se denomina WGS84 y no tiene un modelo de deformación. Esto significa que cuando se compara el WGS84 con puntos fijos en el suelo, las coordenadas de esos puntos cambiarán con el tiempo. Estos cambios se deben al movimiento tectónico y a las variaciones en la distribución de la masa en el interior de la Tierra. Un sistema

de coordenadas cambiante como este se denomina dinámico o cinemático, lo que convierte al WGS84 en un sistema de referencia dinámico.

Elipsoides de referencia

Las placas tectónicas bajo Nueva Zelanda se mueven unos 5 cm por año, por lo que las coordenadas WGS84 cambian constantemente. Esto significa que las coordenadas en términos de WGS84 deben tener un tiempo asociado a ellas (t), en particular cuando se requiere una gran precisión.

3.3.1. Proyección Cartográfica

Una proyección cartográfica es una herramienta para representar la superficie curva de la Tierra en un plano. Debido a que la Tierra es un objeto tridimensional, cualquier intento de plasmar su superficie en un mapa presentará inevitablemente alguna forma de distorsión.

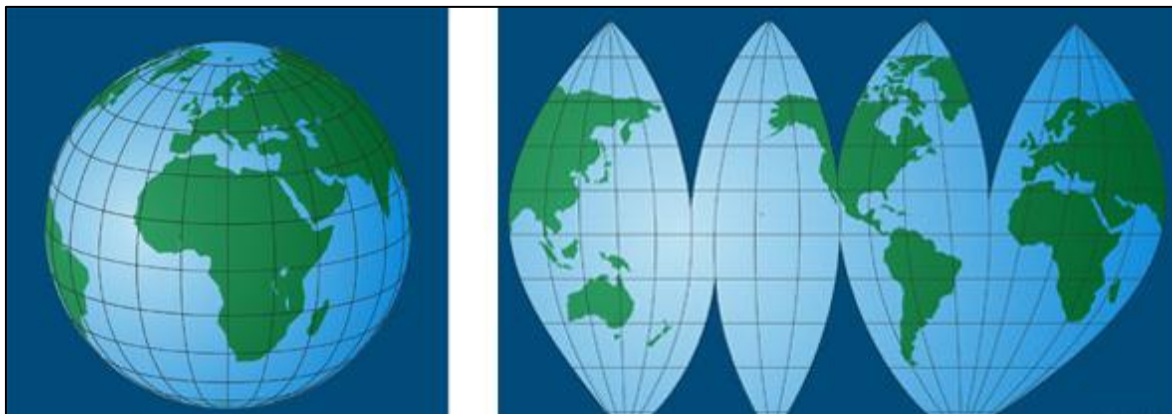


Figura N° 27. Proyección Cartográfica De La Tierra,

Fuente: Museovirtual.csic.es

Se trata de un procedimiento propio de la creación de mapas por parte de los cartógrafos, quienes deben guiarse por el sistema de coordenadas que componen los paralelos y meridianos terrestres para construir una representación espacial que sea fiel a las proporciones de la curvatura del planeta.

Esto, sin embargo, no puede hacerse sin un cierto margen de error, de modo que las proyecciones se estudian con el fin de disminuir la distorsión todo lo posible y preservar, en particular, los tres aspectos fundamentales de un mapa: las distancias, las superficies y las formas.

Características de las proyecciones cartográficas

Las principales características de las proyecciones cartográficas son:

- Se trata de herramientas para representar en un plano la superficie esférica de la Tierra.
- Producen siempre cierta distorsión en las distancias, las formas o los tamaños representados.
- Existen distintos tipos de proyecciones: cilíndricas, cónicas y acimutales.
- La proyección de Mercator es la más utilizada a nivel mundial.

Propiedades de una proyección cartográfica

Todas las proyecciones cartográficas presentan rasgos característicos que se vinculan con el tipo de transformación o el procedimiento geométrico empleado para realizarlas. Así, una proyección puede responder a una o dos de las siguientes propiedades, pero en ningún caso puede cumplir con las tres al mismo tiempo:

- **Equidistancia.** La proyección es fiel a las distancias del original y mantiene su proporción en la escala correspondiente en la mayor parte del mapa. En algunos sectores, la distorsión de las distancias es inevitable y las áreas y las formas aparecen alteradas.
- **Equivalencia.** La proyección es fiel a las áreas de las superficies del original, es decir, no distorsiona la extensión, pero las formas pueden estar modificadas.
- **Conformidad.** La proyección es fiel a las formas y los ángulos del original, es decir, no distorsiona la silueta o la apariencia de la superficie representada, pero se distorsionan los tamaños.

La elección de una proyección cartográfica u otra depende de las necesidades específicas del mapa y de las propiedades geográficas que se desean resaltar o preservar.

Tipos de proyecciones cartográficas

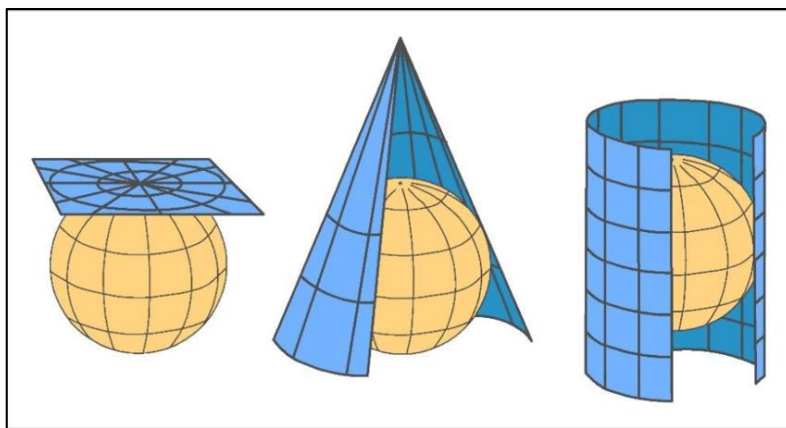


Figura N° 28. Tipos De Proyecciones

Fuente: www.goconqr.com

En las proyecciones cónicas los meridianos se vuelven líneas rectas.

Para clasificar las proyecciones cartográficas, generalmente se utiliza el criterio de la figura geométrica que la inspira:

- **proyecciones cilíndricas.** Son las proyecciones que emplean un cilindro imaginario como superficie del mapa. Estas proyecciones respetan más fielmente las formas, pero a medida que aumenta la distancia al ecuador se produce una mayor y más notoria distorsión de las distancias y las superficies. La proyección de Mercator, la más utilizada a nivel mundial, es un tipo de proyección cilíndrica.



Figura N° 29. Proyección Cilíndrica

Fuente: Blogdesecundaria.wordpress.com

Proyecciones cónicas. De manera similar a las cilíndricas, estas proyecciones se obtienen al ubicar la esfera terrestre dentro de la curvatura interior de un cono imaginario, sobre el cual se proyectan los paralelos y los meridianos. Estas proyecciones convierten los meridianos en líneas rectas que parten del polo y los paralelos, en circunferencias concéntricas dentro del cono. El mapa obtenido es ideal para representar las latitudes medias, porque la distorsión aumenta a medida que se avanza hacia los polos. Un ejemplo de proyección cónica es la de Lambert.

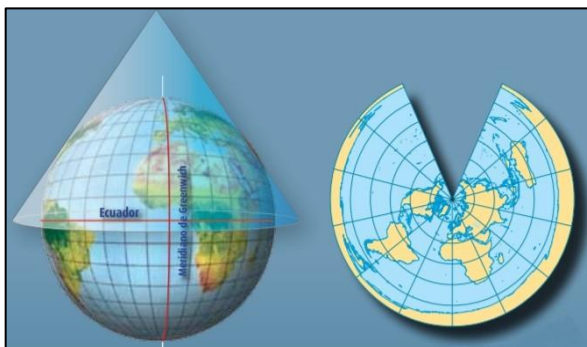


Figura N° 30. Proyección Cónica.

Fuente: Blogdesecundaria.wordpress.com

- **Proyecciones acimutales.** También llamadas proyecciones cenitales, se obtienen al colocar la esfera terrestre sobre un plano imaginario, tangente a la esfera misma (como si se mirara el planeta desde arriba), sobre el cual se proyectan los meridianos y los paralelos. Estas proyecciones son más fieles en las regiones de altas latitudes, pero presentan una creciente distorsión cuanto mayor es la distancia a los polos, de modo que no son utilizadas para representar latitudes medias o la región ecuatorial.

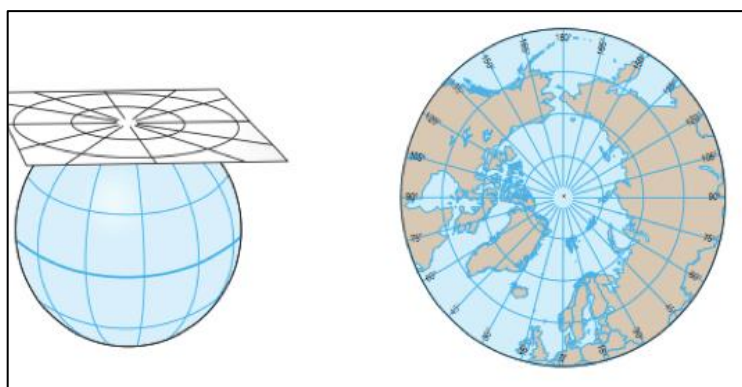


Figura N° 31. Proyección Azimutal.

Fuente: www.educaplay.com

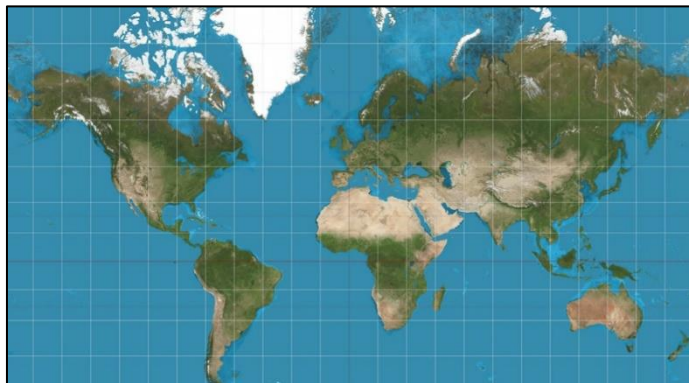


Figura N° 32. Geógrafo Gerardus Mercator

Fuente: [Es.wikipedia.org](https://es.wikipedia.org)

Ejemplos de proyecciones cartográficas

La proyección de Winkel-Tripel se considera el mejor modelo de representación terrestre.

Las principales y más conocidas proyecciones cartográficas son:

- **La proyección de Mercator.** Creada por el geógrafo y matemático alemán Gerardus Mercator (1512-1594) en 1569, es una de las proyecciones terrestres más utilizadas de la historia, sobre todo en la confección de mapas para la navegación durante el siglo XVIII. Es una proyección de tipo cilíndrica que respeta la forma de los continentes, pero distorsiona notoriamente los tamaños, en especial en aquellas regiones alejadas del ecuador. Por esta razón, por ejemplo, Groenlandia aparece del mismo tamaño que África, cuando en realidad África es quince veces más extensa.

- **La proyección de Lambert.** También llamada “proyección conforme de Lambert”, fue creada en 1772 por el físico, filósofo y matemático franco-alemán Johann Heinrich Lambert (1728-1777). Se trata de una proyección cónica que mantiene las formas, lo que es útil para mapas topográficos y meteorológicos, y es particularmente adecuada para regiones de latitudes medias.
- **La proyección de Gall-Peters.** Creada por el clérigo escocés James Gall (1808-1895) en 1855, esta proyección apareció por primera vez en la revista *Scottish Geographical Magazine*. Su popularización y puesta en práctica le correspondió al cineasta alemán Arno Peters (1916-2002) más de cien años después, en 1973, y por esa razón lleva el nombre de ambos. Esta proyección evita la exageración de las áreas de las regiones de altas latitudes, como sucede en la proyección de Mercator, pero distorsiona las formas, estira las áreas cercanas al ecuador y comprime las áreas cercanas a los polos.
- **La proyección de Van der Grinten.** Creada en 1904 por el cartógrafo germano-estadounidense Alphons J. van der Grinten (1852-1921), presenta la totalidad del globo en un círculo. No es ni conforme ni equivalente, sino que intenta minimizar las distorsiones en forma, área y distancia en gran parte del mapa, aunque presenta fuertes alteraciones en las zonas polares.

- **La proyección de Aitoff.** Propuesta en 1889 por el cartógrafo ruso David Aitoff (1854-1933), es una proyección cenital o acimutal poco equivalente y poco conforme, construida a partir de la distorsión de la escala horizontal para tornar la esfera terrestre en una elipse dos veces más ancha que alta.
- **La proyección de Robinson.** Creada en 1963 por el geógrafo estadounidense Arthur H. Robinson (1915-2004), surgió como respuesta al debate que se dio a mediados del siglo XX sobre una representación más justa del planeta. Su propósito era mostrar el mapamundi de manera sencilla, de modo que no es ni equidistante ni equivalente ni conforme, sino que asume sus distorsiones (las más importantes en la región polar y en las latitudes altas).
- **La proyección de Winkel-Tripel.** Se trata de una proyección geográfica acimutal modificada, propuesta por Oscar Winkel en 1921, a partir de la combinación de la proyección de Aitoff y una proyección cilíndrica equidistante. Fue adoptada por la National Geographic Society en 1998, y desde entonces se considera el mejor modelo de representación terrestre.

¿Por qué las proyecciones cartográficas presentan distorsiones?

La Tierra es un esferoide, es decir, tiene una forma curva en tres dimensiones. Cuando se intenta plasmar esta superficie curva en un plano bidimensional, como una hoja de papel o una pantalla, se debe “desenrollar” o “aplanar” esa superficie.

3.3.2. Cónica Conformal De Lambert

La proyección cónica de Lambert es de una de las proyecciones cónicas más empleadas. Fue presentada en 1772 por Lambert bajo su nombre, con una aplicación principal para regiones de pequeña extensión.

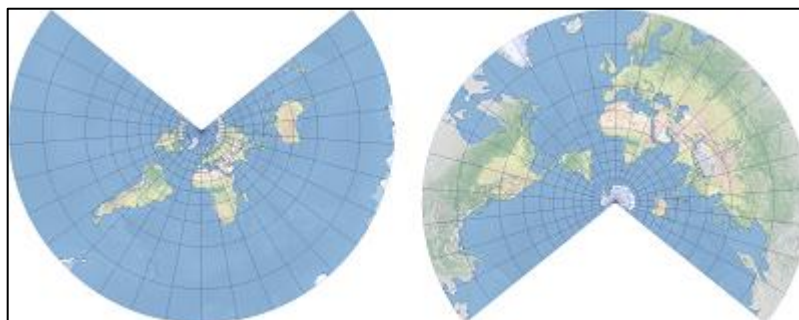


Figura N° 33. Proyección Cónica Conforme de Lambert

Fuente: Desktop.arcgis.com

Su construcción comienza por la representación de la esfera sobre una superficie auxiliar, que se trata de un cono circunscrito a lo largo de un paralelo. Posteriormente este paralelo se desarrolla sobre un plano. No se trata de una proyección geométrica, debido a que la separación entre los paralelos se calcula analíticamente de forma que, se obtiene una **representación conforme**, tal y como ocurre en la proyección de Mercator.

Los meridianos aparecen como rectas concurrentes (en el punto que corresponde al vértice del cono en el desarrollo) y forman ángulos iguales entre sí los que tienen la misma diferencia de longitud.

Los paralelos por su parte, se representan mediante circunferencias concéntricas (respecto al punto anteriormente mencionado).

Se trata de una proyección que fue reglamentaria en todos los mapas militares a gran escala, eligiéndose el cono tangente a lo largo del paralelo de 40° . Para el cálculo definitivo, se decidió que dicho cono secante a dos paralelos situados, aproximadamente, a $2^{\circ} 50'$ al Norte y al Sur del paralelo 40° .

Coordenadas Lambert.

En España, la cartografía militar ha empleado durante mucho tiempo las coordenadas y la cuadrícula de este sistema. Como ejes OY, OX, se eligieron como meridiano central el de Madrid y la recta perpendicular en su intersección con el paralelo 40° , siendo el origen un punto próximo a Aranjuez.

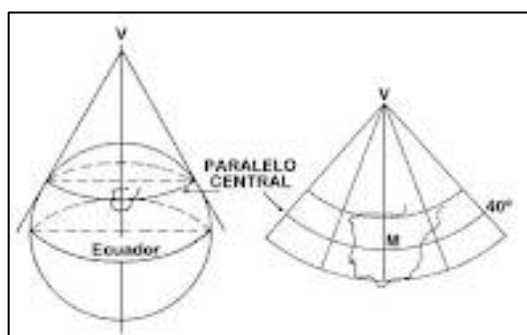


Figura N° 34. Paralelo Central.

Fuente: Detopografia.blogspot.com

Por tanto, las rectas de la cuadrícula no son ni meridianos ni paralelos, si no, paralelos a ellos. Además, para evitar las coordenadas negativas se trasladó el origen 600 kilómetros al Oeste y 600 kilómetros al Sur.

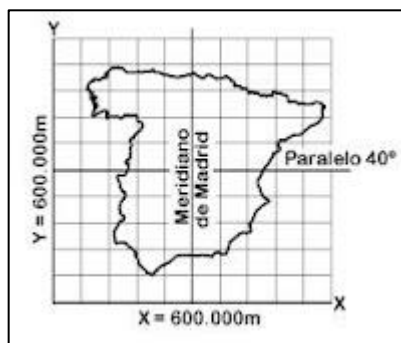


Figura N° 35. Meridiano de Madrid

Fuente: Detopografia.blogspot.com

Sin embargo, para los mapas de Canarias, se emplea otro cono auxiliar distinto, donde cuyo centro del mapa, con coordenadas $x = 400$, $y = 400$, es la intersección del meridiano de longitud 12° al Oeste de Madrid y el paralelo de latitud $28^\circ 30'$.

CAPÍTULO IV. SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE (GNSS)

Los sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) incluyen constelaciones de satélites que orbitan la Tierra y transmiten sus ubicaciones en el espacio y el tiempo, redes de estaciones de control terrestres y receptores que calculan posiciones terrestres por trilateración. Los GNSS se utilizan en todas las formas de transporte: estaciones espaciales, aviación, transporte marítimo, ferroviario, por carretera y de masas. El posicionamiento, la navegación y la sincronización (PNT) desempeñan un papel fundamental en las telecomunicaciones, la topografía, la aplicación de la ley, la respuesta a emergencias, la agricultura de precisión, la minería, las finanzas, la investigación científica, etc. Se utilizan para controlar redes informáticas, tráfico aéreo, redes eléctricas y más.



Figura N° 36. Sistema Global de Navegación por Satélite

Fuente: www.mobatime.com

En la actualidad, el GNSS incluye dos sistemas globales plenamente operativos, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los Estados Unidos y el Sistema Global de Navegación por Satélite (GLONASS) de la Federación Rusa , así como los sistemas globales y regionales en desarrollo, a saber, el Sistema Europeo de Navegación por Satélite (GALILEO) de Europa y el COMPASS/Bei-Dou de China , el Sistema Regional de Navegación por Satélite (IRNSS) de la India y el Sistema de Satélite Quasi-Zenith (QZSS) de Japón . Una vez que todos estos sistemas globales y regionales estén plenamente operativos, el usuario tendrá acceso a señales de posicionamiento, navegación y temporización de más de 100 satélites.

Además de estos, existen sistemas de aumentación basados en satélites, como el Sistema de Aumentación de Área Amplia (WAAS) de los Estados Unidos , el Servicio Europeo de Superposición de Navegación Geoestacionaria (EGNOS) , el Sistema Ruso de Corrección Diferencial y Monitoreo (SDCM), el Sistema Indio de Navegación Geo Aumentada Asistida por GPS (GAGAN) y los Sistemas de Aumentación Basados en Satélites (MSAS) del Satélite de Transporte Multifuncional (MTSAT) japonés. Combinarlos con tecnologías terrestres probadas, como la navegación inercial, abrirá la puerta a nuevas aplicaciones para beneficios socioeconómicos. Estas últimas son aplicaciones que requieren no solo precisión, sino en particular confiabilidad o integridad. Las aplicaciones de transporte críticas para la seguridad, como el aterrizaje de aeronaves civiles, tienen estrictos requisitos de precisión e integridad.

La culminación con éxito de la labor del Comité Internacional de Sistemas de Navegación Global (ICG) , en particular en lo que respecta al establecimiento de la interoperabilidad entre los sistemas mundiales, permitirá a los usuarios de GNSS utilizar un instrumento para recibir señales de múltiples sistemas de satélites. Esto proporcionará datos adicionales, en particular en las regiones urbanas y montañosas, y una mayor precisión en las mediciones de tiempo o posición. Para beneficiarse de estos logros, los usuarios de GNSS deben mantenerse al día de los últimos avances en las áreas relacionadas con GNSS y desarrollar la capacidad para utilizar la señal multi-GNSS.

Así pues, los objetivos específicos de la aplicación del área prioritaria del GNSS del Programa de las Naciones Unidas de aplicaciones espaciales son la demostración y comprensión de las señales, los códigos, los sesgos y las aplicaciones prácticas del GNSS, y las implicaciones de una posible modernización.

4.1. Sistema de Posicionamiento Global (GPS)

¿Qué es el GPS?

El Sistema de Posicionamiento Global (GPS) es un sistema de radionavegación espacial, propiedad del Gobierno de los Estados Unidos y operado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos (USAF). Puede determinar una posición tridimensional con una precisión de un metro y una hora de 10 nanosegundos en todo el mundo y las 24 horas del día, los 7 días de la semana.

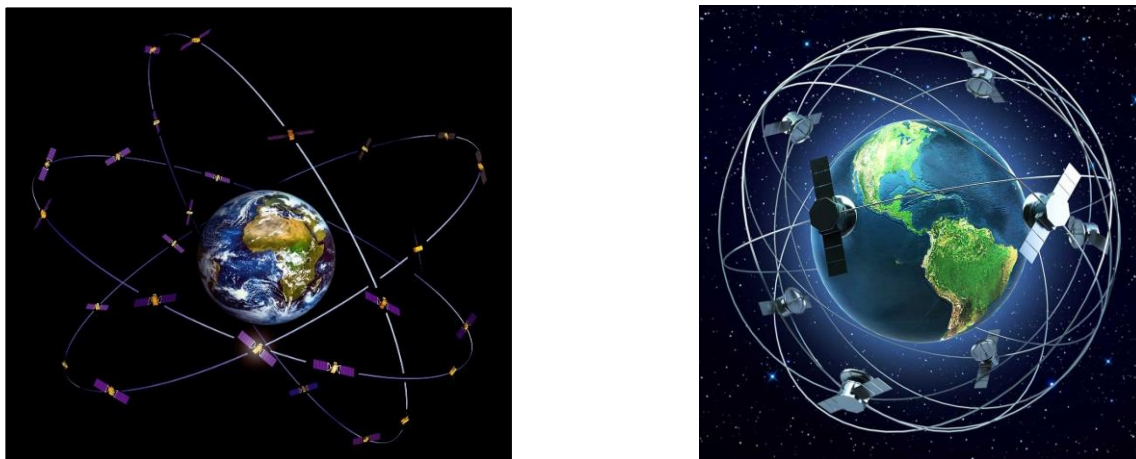


Figura N° 37. Sistema de Posicionamiento Global

Fuente: Newatlas.com

El GPS se compone de tres partes diferentes:

- **Segmento espacial:** Una constelación de al menos 24 satélites del gobierno de Estados Unidos distribuidos en seis planos orbitales inclinados 55° desde el ecuador en una órbita terrestre media (MEO) a unos 20.200 kilómetros (12.550 millas) y que giran alrededor de la Tierra cada 12 horas.
- **Segmento de Control:** Estaciones en la Tierra que monitorean y mantienen los satélites GPS.
- **Segmento de usuario:** Receptores que procesan las señales de navegación de los satélites GPS y calculan la posición y la hora.

Historia del GPS

El GPS tiene sus orígenes en la era del Sputnik, cuando los científicos pudieron rastrear el satélite con cambios en su señal de radio, conocido como el “efecto Doppler”, que se convirtió en la idea fundamental del GPS moderno. Hoy en día, la constelación de satélites GPS (el segmento espacial) consta de más de 30 satélites operativos, cada uno equipado con relojes atómicos redundantes y rastreado por una red de control terrestre (el segmento de control). Cada satélite transmite su posición y hora a intervalos regulares y esas señales son interceptadas por receptores GPS (el segmento de usuario). El receptor puede determinar su posición calculando cuánto tiempo tardaron las señales en llegar a él.

A principios de los años 70, el Departamento de Defensa (DoD) quería asegurarse de que hubiera un sistema de navegación por satélite robusto y estable. Tras adoptar ideas previas de científicos de la Marina, el DoD decidió utilizar satélites para respaldar su sistema de navegación propuesto. Luego, el DoD siguió adelante y lanzó su primer satélite con sistema de navegación con medición de tiempo y distancia (NAVSTAR) en 1978. El sistema de 24 satélites comenzó a funcionar plenamente en 1993.

En la actualidad, el GPS es un sistema de radionavegación espacial multiusos propiedad del Gobierno de los Estados Unidos y operado por la Fuerza Aérea de los Estados Unidos para satisfacer las necesidades de defensa nacional,

seguridad interior, civiles, comerciales y científicas. El GPS actualmente proporciona dos niveles de servicio: el Servicio de posicionamiento estándar (SPS), que utiliza el código de adquisición aproximada (C/A) en la frecuencia L1, y el Servicio de posicionamiento preciso (PPS), que utiliza el código P(Y) en las frecuencias L1 y L2. El acceso al PPS está restringido a las Fuerzas Armadas de los Estados Unidos, las agencias federales de los Estados Unidos y las fuerzas armadas y gobiernos aliados seleccionados. El SPS está disponible para todos los usuarios de forma continua y en todo el mundo, sin ningún cargo directo para el usuario. Las capacidades específicas proporcionadas por el SPS se publican en las Normas y especificaciones de rendimiento del sistema de posicionamiento global .

El uso del GPS por parte de la NASA

La misión de la NASA de ser pionera en el futuro de la exploración espacial, el descubrimiento científico y la investigación aeronáutica requiere el desarrollo y la implementación proactivos de una serie de aplicaciones GPS que permitan una mayor autonomía de las naves espaciales y aplicaciones más avanzadas de ciencia espacial y monitoreo de la Tierra. Para lograr esto, la NASA trabaja junto con la USAF para continuar mejorando las capacidades GPS para respaldar las operaciones espaciales y las aplicaciones científicas.

Comunicaciones espaciales

Los usuarios de la NASA en órbita pueden determinar su posición y hora mediante el seguimiento de canales de comunicación a través de la Red de Espacio Profundo (DSN) , la Red de Espacio Cercano (NSN) o mediante medios de a bordo para procesar señales de radionavegación unidireccionales de los Sistemas de Navegación por Satélite Global (GNSS), como el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) de los EE. UU. La DSN también es capaz de soportar el seguimiento desde la Órbita Terrestre Baja (LEO) a través de dominios de transferencia interplanetaria. Si bien las misiones de la NASA utilizan principalmente el seguimiento de canales de comunicación por parte de la DSN y la NSN para el análisis de trayectorias, las misiones individuales pueden optar por utilizar también mediciones GPS como observable o respaldo hasta la Órbita Geosíncrona (GEO - 36.000 km) a medida que la aceptación del GPS como fuente de posicionamiento se generaliza.

Determinación de la órbita y trayectoria de naves espaciales

Tradicionalmente, las misiones espaciales han determinado su órbita mediante el seguimiento de canales de comunicación, en el que una instalación de dinámica de vuelo utiliza información de posicionamiento de señales de comunicación bidireccionales entre la nave espacial y una estación terrestre o satélite de retransmisión para calcular la órbita de la nave espacial. Alternativamente, las misiones que optan por utilizar GPS para determinar su

posición rastrean las señales de radionavegación de los satélites GPS y procesan estas señales a bordo para determinar la posición y la hora. Esto aumenta la autonomía de la nave espacial, permite nuevos métodos de operaciones de vuelo espacial y reduce la carga sobre las estaciones de seguimiento de la NASA.



Figura N° 38. Satélites de GPS

Fuente: www.elespanol.com

Aplicaciones científicas

El GPS se utiliza como herramienta de teledetección para apoyar las ciencias atmosféricas e ionosféricas, la geodesia y la geodinámica, desde el monitoreo de los niveles del mar y el derretimiento del hielo hasta la medición del campo gravitatorio de la Tierra. SCAN y la Dirección de Misiones Científicas de la NASA se han asociado para mejorar el rendimiento de la constelación GPS mediante la promoción de políticas para mejoras de modernización a través del proceso de requisitos del GPS, el Comité Ejecutivo Nacional de Posicionamiento,

Navegación y Temporización Basados en el Espacio (PNT) y el Consejo Asesor Nacional de PNT Basados en el Espacio.

Aplicaciones del GPS en las ciencias de la Tierra

NASA

Un ejemplo es el liderazgo de la NASA en un equipo interinstitucional que trabaja para colocar retrorreflectores láser en la próxima generación de GPS, conocida como GPS III. La habilitación de la medición de distancias láser por satélite para GPS y otras constelaciones GNSS permite identificar y corregir errores sistemáticos en los datos radiométricos. Esta información podría utilizarse para mejorar el marco de referencia terrestre centrado en la Tierra en el que se basa el posicionamiento GPS, lo que daría lugar a precisiones de nivel milimétrico. Esto generaría un aumento espectacular en el rendimiento y la precisión que permitiría a los científicos de todo el mundo hacer cosas como medir los efectos del cambio climático mediante el seguimiento del derretimiento del hielo o los niveles del mar. SMD está planeando comprar los reflectores, al mismo tiempo que continúa financiando el Sistema Internacional de Medición de Distancias Láser (ILRS), que es una red internacional de estaciones de seguimiento láser terrestres. La misión principal del ILRS es apoyar la investigación geodésica y geofísica.

Autonomía de las operaciones de las naves espaciales

El GPS y otros sistemas GNSS como la constelación rusa GLONASS pueden utilizarse para permitir una navegación más autónoma a bordo. La navegación basada en GPS utiliza señales unidireccionales de los satélites GPS para determinar la trayectoria de la nave espacial a través de sus instrumentos y procesamiento de datos a bordo. El GPS actualmente proporciona posición y hora tridimensionales a bordo en tiempo real con una precisión del 95% de aproximadamente 10 metros en horizontal y 20 metros en vertical según los estándares de rendimiento, sin embargo, en realidad el rendimiento real de la misión puede ser mucho mejor dependiendo del escenario o la aplicación. El GPS también puede proporcionar sincronización horaria precisa y determinación de actitud (en lugar de otros sensores, como los rastreadores de estrellas). Se ha demostrado que el error de guardabosques del usuario (URE) real en un promedio global es tan preciso como un metro o mejor en los últimos años.

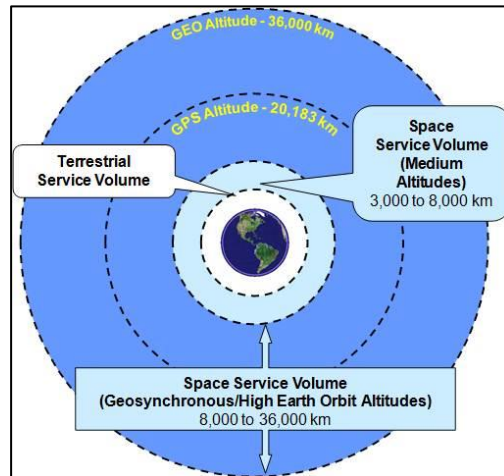


Figura N° 39. Altitud de los Sistemas de GPS

Fuente: www.nasa.gov

Desarrollo de receptor GPS

La NASA ha desarrollado y continúa mejorando receptores científicos y de vuelo GPS que ya están en uso.

Beneficios del GPS para los usuarios en órbita terrestre alta

- Mejora significativamente el rendimiento de la navegación en tiempo real desde la clase de kilómetros a la clase de metros.
- Admite una recuperación rápida de maniobras de trayectoria de 5 a 10 horas a minutos.
- Las capacidades de cronometraje reducen la necesidad de que una nave espacial cuente con costosos relojes a bordo.

- Apoya una mayor autonomía de los satélites, lo que reduce los costos de operaciones de la misión.
- Permite capacidades nuevas y mejoradas y un mejor rendimiento para los usuarios en órbita terrestre alta y en el espacio cislunar.

El futuro del GPS

Las proyecciones de lanzamiento de naves espaciales comerciales y gubernamentales en todo el mundo durante las próximas dos décadas muestran que aproximadamente el 60 por ciento de las misiones futuras operarán en órbita baja terrestre y el 95 por ciento de las misiones operarán en órbita geoestacionaria o por debajo de ella. La NASA seguirá protegiendo las inversiones actuales y mejorando las capacidades existentes trabajando junto con otras agencias del gobierno de los EE. UU. y buscando la compatibilidad e interoperabilidad con otras constelaciones del Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).

Dado que la mayoría de las misiones futuras utilizarán señales de satélite GPS para el seguimiento, la NASA está desarrollando receptores GPS especializados para aplicaciones espaciales, muchos de los cuales ya están en uso:

- El receptor Navigator del Centro de Vuelos Espaciales Goddard (GSFC) de la NASA utiliza la señal L1 C/A. Este receptor voló en la Misión de Servicio 4 para el Telescopio Espacial Hubble en mayo de 2009 y demostró ser muy exitoso. Varias misiones futuras en órbitas altas,

geoestacionarias y medias espaciales tienen previsto trabajar con este receptor utilizando sus capacidades de adquisición y seguimiento de señales de alta sensibilidad.

- El receptor GPS BlackJack Flight del Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) utiliza las frecuencias L1 y L2, y ya hay dieciocho receptores en órbita que rastrean señales GPS. El nuevo receptor Triple GNSS (TriG) está en desarrollo y tiene la capacidad de rastrear una serie de señales GPS y otras señales GNSS, incluidas las constelaciones rusa GLONASS y europea Galileo.

4.2. Sistema Global De Navegación Por Satélite (GLONASS)

GLONASS fue desarrollado por la Unión Soviética como un sistema experimental de comunicaciones militares durante la década de 1970. Cuando terminó la Guerra Fría, la Unión Soviética reconoció que GLONASS tenía aplicaciones comerciales gracias a la capacidad del sistema para transmitir transmisiones meteorológicas, comunicaciones, datos de navegación y reconocimiento.

El primer satélite GLONASS se lanzó en 1982 y el sistema se declaró plenamente operativo en 1993. Tras un período en el que el rendimiento del GLONASS disminuyó, Rusia se comprometió a aumentar el sistema hasta el mínimo requerido de 18 satélites activos. En la actualidad, GLONASS cuenta con un despliegue completo de 24 satélites en la constelación.

Los satélites GLONASS han evolucionado desde que se lanzaron los primeros. La última generación, GLONASS-M, preparándose para su lanzamiento.

Segmento espacial GLONASS

El segmento espacial GLONASS, consta de 24 satélites, en tres planos orbitales, con ocho satélites por plano.

La geometría de la constelación GLONASS se repite aproximadamente una vez cada ocho días. El período orbital de cada satélite es de aproximadamente $8/17$ de un día sideral, de modo que, después de ocho días siderales, los satélites GLONASS han completado exactamente 17 revoluciones orbitales.

Cada plano orbital contiene ocho satélites igualmente espaciados. Uno de los satélites estará en el mismo punto del cielo a la misma hora sideral cada día.

Los satélites están colocados en órbitas nominalmente circulares con inclinaciones objetivo de 64,8 grados y un radio orbital de 19.140 kilómetros (11.893 millas), aproximadamente 1.060 kilómetros (659 millas) más bajo que los satélites GPS.



Figura N° 40. Sistema GLONASS

Fuente: En.wikipedia.org

Satélites: 24 Mas De 3 Repuestos

Planos Orbitales: 3

Inclinación Orbital: 64.8 Grados

Radio De La Orbita: 19.140 Km (11.893 Millas)

La señal del satélite GLONASS identifica el satélite e incluye:

- Información de posicionamiento, velocidad y aceleración para calcular la ubicación de los satélites
- Información sanitaria por satélite
- Desplazamiento de la hora GLONASS respecto de UTC (SU) (Tiempo Universal Coordinado de Rusia)

- Almanaque de todos los satélites GLONASS

Segmento de control GLONASS

El segmento de control de GLONASS está formado por el centro de control del sistema y una red de estaciones de seguimiento de mando repartidas por toda Rusia. De forma similar al GPS, el segmento de control de GLONASS supervisa el estado de los satélites, determina las correcciones de las efemérides y las desviaciones del reloj de los satélites respecto de la hora GLONASS y la UTC. Dos veces al día, envía las correcciones a los satélites.

Tabla N° 1. Transmisión de frecuencias de GLONASS

	1598,0625-1609,3125 MHz	L1 Está Modulada Por Las Señales Hp (Alta Precisión) Y SP (Precisión Estándar).
	1242,9375-1251,6875 MHz	La L2 Está Modulada Por Las Señales Hp Y Sp. El Código Sp Es Idéntico Al Que Se Transmite En L1.
	1202,025 MHz	L3 Es Una Señal Civil Basada En Cdma.

Fuente: Novatel.com

Cada satélite GLONASS transmite en una frecuencia L1 y L2 ligeramente diferente, con el código P (código HP) y el código C/A (código SP) tanto en L1 como en L2. Los satélites GLONASS transmiten el mismo código en diferentes

frecuencias, una técnica conocida como FDMA (acceso múltiple por división de frecuencia). Tenga en cuenta que se trata de una técnica diferente de la utilizada por el GPS y las demás constelaciones GNSS.

Las señales GLONASS tienen la misma polarización (orientación de las ondas electromagnéticas) que las señales GPS y tienen una intensidad de señal comparable.

El sistema GLONASS se basa en 24 satélites que utilizan 14 frecuencias. Los satélites pueden compartir las frecuencias si los satélites antípodas transmiten en la misma frecuencia. Los satélites antípodas están en el mismo plano orbital, pero separados por 180 grados. Los satélites emparejados pueden transmitir en la misma frecuencia porque nunca aparecerán al mismo tiempo a la vista de un receptor en la superficie de la Tierra

Modernización del GLONASS

A medida que los satélites GLONASS-M actuales lleguen al final de su vida útil, serán reemplazados por satélites GLONASS-K de próxima generación. Los nuevos satélites proporcionarán al sistema GLONASS nuevas señales GNSS.

L3OC

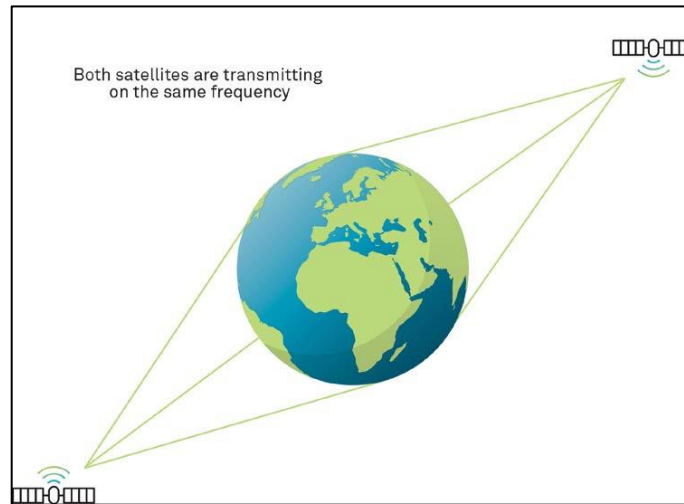


Figura N° 41. Satélites Antípodas GLONASS

Fuente: Novatel.com

El primer bloque de satélites GLONASS-K (GLONASS-K1) transmite la nueva señal civil, denominada L3, centrada en 1202,025 MHz. A diferencia de las señales GLONASS existentes, L3OC se basa en CDMA, lo que facilitará la interoperabilidad con otras constelaciones GNSS.

L3OC está disponible en 47 satélites a partir de 2022.

L1OC y L2OC

El segundo bloque de satélites GLONASS-K (GLONASS-K2) añade dos señales más basadas en CDMA transmitidas en las frecuencias L1OC y L2OC. Las señales FDMA L1 y L2 existentes también seguirán transmitiéndose para dar soporte a los receptores antiguos.

L5OCM

El tercer bloque de satélites GLONASS-K (GLONASS-KM) añadirá una señal CDMA L5 al sistema GLONASS, así como nuevas señales L1 y L3, que estarán en las mismas frecuencias que utilizan otras constelaciones GNSS y se denominarán L1OCM, L3OCM y L5OCM.

4.3. Sistema europeo de radionavegación por satélite (GALILEO)

Galileo es el sistema de navegación por satélite global de Europa, que proporciona un servicio de posicionamiento global garantizado y de gran precisión bajo control civil. Actualmente, Galileo ofrece servicios iniciales y es interoperable con GPS y GLONASS, los sistemas de navegación por satélite globales de Estados Unidos y Rusia. Al ofrecer frecuencias duales como estándar, Galileo puede proporcionar una precisión de posicionamiento en tiempo real de hasta metros.



Figura N° 42. Sistema GALILEO

Fuente: www.tecnologiaeinnovacion.defensa.gob.es

Servicios de Galileo

El sistema Galileo actual consta de 28 satélites en total. Todos ellos, menos dos, están situados en tres planos circulares de órbita media terrestre (MEO) a 23.222 km de altitud sobre la Tierra y con una inclinación de los planos orbitales de 56 grados respecto del ecuador. El par restante se colocó en órbitas incorrectas debido a un error del lanzador Soyuz y actualmente se utilizan para búsqueda y rescate, pero no como miembros operativos de la constelación.

Los primeros servicios estuvieron disponibles el 15 de diciembre de 2016. A medida que se vaya construyendo la constelación, se irán probando y poniendo a disposición nuevos servicios.

Las señales de navegación de Galileo proporcionan una buena cobertura incluso en latitudes de hasta 75 grados norte, lo que corresponde al Cabo Norte de Noruega, el extremo más septentrional de Europa, y más allá. El gran número de satélites, junto con el diseño cuidadosamente optimizado de la constelación, más la disponibilidad prevista de tres satélites activos de reserva por plano orbital, deberían garantizar que la pérdida de un satélite no tenga ningún efecto perceptible para el usuario.

Infraestructura terrestre

Se han instalado en Europa dos Centros de Control Galileo (CCG) para controlar los satélites y gestionar la misión de navegación. Los datos proporcionados por una red mundial de Estaciones de Sensores Galileo (SGS) se envían a los

Centros de Control Galileo a través de una red de comunicaciones redundante. Los CCG utilizan los datos de las Estaciones de Sensores para calcular la información de integridad y sincronizar la señal horaria de todos los satélites con los relojes de las estaciones terrestres. El intercambio de datos entre los Centros de Control y los satélites se realiza a través de estaciones de enlace ascendente.

Como característica adicional, Galileo ofrece una función global de búsqueda y salvamento (SAR), basada en el sistema operativo Cospas-Sarsat. Por ello, los satélites están equipados con un transpondedor, que puede transferir las señales de socorro desde los transmisores del usuario a los centros regionales de coordinación de salvamento, que a su vez iniciarán la operación de rescate.

Al mismo tiempo, el sistema enviará una señal de respuesta al usuario, informándole de que se ha detectado su situación y que la ayuda está en camino. Esta última característica es nueva y se considera una mejora importante en comparación con el sistema existente, que no proporciona retroalimentación al usuario.

Preparación para Galileo

Los satélites experimentales GIOVE-A y GIOVE-B se lanzaron en 2005 y 2008 respectivamente, y sirvieron para probar tecnologías críticas de Galileo, además de asegurar las frecuencias de Galileo dentro de la Unión Internacional de Telecomunicaciones.

Durante el periodo de pruebas, los instrumentos científicos también midieron diversos aspectos del entorno espacial alrededor del plano orbital, en particular el nivel de radiación, que es mayor que en las órbitas terrestres bajas o geoestacionarias.

Los lanzamientos de satélites operativos Galileo comenzaron en 2011 y se prolongaron durante el resto de la década.

4.4. Sistema De Navegación Por Satélite (BEIDOU)

El sistema de navegación por satélite BeiDou (BDS) ha sido construido y operado independientemente por China teniendo en cuenta las necesidades de seguridad nacional y desarrollo económico y social del país. Como infraestructura temporal y espacial de importancia nacional, el BDS proporciona servicios de posicionamiento, navegación y cronometraje de alta precisión en todo momento y en cualquier condición meteorológica a usuarios globales.



Figura N° 43. Sistema BEIDOU

Fuente: Es.topwar.ru

Desde su creación, el BDS se ha utilizado ampliamente en el transporte, la agricultura, la silvicultura, la pesca, el control hidrológico, la previsión meteorológica, las comunicaciones, el suministro de energía, el socorro en caso de desastres, la seguridad pública y otros campos, y ha prestado servicios a importantes infraestructuras nacionales, lo que ha dado lugar a notables beneficios económicos y sociales. Los servicios de navegación basados en BDS han sido ampliamente adoptados por empresas de comercio electrónico, fabricantes de terminales móviles inteligentes y proveedores de servicios basados en la localización, que han entrado ampliamente en los campos del consumo masivo, las economías compartidas y los relacionados con el sustento de las personas. Están surgiendo nuevos modos, formas de negocio y economías de las aplicaciones del BDS, que están cambiando profundamente la producción y la vida de las personas. China seguirá promoviendo las aplicaciones del BDS y el desarrollo industrial, a fin de servir a la construcción de la modernización del país y a la vida cotidiana de las personas, y de hacer contribuciones al desarrollo científico, tecnológico, económico y social global.

China aplica el principio de que “el BDS es desarrollado por China, dedicado al mundo y con el objetivo de ser de primera clase”, y está dispuesta a compartir los resultados de la construcción y el desarrollo del BDS con todos los demás países, para promover el desarrollo global de la navegación por satélite y hacer que los Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS) sirvan al mundo y beneficien a la humanidad. El BDS proporciona seguridad de la información

espacial y temporal para el desarrollo económico y social, y es uno de los logros importantes en los últimos 40 años de reforma y apertura de China, y sirve como un producto público global aportado por China al mundo. China seguirá promoviendo activamente los intercambios y la cooperación internacionales, a fin de lograr la compatibilidad e interoperabilidad con otros sistemas de navegación por satélite en el mundo y proporcionar a los usuarios globales un mayor rendimiento, más confiables y múltiples servicios.

La estrategia de desarrollo

A finales del siglo XX , China comenzó a explorar un camino para desarrollar un sistema de navegación por satélite adecuado a sus condiciones nacionales, y gradualmente formuló una estrategia de desarrollo de tres pasos: en 2000, se completó la construcción del BDS-1 para proporcionar servicios a China; en 2012, se completó la construcción del BDS-2 para proporcionar servicios a la región de Asia y el Pacífico; y la construcción del BDS-3 se completará para proporcionar servicios en todo el mundo en 2020.

Los Objetivos de Desarrollo

El desarrollo del BDS tiene como objetivo construir un sistema de navegación por satélite de clase mundial para satisfacer las necesidades de seguridad nacional del país, así como el desarrollo económico y social; proporcionar servicios continuos, estables y confiables para los usuarios globales; desarrollar las industrias relacionadas con el BDS para apoyar el desarrollo económico y social

de China, así como la mejora del nivel de vida de las personas; y mejorar la cooperación internacional para compartir los frutos del desarrollo en el campo de la navegación por satélite, aumentando los beneficios de la aplicación integral de los sistemas globales de navegación por satélite.

Los principios del desarrollo

China defiende los principios de “independencia, apertura, compatibilidad y gradualidad” en la construcción y desarrollo del BDS.

La independencia se refiere a mantener la construcción, el desarrollo y la operación independientes de BDS y a adquirir la capacidad de proporcionar de forma independiente servicios de navegación por satélite a usuarios globales.

La apertura se refiere a proporcionar servicios abiertos de navegación por satélite de forma gratuita y a fomentar la cooperación y el intercambio internacionales a gran escala, en múltiples niveles y de alta calidad.

La compatibilidad se refiere a mejorar la compatibilidad e interoperabilidad con otros sistemas de navegación por satélite y a fomentar las colaboraciones e intercambios internacionales, a fin de proporcionar mejores servicios a los usuarios.

La gradualidad se refiere a llevar a cabo el desarrollo del BDS en un enfoque por fases, para mejorar el rendimiento del servicio BDS e impulsar el desarrollo de

las industrias de navegación por satélite de una manera integral, coordinada y sostenible.

El objetivo futuro

Está previsto establecer para 2035 un sistema nacional de posicionamiento, navegación y cronometraje (PNT) más ubicuo, integrado e inteligente.

La arquitectura principal

BDS se compone principalmente de tres segmentos: un segmento espacial, un segmento terrestre y un segmento de usuario.

El segmento espacial BDS consta de una serie de satélites ubicados en la órbita terrestre geoestacionaria (GEO), la órbita geosincrónica inclinada (IGSO) y la órbita terrestre media (MEO).

El segmento terrestre del BDS consta de varias estaciones terrestres, incluidas estaciones de control maestro, estaciones de sincronización horaria/enlace ascendente, estaciones de monitoreo, así como instalaciones de operación y gestión del enlace entre satélites.

El segmento de usuarios de BDS está formado por diversos tipos de productos, sistemas y servicios básicos de BDS, así como aquellos compatibles con otros sistemas de navegación, incluidos productos básicos como chips, módulos y antenas, terminales, sistemas de aplicación y servicios de aplicación.

Características del BDS

El desarrollo del BDS sigue un modelo de desarrollo de capacidades de servicio regionales y, luego, de ampliación gradual de los servicios a nivel mundial. Esta práctica ha abierto el camino para la construcción de un sistema de navegación por satélite con características chinas y ha enriquecido los modelos de desarrollo de sistemas de navegación por satélite en todo el mundo.

BDS posee las siguientes características: en primer lugar, su segmento espacial es una constelación híbrida que consta de satélites en tres tipos de órbitas. En comparación con otros sistemas de navegación por satélite, BDS opera más satélites en órbitas altas para ofrecer mejores capacidades antiblindaje, lo que es particularmente observable en términos de rendimiento en las áreas de baja latitud. En segundo lugar, BDS proporciona señales de navegación de múltiples frecuencias y puede mejorar la precisión del servicio mediante el uso de señales multifrecuencia combinadas. En tercer lugar, BDS integra la función de navegación y comunicación, y posee múltiples capacidades de servicio, a saber, posicionamiento, navegación y cronometraje, comunicación de mensajes cortos, búsqueda y rescate internacionales, aumento basado en satélites, aumento terrestre y posicionamiento de puntos precisos, etc.

CAPÍTULO V: FUNDAMENTOS DE FOTOGRAMETRÍA Y SISTEMA LIDAR.

5.1. Topografía

La topografía es una ciencia geométrica dedicada a la representación gráfica de la superficie terrestre. Es la disciplina que estudia los principios y procedimientos que nos permiten ilustrar las formas, detalles y elementos de la Tierra, tanto los naturales como los creados por el ser humano.



Figura N° 44. Mediciones topográficas

Fuente: [Cards.algoreducation.com](https://www.cards.algoreducation.com)

Dicha representación se hace siempre respecto de una extensión de terreno limitada, aplicando un plano imaginario y un conjunto de coordenadas tridimensionales (x , y , z). El resultado es un mapa topográfico, que indica cuál es el relieve de la zona estudiada.

Así, los mapas topográficos muestran la elevación del terreno mediante sistemas de líneas que conectan puntos específicos con un plano de referencia, el cual suele ser el nivel del mar.

Los estudios topográficos son muy importantes para otras disciplinas, como la agrimensura, la arquitectura, la arqueología, la geografía, la espeleología, la cartografía, la minería, la oceanografía y un enorme compendio de ingenierías.

Es especialmente útil a la hora de edificar o hacer obras de ingeniería civil, ya que básicamente la topografía se ocupa de describir fielmente la realidad física inmóvil de un lugar determinado, sea éste una ciudad, un campo o un valle entre montañas.

Historia de la topografía

Aunque no existe a ciencia cierta un inventor de la topografía, se estima que los antiguos egipcios y los griegos de la era clásica la practicaron con fruición, siendo como eran importantes constructores. Existe evidencia de la labor que llevaban a cabo los agrimensores del faraón, marcando en cada tierra labrada la porción que iba destinada a su majestad.

Al mismo tiempo, los primeros en realizar cartas geográficas propiamente dichas fueron los griegos Tales de Mileto y Anaximandro, por lo que podrían servir de iniciadores de la práctica de la representación gráfica del terreno.

Lo cierto es que la topografía tuvo su entrada formal como ciencia de la mano de la propiedad privada, ya que es una importante disciplina para las labores de expansión de los Estados y para el sector de la construcción de obras públicas y privadas. En ello, es una ciencia bastante moderna.

Tipos de medición topográfica



Figura N° 45. Tipos de mediciones topográficas

Fuente: www.allpe.com

La topografía siempre trabaja sobre el terreno.

Las labores de la topografía se hacen siempre en el terreno, esto es, siempre en el campo mismo del estudio. Se distinguen, no obstante, por su metodología a la hora de hacer una medición:

- Medición directa: Adquiere sus datos de manera directa, es decir, comparando la distancia real con la unidad de medida que la describe, como puede ser mediante una cinta métrica, por poner un ejemplo.



Figura N° 46. Medición directa.

Fuente: Ingenieria4esquinas.com

- Medición indirecta: Aquella que se obtienen las mediciones mediante la aplicación de una fórmula matemática y otras formas de razonamiento abstracto.

Ramas de la topografía

A grandes rasgos, la topografía comprende tres ramas o subdivisiones:

- Agrimensura. Considerada en muchos sentidos una disciplina autónoma, se dedica a la medición de las distancias de las superficies de la Tierra, es decir, medición de áreas y definición de límites legales.
- Topografía clásica. Emplea un sistema abstracto de referencias o coordenadas esféricas, que luego pueden traducirse en un eje cartesiano para obtener, mediante cálculos, las proporciones de un espacio físico. Se divide en dos, a su vez:

- Planimetría. La medición de superficies planas.
- Altimetría. La medición de alturas.
- Geodesia. Se ocupa de representar gráficamente la superficie de la Tierra, comprendida como un conjunto macro de superficies, o sea, a partir de sectorizaciones grandes, lo cual implica a menudo sacrificar el plano imaginario topográfico.

Importancia de la topografía



Figura N° 47. Importancia de la topografía.

Fuente: www.spectrainge.com

La topografía es indispensable en proyectos de ingeniería y arquitectura.

La topografía es fundamental en la medición y representación del mundo, sobre todo para quienes requieren de una descripción detallada de ciertos sectores del

mismo, como navegantes, ingenieros constructores, arquitectos, ingenieros de telecomunicaciones, y un enorme etcétera.

Por esa razón los topógrafos suelen estar involucrados en las etapas iniciales de prácticamente todos los proyectos de construcción. Los levantamientos topográficos son clave en la planificación y adecuación de las ideas en abstracto al espacio físico tangible en donde habrán de concretarse.

Topografía y Geodesia

La diferencia fundamental entre topografía y geodesia se debe a que la geodesia tiene un enfoque macro. Evalúa globalmente de la superficie terrestre, sirviendo de base para otras geociencias y sistemas de información geográfica.

Inicialmente se la pensaba como una rama de la topografía, pero en la actualidad incluso se piensa que la jerarquía entre estas disciplinas podría ser al revés, y la topografía vendría siendo una suerte de geodesia práctica o inferior.

5.1.1. Altimetría

La altimetría o hipsometría, como también se la denomina, es la rama de la topografía que se ocupa de estudiar el conjunto de procedimientos y de métodos que existen para poder determinar y representar la altura o cota de cada punto respecto de un plano de referencia. Por ejemplo, gracias a la altimetría es posible representar el relieve del terreno, tal es el caso de planos de curvas de nivel, perfiles, entre otros.

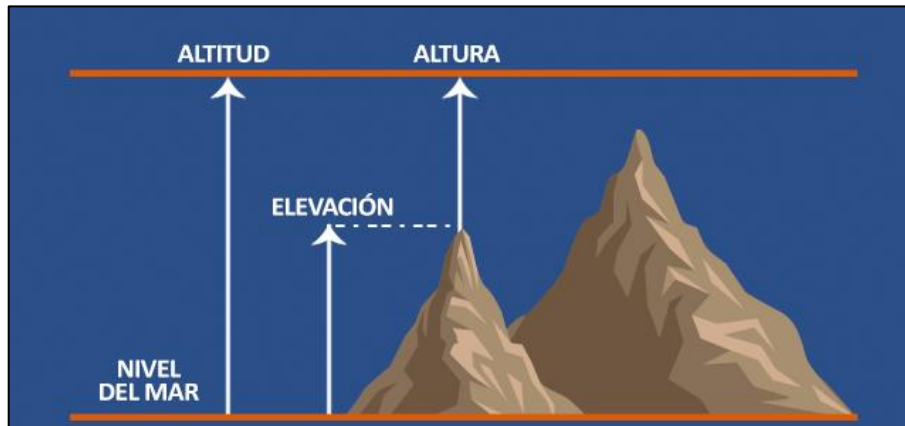


Figura N° 48. Altimetría

Fuente: www.facebook.com

En el específico caso de la aviación, la altimetría juega un papel destacado, ya que se encarga de establecer la altitud de vuelo de la aeronave, o sea, la distancia vertical del avión respecto del nivel del mar.

La determinación y el conocimiento de este valor son de vital importancia para la aeronavegación y estrictamente para la circulación de las aeronaves en aquellas secciones verticales de cualquier aerovía, porque la circulación se distribuye y organiza en niveles de vuelos que se hallan vinculados a la altitud.

El instrumento tradicional que se ocupa de presentarle la altitud al piloto de una aeronave es el altímetro, que permite obtener una lectura de la altitud partiendo de la medición de la presión estática que rodea a la aeronave.

Si bien la mayor utilización del altímetro se da en la aeronavegación, ya que el mismo constituye uno de los elementos más de seguridad que se acopla al resto

de los instrumentos de vuelo más importantes del avión, el altímetro también es frecuentemente usado en algunos deportes y actividades en las cuales se sufren importantes desniveles de alturas, tal es el caso del montañismo, el trekking, el ciclismo, el esquí, la escalada, el paracaidismo, entre los más practicados.

Entonces, a instancias de cualquiera de las prácticas recién mencionadas, el altímetro se emplea para conocer los desniveles que se van superando.

En algunos casos la tecnología ha influido radicalmente y así es que por ejemplo algunos de los más modernos velocímetros para bicicletas integran un altímetro permitiendo generar perfiles de la jornada con la ayuda de una computadora.

Existen dos tipos de altímetros: el altímetro barométrico, que es el más común y su funcionamiento se encuentra basado en la relación entre presión y altitud, entonces, la presión atmosférica desciende con la altitud; toma como referencia el nivel del mar y su funcionamiento está condicionado a los cambios climáticos. Y el altímetro radioeléctrico es un pequeño radar que mide la distancia entre dos vehículos aéreos con respecto al suelo; se usa principalmente en bomba y misiles.

5.1.2. Planimetría

La planimetría es responsable por trasladar a un plano los datos referentes a las medidas de los elementos presentes en la composición de un escenario real, para poder visualizar con claridad la distribución y organización, abarcando una perspectiva tanto vertical (perpendicular al plano) como horizontal (paralela al plano), por ejemplo, a instancias de la planificación de una casa o una ciudad.

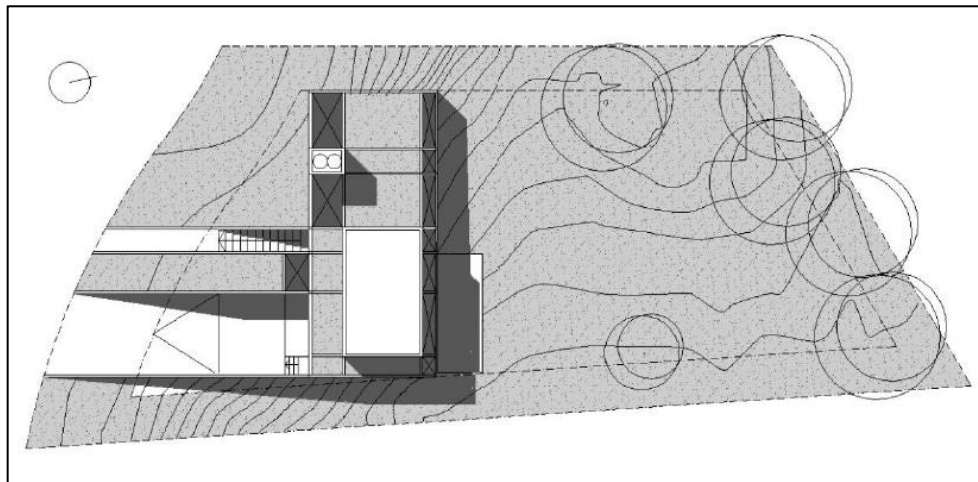


Figura N° 49. Planimetría

Fuente: www.yarquitectura.com

La planimetría es esencial, incluso indispensable, en la arquitectura. Durante el Renacimiento se gesta la representación por medio de planos; estos planos incluyen plantas, alzados y representaciones en tres dimensiones. Sin embargo, son representaciones a una escala siempre menor que el objeto (edificio) original, por eso resulta indispensable en estos gráficos indicar las medidas reales.

Los arquitectos usan un sistema de acotado para representar las medidas. Gracias a estas cotas, se señalan las medidas reales de lo representado. Vale decirse que un plano sin las medidas es inútil en la construcción. Los obreros no lograrían nunca saber ni las longitudes ni alturas de muros, paredes, pasillos, etc., y jamás se lograría calcular la cantidad de material necesario para construir.

Se añade que las medidas permiten constatar la ergonomía de la edificación, por ejemplo, si las puertas tienen el ancho adecuado o si los ambientes tienen la medida correcta. Las alcobas, por citar un caso, deben tener al menos 6 metros cuadrados. Los baños también tienen unos requisitos mínimos en sus dimensiones debido a la colocación de las piezas sanitarias.

5.2. La fotogrametría

Es el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la Topografía. La fotogrametría no es una ciencia nueva, ya que los principios matemáticos en que se basa son conocimientos desde hace más de un siglo, sin embargo, sus aplicaciones topográficas son mucho más recientes.

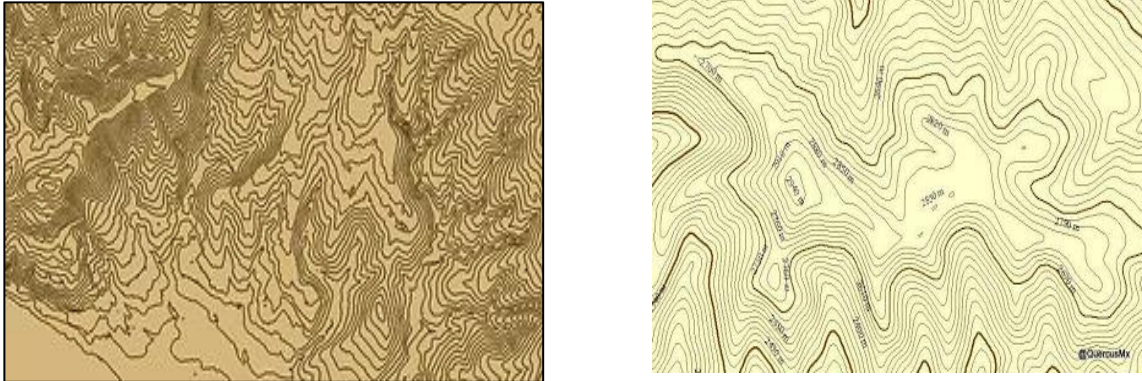


Figura N° 50. Curvas de nivel en fotogrametría

Fuente: www.cursosgis.com

Las aplicaciones de la fotogrametría, no son solo topográficas, ya que es una eficaz ayuda en medicina legal y criminalista, así como en investigaciones policíacas, en escultura y arquitectura que se valen de ella para la reproducción y medida de cuerpos y objeto diversos. Gracias a esta se pudo reconstruir muchos monumentos destruidos durante las guerras mundiales, entre ellos la célebre catedral de Reims.

También se utiliza la fotogrametría en meteorología, astronomía, balística, geología, hidráulica, etc.

5.2.1. Historia de la fotogrametría

En la historia de la fotogrametría se pueden distinguir tres etapas: la fotogrametría ordinaria, la estereofotogrametría analítica y la estereofotogrametría automática.

Ya antes del invento de la fotografía, Lambert, Matemático, físico y filósofo de origen francés, estableció en 1759 los fundamentos para resolver el problema de la restitución perspectiva.

A partir de 1858 el francés Laussedat, consiguió obtener planos exactos de edificios y pequeñas extensiones de terreno a partir de la fotografía, siendo este el primer inicio de la fotogrametría, que en su día se conoció con el nombre de fotogrametría ordinaria.

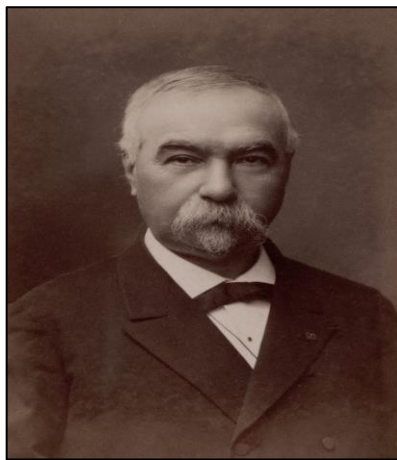


Figura N° 51. Coronel Francés Aimé Laussedat, Inventor de la Fotogrametría.

Fuente: www.clge.eu

Este método tuvo en vigor hasta el principio del presente siglo; el inconveniente más grande que tenía este sistema era a la identificación de un mismo punto en dos fotografías tomadas desde distintos puntos de vista. Aunque se continuaba trabajando con la fotogrametría, se tropezaba con dificultades de importancia, ya que la restitución de un punto implicaba una gran cantidad de cálculos, hasta que

en 1901 Pulfrich aplico el principio de la visión en relieve para efectuar medidas estereoscópicas por medio de un aparato de su invención que se denominó estereocomparador, y con el cual se deducían las coordenadas punto por punto; Dando comienzo a la segunda etapa.

En 1909 se dio el paso definitivo para la consagración de la fotogrametría terrestre, gracias al teniente Austriaco Von Orel al construir el aparato denominado Estereoautógrafo, primer aparato utilizado para la construcción y dibujo automático de planos, en el caso de ejes ópticos horizontales.

La tercera etapa comienza con el desarrollo de la aviación y las necesidades bélicas de ambos bandos durante la primera guerra mundial, ya que ambos necesitaban obtener fotografías aéreas del campamento contrario, para así planear y organizar un buen ataque. En la fotogrametría aérea la cámara está en movimiento, y para poder efectuar la restitución, es preciso conocer el punto exacto en que se impresiono el fotograma.



Figura N° 52. Fotos Aéreas.

Fuente: Oficinarehabilitacion.coam.org

Para solucionar este obstáculo después de diversos ensayos, se tuvo que volver al antiguo teorema de Terrero-Hauck, permitió conseguir la orientación relativa de cada dos fotografías consecutivas por método exclusivamente óptico y mecánicos.

La Cámara Fotográfica

Cuando los rayos luminosos que parten de un objeto P, penetran a través de un pequeño orificio en una caja cerrada (cámara oscura) forman una imagen real e invertida del objeto P, conservando las proporciones del mismo.

La cámara oscura puede considerarse como un antecedente de la cámara fotográfica, en la que el orificio es sustituido por un objetivo, que es una lente o un conjunto de lentes, y la imagen se forma sobre un plano A' B', en el que hay una emulación sensible a la luz, sobre la que impresiona la imagen formada.

En fotogrametría terrestre se opera con cámaras fotográficas montadas sobre un teodolito o taquímetro.

Las cámaras fotogramétricas que se emplean para tomar fotografías desde los aviones son poco parecidas a las ordinarias, estando todos sus elementos adaptados al trabajo especial que realizan. Se dividen en dos grandes grupos: cámaras de mano y cámaras automáticas; las primeras se emplean cuando solo se necesitan vistas aisladas o muy poco seguidas y las segundas cuando hay que hacer un gran número de fotografías seguidas.

Las cámaras automáticas, llamadas cinematográficas o toposeriógrafos, son las verdaderas cámaras fotogramétricas aéreas, van situada sobre el piso del avión por intermedio de una suspensión anti vibrante y llevan una serie de dispositivos para que las operaciones propias de obtención de fotografía se realicen de un modo automático.

Las cámaras fotogramétricas aéreas están constituidas por las cámaras propiamente dichas, un almacén de negativos y un dispositivo de mando.

Para distinguir mejor determinadas especies de árboles cuando se trata de hacer el censo de las existencias forestales, se puede aplicar la fotografía por rayos infrarrojos.

Principios de la Fotogrametría

El objeto de la fotogrametría es pasar de la proyección cónica que constituye el fotograma a la proyección ortogonal que es el plano topográfico.

5.2.2. Tipos de la fotogrametría

La fotogrametría puede ser tanto terrestre como aérea:

- **En la fotogrametría terrestre:** El punto de vista es fijo, y se determina sus coordenadas, así como la orientación del eje de la cámara.
- **En la aérea, por el contrario:** El punto de vista está en movimiento y son desconocidas sus coordenadas, así como la dirección del eje de la

cámara; por ello es más fácil realizar las restituciones en la terrestre y más sencillas las cámaras utilizadas.

5.3. LIDAR

LIDAR (del inglés “light detection and ranging”) es una tecnología de teledetección que utiliza rayos láser para medir distancias y movimientos precisos en un entorno, en tiempo real.

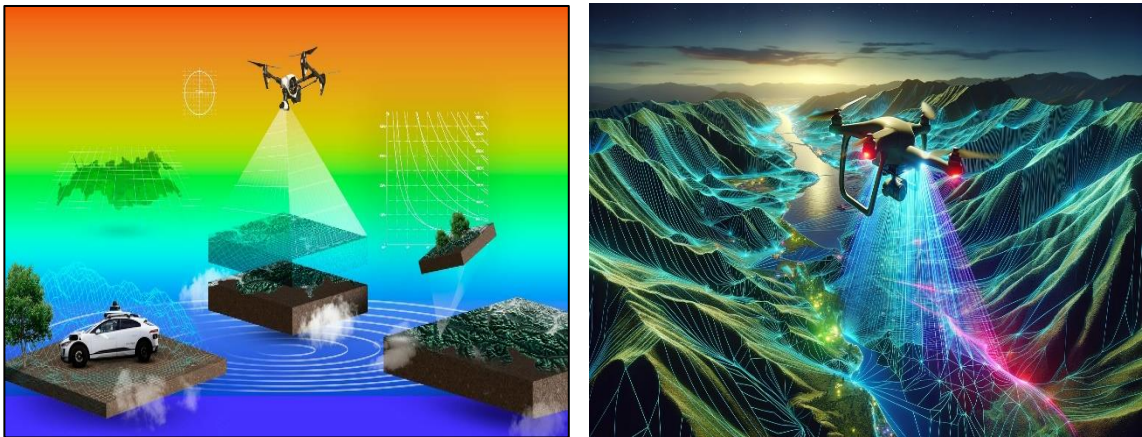


Figura N° 53. Sistema LIDAR

Fuente: www.juarezthompson.mx

Los datos LIDAR se pueden utilizar para generar todo, desde mapas topográficos detallados hasta modelos 3D precisos y dinámicos necesarios para guiar de forma segura un vehículo autónomo a través de un entorno en cambio. La tecnología LIDAR también se utiliza para evaluar peligros y desastres naturales, como flujos de lava, derrumbes, tsunamis e inundaciones.

Cómo funciona LIDAR

LIDAR se rige por los mismos principios que el radar (detección y medición de distancia, un sistema de ubicación utilizado en el navegación marítima y aérea) y el sonar (navegación y localización, un sistema normalmente utilizado en los submarinos).

Las tres tecnologías emiten ondas de energía para detectar y ubicar objetos. La diferencia radica en que, mientras el radar utiliza microondas y el sonar, ondas de sonido, LIDAR utiliza luz reflejada, que puede medir la distancia más rápido, con mayor precisión y resolución que el radar o el sonar.

Componentes del sistema LIDAR

Un instrumento LIDAR típico consta de varios componentes:

- Un escáner láser que emite pulsos rápidos de luz láser casi infrarroja.
- Un sensor LIDAR utilizado para detectar y recoger los pulsos luminosos reflejados.
- procesador para calcular el tiempo y la distancia, así como para construir el conjunto de datos resultante, denominado nube de puntos LIDAR.

Para que la detección remota sea precisa, las mediciones de tiempo y espacio deben ser exactas, por lo que un sistema LIDAR también empleará electrónica de cronometraje, una unidad de medición inercial (IMU) y GPS.

Medición de LIDAR

El instrumento LIDAR emite pulsos de luz láser en el entorno. Estos pulsos, viajan a la velocidad de la luz, rebotan en los objetos circundantes y regresan al sensor LIDAR. El sensor mide el tiempo que tardó en regresar cada pulso y calcula la distancia que recorrió. Dado que la velocidad de la luz láser es constante, este "tiempo de vuelo" se puede usar para calcular distancias precisas.

Al repetir el proceso y enviar pulsos láser a través de un área más grande, las mediciones de tiempo de vuelo se pueden recoger en miles de millones de puntos individuales y procesarse en tiempo real en lo que se conoce como una nube de puntos.

Análisis y modelado de datos de LIDAR

Los datos se someten a varias etapas de procesamiento para transformar la nube de puntos LIDAR en un mapa 3D. En primer lugar, se verifica su precisión y se limpian para eliminar el ruido anómalo. Luego, las características de la superficie terrestre, como edificios, ríos y doseles forestales se pueden identificar y clasificar mediante algoritmos.

Para simplificar el análisis, los algoritmos reducen la muestra de la nube de puntos para eliminar datos redundantes y reducir el tamaño del archivo. Luego, los datos se convierten al formato de archivo LAS (o LASer) estándar de la industria que se emplea para intercambiar datos 3D x, y, z.

Finalmente, una vez convertidos al formato LAS, los datos de la nube de puntos se pueden visualizar y modelar en un mapa 3D del terreno escaneado. Estos cálculos son constantes y continuos para un sistema LIDAR en movimiento como los empleados en vehículos autónomos. De acuerdo con una fuente, los automóviles autónomos generan y procesan un terabyte de datos por cada hora de operación.

5.3.3 Tipos de LIDAR

Los sistemas LIDAR se dividen en dos tipos en función de su plataforma: LIDAR aéreo y LIDAR terrestre.

LIDAR aéreo

Los sistemas LIDAR aéreos, también llamados sistemas de escaneo láser aéreos, utilizan escáneres LIDAR montados en aeronaves (generalmente helicópteros o vehículos aéreos no tripulados) para generar modelos 3D de la superficie terrestre.

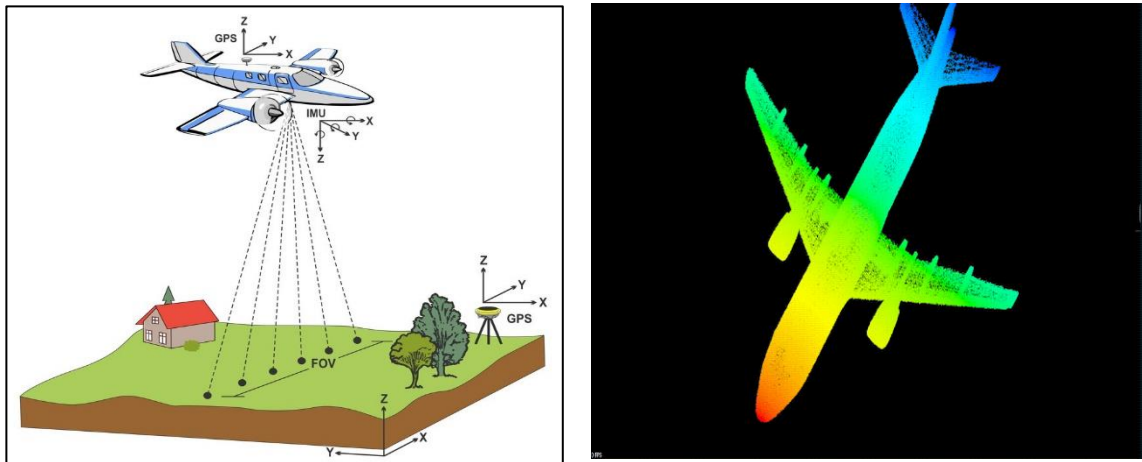


Figura N° 54. Sistema LIDAR Aéreo.

Fuente: www.researchgate.net

El mapeo con LIDAR aéreo se ha convertido en una herramienta valiosa para crear modelos digitales de elevación de la superficie de la Tierra, reemplazando principalmente el método de fotogrametría más antiguo y menos preciso. El escaneo con LIDAR aéreo también se utiliza mucho en silvicultura para elaborar mapas LIDAR del dosel arbóreo y modelos topográficos de la superficie forestal.

Los tipos de tecnología LIDAR aérea incluyen:

LIDAR batimétrico

El LIDAR batimétrico captura datos SIG en aguas poco profundas y a lo largo de las costas. El LIDAR batimétrico emite rayos láser verdes con una longitud de onda que puede penetrar en el agua para medir la elevación digital del fondo marino, en lugar de emplear luz láser infrarroja como los sistemas LIDAR típicos.

LIDAR basado en el espacio

La NASA y otras agencias espaciales emplean LIDAR basado en el espacio para la navegación de naves espaciales y el mapeo digital de cuerpos celestes. LIDAR también se utiliza para pilotar los vehículos autónomos de la NASA y volar el helicóptero Ingenuity en Marte.

LIDAR terrestre

El sistema LIDAR terrestre se utiliza frecuentemente para crear mapas de terrenos y paisajes. Este sistema se puede utilizar para recopilar datos más localizados y de corto alcance, lo que lo hace ideal para mapear áreas más pequeñas con alta precisión.



Figura N° 55. Sistema LIDAR Terrestre.

Fuente: www.utm30.com

Entre los tipos de LIDAR terrestres podemos mencionar:

LIDAR estático

Algunos sistemas LIDAR terrestres son estáticos, se encuentran fijos en un solo lugar y se utilizan para realizar escaneos LIDAR precisos y repetidos de una sola área. El LIDAR estático se emplea a menudo en yacimientos arqueológicos, proyectos de construcción y evaluaciones de riesgos. Puede vigilar la superficie del suelo de volcanes activos, fallas sísmicas y zonas inundadas.

LIDAR móvil

El LIDAR móvil es una forma de LIDAR terrestre que recopila datos LIDAR desde un vehículo en movimiento. Los sistemas LIDAR móviles (MLS, por sus siglas en inglés) son fundamentales para la industria automotriz en el desarrollo de la asistencia al conductor y la conducción autónoma: la recopilación de datos a partir de la detección y la medición de luz permite que los automóviles de conducción autónoma identifiquen los y la infraestructura de forma rápida, precisa y rentable.

Aplicaciones de LIDAR

Los escaneos LIDAR tienen una amplia gama de usos en el mundo real en muchas industrias. Pueden crear modelos detallados del terreno de la superficie del suelo y el fondo marino y también producir visualizaciones precisas, de alta resolución y en tiempo real de objetos en movimiento.

Agricultura

Los sensores LIDAR se utilizan para medir el entorno y la topografía agrícola, para estimar la biomasa de los cultivos y para detectar las propiedades del suelo mediante el mapeo de variaciones en profundidad, pendiente, humedad y aspecto. LIDAR también se utiliza para pilotar vehículos agrícolas autónomos.

Aeroespacial y defensa

LIDAR se utiliza para realizar mapeo de terrenos, seguimiento de objetivos, búsqueda de minas y creación de imágenes a través de nubes, así como la planificación de misiones utilizando visualizaciones sofisticadas de campos de batalla incluso en entornos urbanos densos.

Automotriz

Los sistemas avanzados de asistencia al conductor (ADAS, por sus siglas en inglés) y los vehículos autónomos, como los autos automáticos, utilizan los datos del mapa 3D de LIDAR para navegar por carreteras y otros entornos.

Aviación

El LIDAR puede utilizarse para medir con precisión la velocidad del viento, y también se utiliza en los aeropuertos para rastrear aeronaves y restos de objetos extraños (FOD, por sus siglas en inglés).

Batimetría

El LIDAR batimétrico utiliza luz láser verde para penetrar el agua y crear modelos digitales de elevación de embalses de aguas poco profundas, ríos y lechos costeros. Estos pueden medir la erosión, mapear el hábitat de la vida silvestre y evaluar el riesgo dentro de las zonas de inundación.

Descubra cómo la IA, el IoT y la supervisión digital pueden transformar los puertos marítimos y el transporte marítimo

Construcción

El LIDAR puede inspeccionar con rapidez y precisión una obra, calcular el volumen de los materiales y utilizarse para realizar inspecciones de seguridad y detectar posibles peligros.

Conozca cómo un enfoque digitalmente integrado habilita y facilita los proyectos de construcción

Energía

La tecnología LIDAR se utiliza para la evaluación de recursos eólicos, la exploración en el sector del petróleo y gas y la gestión de la vegetación para el mantenimiento de las líneas eléctricas.

Entretenimiento

LIDAR se utiliza para crear mapas de entornos en aplicaciones de realidad virtual y realidad aumentada.

Silvicultura

Además de proporcionar mapas topográficos detallados, LIDAR se puede utilizar para medir las características estructurales de los árboles, como el índice de área foliar y el volumen del dosel forestal, y es una herramienta valiosa en la gestión de la vegetación. También se utiliza para monitorear y contener incendios forestales.

Geología y minería

Es difícil acceder a minas y canteras, y LIDAR se utiliza cada vez más para hacer levantamientos topográficos, mapeo y seguridad de los trabajadores. Los escaneos LIDAR también se pueden usar para mediciones de volumen en canteras.

Manufactura

La tecnología LIDAR se puede emplear para crear modelos 3D de objetos para su uso en la fabricación. También se puede emplear para el control de calidad a fin de detectar anomalías y defectos.

Creación de mapas

LIDAR se utiliza para crear modelos digitales de elevación y crear mapas de carreteras, puentes y otras características geográficas y de infraestructura.

Gestión de la vegetación

El LIDAR se puede utilizar para escanear a través del dosel y monitorear la densidad, especies y salud de la flora con el fin de identificar la flora que podría ser de alto riesgo para las instalaciones de servicios públicos y otra infraestructura.

Pronóstico meteorológico

Los sensores LIDAR se utilizan para medir la temperatura, la nubosidad, la velocidad del viento, la velocidad y otros parámetros atmosféricos, y proporcionan datos vitales para los modelos de pronóstico del tiempo.

El futuro de LIDAR

Los equipos de investigación desarrollan continuamente nuevos sistemas y algoritmos para aumentar la precisión, velocidad y eficacia de LIDAR, y existe un desarrollo continuo centrado en hacer que la tecnología LIDAR sea más pequeña, ligera y asequible. Esto permitiría una adopción más amplia en diversas industrias y aplicaciones, como la electrónica de consumo, la robótica y los dispositivos domésticos inteligentes.

El sistema LIDAR es cada vez más popular en los vehículos autónomos y se espera que desempeñe un papel importante en el futuro del sector automotriz. A medida que la tecnología continúa mejorando y los costos, disminuyendo, es probable que las aplicaciones de LIDAR aumenten drásticamente.

CAPÍTULO VI: DRONES

Antecedentes históricos

Siglo XIX - Primera Guerra Mundial

Siglo XIX: Primeras ideas sobre aeronaves sin piloto, como globos dirigidos a distancia para fines militares.

Aunque ideas de un avión no tripulado es antigua. A pesar de que a menudo asociamos los drones con los robots militares de hoy, los aviones no tripulados, de una forma u otra, se han utilizado durante décadas. Uno de los primeros usos registrados fue por los austriacos en julio de 1849 después de que se pusieran en marcha alrededor de doscientos globos aerostáticos no tripulados montados con bombas en la ciudad de Venecia. Menos de dos décadas después de la Guerra Civil en EE. UU, fuerzas de la Confederación y de la Unión volaban globos para misiones de reconocimiento. En 1896 Samuel P. Langley desarrolló una serie de aeronaves a vapor, aviones sin piloto que fueron trasladados con éxito a lo largo del río Potomac, cerca de Washington DC. La práctica de la vigilancia aérea más tarde surgió en la Guerra Hispano-Americana de 1898, cuando los militares de EE.UU. equiparon una cámara a una cometa, dando lugar a una de las primeras fotografías de reconocimiento aéreo.

Nikola Tesla demostró por primera vez el mando a distancia o radio control de un vehículo al final del siglo XIX. En un estanque en el Madison Square Garden de Nueva York en 1898, el inventor y showman controlaba a distancia un barco

con una señal de radio. Esta fue la primera aplicación de ondas de radio en la historia, lo que significa que la patente de Tesla N.º 613.809 fue la cuna de la robótica moderna. En esa masa de agua flotaba un enorme posible avance militar.

1916: En 1916, la idea de las armas guiadas de forma remota despertó el interés del capitán Archibald M. Low, de la Royal Flying Corps en el Reino Unido que supervisó la construcción de una serie de aviones dirigidos por control remoto que fueron equipados con explosivos.

Durante la Primera Guerra Mundial el inventor del giroscopio, Elmer Ambrose Sperry, desarrolló una plataforma de aeronaves sin piloto con un dispositivo para lanzar torpedos con una catapulta. El programa quedó extinto al acabar la guerra en 1918 y de hecho también hay reportes de que eran habituales los fallos técnicos y eran numerosos los accidentes con estos prototipos.

1918: La Hewitt Sperry o bomba volante fue capaz de volar 50 millas cargada con una bomba de 300 libras de peso. Aun así, es importante destacar que este avión no tripulado se mejoró inequívocamente con la adición de la tecnología giroscópica de Sperry. El éxito de este proyecto llevó al Ejército EE. UU a poner en marcha un segundo proyecto, el Kettering torpedo aéreo Bug, (Kettering Bug), un avión no tripulado diseñado como bomba voladora, aunque nunca se usó en combate. Fue desarrollado por la empresa Dayton-Wright Airplane Company. El "Insecto" fue esencialmente un torpedo aéreo, sin piloto y guiado por los controles

preestablecidos. En Alemania, un proyecto similar estaba siendo iniciado por el Dr. Wilhelm Von Siemens entre 1915 y 1918. El Siemens Torpedo Planeador era un misil que se valía de un Zeppelin y luego se guiaba hacia su objetivo por radio. La bomba volante, el Bug y el Torpedo Planeador eran todos primeros precursores de los misiles de crucero contemporáneos.



Figura N° 56. Kettering Bug

Fuente: En.wikipedia.org

Segunda Guerra Mundial y Guerra Fría (1939-1991)

1940s: A mediados de la década de 1940 asistimos al desarrollo del GB-1 Glide sistema de bombardeo aéreo ideado para eludir las defensas aéreas alemanas. Era un planeador viable equipado con una bomba estándar de 1.000 o 2.000 libras de peso. Hecho de madera contrachapada con las alas, timones, y controlado por radio, eran guiados hacia líneas enemigas. En 1943, ciento ocho GB-1 fueron lanzados sobre Colonia. Más adelante en la misma guerra vino

el GB-4, o el “Robin”, que fue la primera arma guiada retransmitida por la televisión. Mientras que Alemania desarrolla la bomba guiada V-1.

A finales de 1946 un programa de la Fuerza Aérea de EE.UU. fue aprobado para desarrollar tres tipos de aviones no tripulados para su uso como objetivos de formación. De los tres, el que se lanzaba desde el aire, el modelo Q-2, fue el más importante, convirtiéndose en el padre de una clase de aviones construidos por la Compañía Aeronáutica Ryan.

1950s-1960s: El Firebee se probó por primera vez en 1951 en la base aérea de Holloman. Este modelo podía mantenerse en vuelo durante dos horas y fue capaz de alcanzar alturas de hasta 60.000 pies.

La guerra de Vietnam sin duda fue muy importante en esta carrera histórica de los drones para ser lo que son hoy en día. El conflicto dio a luz el programa más sofisticado de vigilancia con aviones no tripulados en la historia de la aviación. Por otra parte, la guerra de Vietnam fue la primera «guerra tecnológica» de la historia: una guerra llevada a cabo de acuerdo con principios técnicos, modelos estadísticos y sistemas electrónicos. De particular importancia fue el aumento en el campo de batalla de los dispositivos electrónicos. Durante la década de 1960 el Departamento de Defensa de los EE.UU. comenzó a automatizar e informatizar el campo de batalla con sensores remotos y superordenadores para escuchar los movimientos del enemigo o manejar aviones no tripulados “Firebee” a través de los cielos de la selva vietnamita. EE. UU. y la URSS mejoran los drones con

sistemas de reconocimiento, como el Ryan Model 147 usado en la Guerra de Vietnam.

Es difícil apreciar lo rápido que avanza la tecnología militar durante la Guerra Fría. En 1960, Gary Powers fue derribado sobre la Unión Soviética, mientras que pilotaba un avión espía U-2. La administración de Eisenhower revolvió cielo y tierra para mejorar su programa de aeronaves no tripuladas. En el mismo año, la empresa Ryan Aeronautic Company propuso una versión de su avión no tripulado llamado “carro rojo” como un vehículo de reconocimiento. En 1962, Ryan obtuvo fondos para desarrollar el “Gran Safar” de la Fuerza Aérea, siendo el primer avión no tripulado de vigilancia. Los “Firebees” de propulsión a chorro pasaron por varios cambios de modelo y denominaciones militares: Ryan 147, AQM-34 y Luciérnaga, fueron lanzados desde las alas de un avión Lockheed CC-130 Hércules, que actuaba como una nave nodriza de coordinación para todo su enjambre de aviones no tripulados. Estos volaban rutas preprogramadas y también podían ser controlados por operadores de radio a bordo del Hércules. Después de realizar su misión de vigilancia los “Insectos” despliegan sus paracaídas y son recuperados por helicópteros posteriormente.



Figura N° 57. Ryan Model 147.

Fuente: [Wikimedia.org](https://www.wikimedia.org)

1970s-1980s: Se introducen sistemas de navegación mejorados, cámaras más avanzadas y mayor autonomía en drones espías. Entre 1964 y 1975, estos Lightning Bugs realizaron más de 3.500 misiones de combate en Vietnam. Y fueron desde luego bastante caros. En 1969 las operaciones con aviones no tripulados a baja altura estaban costando 250 millones de dólares al año. En 1972 aviones teledirigidos de vigilancia fueron equipados con tecnología LORAN (Long Range Navigation o navegación de largo alcance) que mejoraron drásticamente la capacidad operacional de estas aeronaves no tripuladas gracias a un sistema de ayuda a la navegación electrónico que utiliza el intervalo transcurrido entre la recepción de señales de radio transmitidas desde tres o más transmisores para determinar la posición del receptor (algo parecido a la triangulación que utilizan los GPS de hoy en día).

En 1970 se decidió que era el momento oportuno para los vehículos teledirigidos (RPVs). La Fuerza Aérea puso en marcha un programa para aumentar las capacidades de alcance y de vigilancia electrónica de las RPV. El programa consistió en la financiación de las compañías Boeing y Ryan para desarrollar aviones no tripulados resistentes que volaran a gran altitud. Estos prototipos fueron los más ambiciosos aviones teledirigidos de vigilancia no tripulados en la historia de la Fuerza Aérea, capaces de volar más de 24 horas, siendo pilotados desde el suelo. Al mismo tiempo que los aviones no tripulados, se desarrollaron una serie de mini-RPV como los prototipos Praelire, que eran capaces de llevar láser y cámaras de video. Además de aviones no tripulados de vigilancia, la Fuerza Aérea comenzó a experimentar con Firebees armados.

La década de 1970 se definió a este respecto por una mezcla de inquietud, escepticismo y la especulación sobre el futuro y la confianza en las aeronaves sin piloto. Parte de la inquietud provenía desde el día en que un piloto humano fue derrotado por un avión no tripulado. En 1971, un funcionario de Ryan desafió a John Smith, entonces comandante de la prestigiosa unidad Top Gun a volar contra un avión no tripulado. El F-4 Phantom (interceptor y cazabombardero supersónico, biplaza, bimotor y de largo alcance) y su piloto no podían seguir el ritmo de los giros y vueltas inhumanas del avión robot. La década de 1980 vio como el testigo en el desarrollo de las aeronaves no tripuladas pasaba a Israel, siendo pioneros en su utilización contra las fuerzas sirias, lo que llevó a formar la primera corporación UAV conjunta. Casi todas las piezas estaban en su lugar

para el inicio del reinado del Predator. excepto, por supuesto, el Predator. Se necesitarían décadas antes de la siguiente fase.

Durante los años 80 se consolida la tecnología UAV como algo tecnológicamente fiable y que potencialmente ya podía rendir más que un avión tripulado, como puso de manifiesto el enfrentamiento hombre-máquina entre el piloto de la unidad de élite Top Gun, John Smith, y su F-4 Phantom contra un avión no tripulado.

Solo fue con el profundo desarrollo en computación y sistemas de control electrónico durante los años 80 y 90 que los drones del presente fueron tomando forma. Y no sería hasta finales de los 90 que las fuerzas aéreas americanas comenzaron a tratar los aspectos técnicos que llevaron a dotar a estos de drones de misiles.

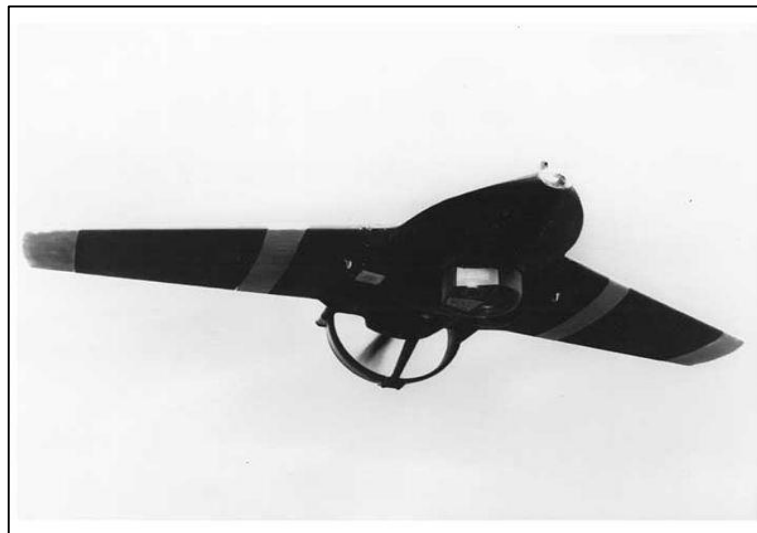


Figura N° 58. El Lockheed MQM-105 Aquila

Fuente: [En.wikipedia.org](https://en.wikipedia.org)

Expansión tecnológica (1990-2000)

1990s: EE. UU. desarrolla el Predator MQ-1, un dron militar con capacidad de ataque y vigilancia. Si bien los avances en aviones no tripulados fueron impulsados por las exigencias de la inteligencia cartográfica, estos objetos no tripulados estaban muy ligados a una serie de objetos legales que permitieron su despliegue. En otras palabras, la relación entre la tecnología y la ley es extremadamente importante en el trazado de la escalada del avión no tripulado Predator; ambos elementos van de la mano en la adquisición de conocimiento geográfico y vigilancia, consecución de objetivos, y en última instancia la toma de decisiones sobre la eliminación de objetivos. Esta relación entre tecnología y ley se materializa en dos figuras que alimentaron los motores del imperio del Predator: un ingeniero israelí de nombre Abraham E. Karem y un yihadista saudí llamado Osama Bin Laden. 1999, Se usa por primera vez en combate en Kosovo, marcando el inicio del dron como arma estratégica.

Uso comercial y civil (2000-presente)

Y llegamos a la historia contemporánea de los drones, marcada sin duda por un hecho acontecido hace ya catorce años, concretamente en febrero de 2002, que es cuando la CIA usara por primera vez el dron Predator para eliminar un objetivo de inteligencia. La acción fue llevada a cabo en Afganistán, cerca de la ciudad de Khost. El objetivo en cuestión era Osama Bin Laden, al menos eso pensaba la CIA. Donald Rumsfeld (secretario de Defensa durante el gobierno Bush).

La CIA había empezado a volar con drones en Afganistán desde el año 2000. Fue sólo desde los atentados del 11-S que empezarían los vuelos de drones armados. El ataque de febrero de 2002 fue una operación para matar de la CIA, sin tener que ver con ninguna operación militar en curso. Parece que todo el hecho de cambiar drones de vigilancia por drones con armas es que anteriormente al ataque de febrero de 2002, dos operadores de drones dijeron haber identificado un objetivo. Fue por este motivo que se legitimó el uso de drones armados y tras el primer ataque selectivo fallido con dron, se siguió argumentando como una necesidad que podía salvar vidas americanas.

2006: La FAA (Administración Federal de Aviación) en EE. UU. emite las primeras licencias para el uso de drones en aplicaciones civiles.

2010s: Se popularizan los drones en fotografía, agricultura, seguridad, entretenimiento y mensajería.

2020s: Avances en inteligencia artificial, autonomía de vuelo y conectividad con redes 5G permiten nuevos usos en entrega de paquetes, vigilancia urbana y exploración de zonas inaccesibles.



Figura N° 59. Dron Moderno.

Fuente: www.d1store.com

Futuro de los drones

Mayor autonomía y eficiencia energética: Uso de baterías de larga duración y energía solar. Drones con IA: Capaces de tomar decisiones en tiempo real sin intervención humana. Regulación y seguridad: Mayor control para evitar accidentes y problemas de privacidad. Movilidad aérea urbana: Desarrollo de drones-taxi para el transporte de personas.

Los drones han pasado de ser herramientas militares a dispositivos esenciales en múltiples industrias, y su evolución sigue avanzando hacia un futuro cada vez más automatizado e integrado en la sociedad.

6.1. Dron fotogramétrico

6.1.1. Definición

Dron: también conocido como UAV (Unmanned Aerial Vehicle) o VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado), es una aeronave que opera sin tripulación humana a bordo y que puede ser controlada de manera remota o volar de forma autónoma mediante sistemas de navegación y control programados. Estos dispositivos varían en tamaño, diseño y complejidad, desde pequeños drones recreativos hasta sofisticadas aeronaves militares o industriales.



Figura N° 60. Phantom 4 pro.

Fuente: Bestrusm.click

Fotogrametría:

Dron fotogramétrico: es una aeronave no tripulada, controlada de manera remota o autónoma, equipada con cámaras de alta precisión y sensores especializados para capturar imágenes aéreas que permiten realizar procesos de fotogrametría. La fotogrametría es una técnica que extrae información métrica de

fotografías, creando representaciones precisas del terreno, objetos o estructuras mediante la generación de mapas, modelos digitales en 3D y ortomosaicos. Estos drones combinan tecnología avanzada en navegación, captura de datos y procesamiento digital, siendo herramientas clave en disciplinas que requieren análisis espacial detallado.

6.1.2. Partes de un dron

Componentes principales de un dron fotogramétrico:

Estructura aérea:

- **Multirroto:** Ideal para vuelos en espacios reducidos y maniobras precisas.
- **Ala fija:** Más eficiente para cubrir grandes áreas en menos tiempo.
- **Híbridos:** Combinan las ventajas de Multirroto y alas fijas.

Sistema de navegación y control:

- **GPS de alta precisión (RTK/PPK):** Garantiza la georreferenciación exacta de las imágenes.
- **IMU (Unidad de Medición Inercial):** Registra la orientación y movimientos del dron.
- **Piloto automático y software de planificación de vuelo:** Permite programar rutas optimizadas para la cobertura fotográfica.

Sistema de captura de datos:

- **Cámara fotogramétrica:** Sensor de alta resolución que asegura la nitidez y calidad de las imágenes.
- **Cámaras multiespectrales o térmicas (opcional):** Utilizadas en agricultura de precisión, inspección de infraestructuras o monitoreo ambiental.
- **Gimbal estabilizador:** Asegura que las imágenes se capturen sin vibraciones, incluso en condiciones de viento.

Sistema de comunicación y almacenamiento:

- **Enlace de radiofrecuencia o 4G/5G:** Transmite datos en tiempo real.
- **Almacenamiento interno o en la nube:** Guarda las imágenes para su posterior procesamiento.

Fuente de energía:

Baterías recargables o sistemas híbridos de combustible, diseñados para ofrecer autonomía de vuelo suficiente para cubrir áreas extensas.

Proceso fotogramétrico con drones:

- **Planificación de vuelo:** Se diseña una ruta para asegurar la captura de imágenes con la superposición necesaria (entre el 60 % y el 90 %) que permita reconstruir modelos tridimensionales.

- **Captura de imágenes:** El dron vuela de manera autónoma o semiautónoma, capturando imágenes de alta resolución georreferenciadas.
- **Procesamiento de datos:** Se utilizan programas especializados para: Generar ortomosaicos (imágenes aéreas compuestas con corrección geométrica). Crear modelos digitales de terreno (MDT) y superficie (MDS). Realizar mediciones precisas de distancias, áreas, volúmenes y pendientes.
- **Análisis y entrega de resultados:** Los productos finales pueden integrarse en sistemas de información geográfica (SIG) para análisis avanzados o usarse directamente en proyectos específicos.



Figura N° 61. Partes de un Dron fotogramétrico

Fuente: [Researchgate.net](https://www.researchgate.net)

Aplicaciones principales:

- **Topografía y cartografía:** Generación de mapas detallados y modelos digitales de elevación.
- **Agricultura de precisión:** Monitoreo de cultivos, detección de plagas, análisis de estrés hídrico.
- **Construcción y minería:** Control de obras, cálculo de volúmenes de material, seguimiento de avance de proyectos.
- **Gestión ambiental:** Evaluación de impacto ambiental, control de erosión y deforestación.
- **Inspección de infraestructuras:** Revisión de líneas eléctricas, oleoductos, puentes y edificios.
- **Gestión de emergencias:** Evaluación de daños tras desastres naturales y planificación de operaciones de rescate.

Beneficios:

- **Precisión y detalle:** Proporciona modelos y mediciones con errores mínimos.
- **Eficiencia:** Reduce tiempos y costos respecto a métodos tradicionales.
- **Accesibilidad:** Permite inspeccionar áreas de difícil acceso o peligrosas para el ser humano.

Limitaciones:

- **Condiciones climáticas:** El viento, la lluvia o la niebla pueden afectar la calidad de las imágenes y la estabilidad del dron.
- **Autonomía de vuelo:** Limitada por la capacidad de las baterías.
- **Regulaciones:** El uso de drones está sujeto a normativas que varían según el país y requieren licencias para operar en ciertos entornos.

6.1.3. Cámaras

Las cámaras de un dron fotogramétrico son uno de los componentes más importantes, ya que capturan las imágenes que luego se procesarán para crear modelos digitales, mapas y ortomosaicos. Existen diversos tipos de cámaras, cada una adaptada a aplicaciones específicas. A continuación, te detallo de manera exhaustiva todos los aspectos relacionados con las cámaras fotogramétricas:

Tipos de cámaras fotogramétricas:

- **Cámaras RGB (Red, Green, Blue):** Capturan imágenes en color, similares a las que toma una cámara convencional. Se utilizan para topografía, cartografía, inspección de infraestructuras y monitoreo de obras.

Ejemplos: DJI Zenmuse P1, Sony Alpha 7R IV.



Figura N° 62. Cámaras RGB dji.

Fuente: Sgdrones.es

- **Cámaras multiespectrales:** Capturan información en bandas específicas del espectro electromagnético, como el rojo, el verde, el azul, el infrarrojo cercano (NIR) y el rojo borde (Red Edge). Ideales para agricultura de precisión, detección de estrés hídrico y análisis de vegetación.

Ejemplos: Parrot Sequoia+, MicaSense RedEdge-MX.



Figura N° 63. Parrot Sequoia+.

Fuente: Liberdron.com

- **Cámaras hiperspectrales:** Capturan cientos de bandas espectrales, lo que permite un análisis más detallado de la composición del terreno o la vegetación. Aplicaciones en investigación ambiental, geología y detección de materiales específicos.

Ejemplos: Headwall Nano-Hyperspec.

- **Cámaras térmicas:** Detectan la radiación infrarroja emitida por objetos y superficies, creando imágenes basadas en las diferencias de temperatura. Se usan en búsqueda y rescate, inspección de infraestructuras, control de incendios y agricultura.

Ejemplos: FLIR Vue Pro R, DJI Zenmuse XT2.

- **Cámaras LIDAR (Light Detection and Ranging):** Utilizan pulsos láser para medir distancias con extrema precisión, creando nubes de puntos tridimensionales. Perfectas para topografía de alta precisión, arqueología y levantamientos forestales.

Ejemplos: RIEGL miniVUX, YellowScan Vx20.

- **Cámaras de 360°:** Capturan imágenes panorámicas, utilizadas en inspección de infraestructuras o entornos inmersivos.

Ejemplos: Insta360 Pro, Ricoh Theta Z1.

Especificaciones clave:

- **Resolución:**

Se mide en megapíxeles (MP). Cuanto mayor sea la resolución, mayor será el nivel de detalle capturado.

Para fotogrametría se recomienda al menos 20 MP, aunque cámaras profesionales superan los 40 MP o incluso los 100 MP en aplicaciones especializadas.

- **Tamaño del sensor:** Un sensor más grande capta más luz, resultando en imágenes de mejor calidad, especialmente en condiciones de poca luz.

Tipos comunes:

1/2.3" (pequeños drones comerciales).

APS-C o Full Frame (drones profesionales).

Medio formato (usado en cartografía de alta precisión).

- **Distancia focal:** Determina el campo de visión (FOV) de la cámara. Distancias focales cortas (ej. 24 mm) capturan áreas amplias, mientras que distancias largas (ej. 50 mm) capturan más detalle a largas distancias.
- **Obturador:** Los drones fotogramétricos deben tener un obturador mecánico para evitar el efecto de "Rolling shutter", que puede distorsionar las imágenes cuando el dron se mueve a alta velocidad.

- **Formato de imagen:** Se recomienda capturar en formato RAW para conservar la máxima calidad y flexibilidad durante el procesamiento.
- **Georreferenciación:** Algunas cámaras tienen receptores GPS integrados o se sincronizan con el sistema RTK/PPK del dron para registrar la posición exacta de cada imagen, lo que mejora la precisión de los modelos generados.

Accesorios esenciales:

- **Gimbal estabilizador:** Mantiene la cámara nivelada y estable durante el vuelo, corrigiendo vibraciones y movimientos bruscos. Algunos tienen 3 ejes, proporcionando estabilidad total.
- **Trigger o disparador automático:** Sincroniza la captura de imágenes con la posición GPS del dron. Se puede programar para tomar fotos a intervalos regulares o en puntos específicos de la ruta.
- **Almacenamiento:** Las cámaras de drones fotogramétricos requieren tarjetas de memoria rápidas y de gran capacidad (como SD o CFast) para gestionar grandes volúmenes de imágenes en vuelos largos.
- **Filtros:** Se usan filtros ND (densidad neutra) para controlar la exposición en condiciones de mucha luz, o filtros de polarización para reducir reflejos en superficies como agua o vegetación.

Proceso de captura:

- **Planificación del vuelo:** Se programa el dron para que vuele en una trayectoria con una superposición adecuada entre imágenes (generalmente entre el 60% y el 90%), garantizando la cobertura completa del área.
- **Captura de imágenes:** El dron vuela de forma autónoma, disparando la cámara automáticamente en los puntos planificados.
- **Corrección de datos:** En sistemas RTK/PPK, se corrige la posición de las imágenes para lograr precisiones centimétricas.
- **Procesamiento:** Se usan programas como Agisoft Metashape, Pix4D o DroneDeploy para procesar las imágenes y generar ortomosaicos, nubes de puntos y modelos digitales de elevación (MDE).
- **Aplicaciones específicas:** Cartografía y topografía: Creación de mapas detallados y modelos digitales del terreno. Agricultura de precisión: Evaluación del estado de los cultivos mediante cámaras multiespectrales.
- **Inspección de infraestructuras:** Revisión de líneas eléctricas, puentes y edificios con cámaras térmicas y RGB.
- **Minimización de riesgos:** Inspección de zonas peligrosas sin exponer personas al peligro.

6.1.4. Sensores

Los sensores de un dron fotogramétrico son componentes esenciales que permiten recolectar datos de alta precisión para la creación de mapas, modelos 3D y ortomosaicos. Estos sensores no solo capturan imágenes, sino que también miden variables del entorno y garantizan la estabilidad y navegación del dron. A continuación, se detalla de forma exhaustiva los distintos tipos de sensores que puede llevar un dron fotogramétrico y sus aplicaciones.

Sensores de captura de datos:

Estos sensores recogen la información principal que se utilizará en la fotogrametría.

- **Sensores ópticos RGB:** Capturan imágenes en los espectros rojo, verde y azul, creando fotografías a color de alta resolución. Se utilizan para generar ortomosaicos, modelos digitales de superficie y reconstrucciones 3D.

Ejemplos: Cámaras Sony Alpha, DJI Zenmuse P1.

- **Sensores multispectrales:** Capturan información en bandas específicas del espectro electromagnético, como el rojo, verde, azul, infrarrojo cercano (NIR) y el rojo borde (Red Edge).

Aplicaciones: Agricultura de precisión, monitoreo forestal, gestión del agua.

Ejemplos: MicaSense RedEdge, Parrot Sequoia+.

- **Sensores hiperespectrales:** Capturan cientos de bandas espectrales, proporcionando información detallada sobre la composición del terreno y la vegetación.

Aplicaciones: Identificación de minerales, evaluación de la salud de cultivos y estudios ambientales.

Ejemplos: Headwall Nano-Hyperspec.

- **Sensores térmicos:** Detectan la radiación infrarroja emitida por los objetos, creando imágenes térmicas que muestran variaciones de temperatura.

Aplicaciones: Inspección de infraestructuras, búsqueda y rescate, detección de incendios.

Ejemplos: FLIR Vue Pro R, DJI Zenmuse XT2.

Sensores de navegación y posicionamiento:

Estos sensores garantizan la estabilidad del dron y la precisión en la captura de datos.

- **GPS y GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite):** Determina la posición del dron en coordenadas geográficas. Los sistemas avanzados

incluyen tecnología RTK (Real-Time Kinematic) o PPK (Post-Processed Kinematic) para obtener precisiones centimétricas.

Aplicaciones: Georreferenciación precisa de imágenes, generación de modelos topográficos.

- **IMU (Unidad de Medición Inercial):** Mide la aceleración y la rotación del dron en los tres ejes (X, Y, Z). Combina acelerómetros, giroscopios y magnetómetros para calcular la orientación y detectar cambios de posición.

Aplicaciones: Estabilización de la cámara y corrección de la trayectoria de vuelo.

- **Barómetro:** Mide la presión atmosférica para calcular la altitud relativa.

Aplicaciones: Mantener la altura de vuelo constante, especialmente en vuelos automáticos.

- **Brújula digital o magnetómetro:** Detecta el campo magnético terrestre, ayudando a mantener la orientación del dron.

Aplicaciones: Corrección de la trayectoria y orientación precisa durante el vuelo.

Sensores de evitación de obstáculos:

Estos sensores permiten que el dron detecte y esquive obstáculos en su entorno.

- **Sensores ultrasónicos:** Emiten ondas sonoras que rebotan en los objetos cercanos, midiendo la distancia mediante el tiempo que tarda el eco en regresar.

Aplicaciones: Evitación de colisiones en entornos cerrados o con vegetación densa.

- **Sensores infrarrojos:** Detectan la proximidad de objetos midiendo la radiación infrarroja reflejada.

Aplicaciones: Evitación de obstáculos en condiciones de baja visibilidad.

- **Sensores de visión estereoscópica:** Utilizan dos cámaras para crear una imagen en 3D del entorno, similar a la percepción de profundidad del ojo humano.

Aplicaciones: Navegación autónoma y mapeo de entornos complejos.

- **Radar de ondas milimétricas:** Detecta objetos a largas distancias, incluso en condiciones climáticas adversas.

Aplicaciones: Navegación en entornos de baja visibilidad, como niebla o lluvia.

Sensores de control de vuelo:

Estos sensores permiten mantener el control y la estabilidad durante el vuelo.

- **Acelerómetros:** Miden la aceleración en cada eje, detectando cambios de velocidad y dirección.

Aplicaciones: Estabilización y corrección de la inclinación del dron.

- **Giroscopios:** Detectan la rotación del dron en los tres ejes, ayudando a mantener la estabilidad.

Aplicaciones: Compensación de movimientos bruscos y mantenimiento de la orientación.

- **Sensores ópticos de flujo:** Analizan el movimiento del suelo o los objetos bajo el dron para calcular la velocidad y mantener la posición.

Aplicaciones: Vuelo estacionario y navegación precisa a baja altitud.

Integración de sensores:

Los drones fotogramétricos combinan múltiples sensores en un sistema centralizado que:

- Recoge información de todos los sensores.
- Ajusta automáticamente la trayectoria del dron.
- Sincroniza la captura de imágenes con la posición GPS.
- Almacena los datos para el posterior procesamiento.

Aplicaciones de los sensores:

- **Topografía:** Creación de modelos digitales del terreno con precisión centimétrica.
- **Agricultura:** Análisis del estado de los cultivos mediante sensores multiespectrales.
- **Inspección industrial:** Identificación de puntos calientes en infraestructuras con cámaras térmicas.
- **Gestión ambiental:** Seguimiento de la deforestación y monitoreo de fauna.

6.1.5. Especificaciones

Un dron fotogramétrico es una aeronave no tripulada (UAV) equipada con sensores y cámaras especializadas para la captura de imágenes georreferenciadas, utilizadas en la generación de modelos 3D, ortomosaicos y cartografía de precisión. A continuación, se detallan sus especificaciones clave:

Características Generales:

- **Tipo de dron:** Multirrotores (mayor estabilidad y maniobrabilidad) o ala fija (mayor autonomía y cobertura).
- **Peso:** Generalmente entre 1.5 kg y 25 kg, dependiendo de la capacidad de carga y batería.
- **Dimensiones:** Varían según el tipo; multirrotores más compactos, alas fijas más grandes.

- **Materiales:** Fibra de carbono, plástico reforzado y aluminio para reducir peso y aumentar resistencia.
- **Autonomía:** Multirrotor: 20 - 40 min. Y Ala fija: 1 - 3 horas.
- **Velocidad máxima:** Multirrotor: 50 km/h. y ala fija: 100 km/h.
- **Resistencia al viento:** Hasta 40 km/h.

Cámara y Sensores:

- **Resolución:** Cámaras de 20 MP a 100 MP o más.
- **Tipo de sensor:** CMOS o CCD, generalmente de gran tamaño para mayor calidad.
- **Óptica:** Lentes con distorsión mínima y obturador mecánico para evitar el efecto gelatina.
- **Cámaras Multiespectrales / Termográficas (opcional):** Para estudios agrícolas y ambientales.

Sistema de Navegación y Georreferenciación:

- **GNSS / RTK / PPK:** Sistemas de posicionamiento con corrección de datos en tiempo real o post-procesamiento para precisión centimétrica.
- **IMU (Unidad de Medición Inercial):** Para registrar inclinación, velocidad y orientación.
- **Barómetro y Sensor de Altitud:** Para mejorar la estabilidad y precisión en la captura de imágenes.

Batería y Autonomía:

- **Tipo:** LiPo (Polímero de Litio) o Li-ion (Ión de Litio).
- **Capacidad:** Entre 4,000 mAh y 30,000 mAh, según el modelo.
- **Autonomía:** Multirrotor: 20-40 minutos.
- **Ala fija:** 1-3 horas.
- **Tiempo de carga:** Entre 60 y 180 minutos.

Software y Procesamiento de Datos:

- **Software de planificación de vuelo:** Pix4Dcapture, DJI Terra, UgCS, entre otros.
- **Software de procesamiento:** Agisoft Metashape, Pix4D Mapper, DroneDeploy, Global Mapper.
- **Formatos de salida:** Ortofotomosaicos, nubes de puntos, DEM (Modelo Digital de Elevación), MDT (Modelo Digital del Terreno).

Rango de Operación y Conectividad

- **Rango de comunicación:** 5 km a 15 km con radiofrecuencia o 4G/5G en modelos avanzados.
- **Velocidad máxima:** 50 km/h (multirrotor), 100 km/h (ala fija).
- **Resistencia al viento:** Hasta 40 km/h, dependiendo del peso y diseño.

Seguridad y Regulación:

- **Modos de seguridad:**

- ❖ Retorno a casa (RTH) automático.
- ❖ Detección y evitación de obstáculos con sensores ópticos y LIDAR.
- ❖ Protección contra fallos de batería y pérdida de señal.

Normativas: Certificación según la región (FAA, EASA, DGAC, etc.), requisitos de seguro y permisos de vuelo.

6.1.6. Tipos de dron

Los drones fotogramétricos se pueden clasificar en varios tipos según su diseño, funcionalidad y aplicación. Aquí están los principales:

Según el Diseño Aerodinámico:

❖ **Multirroto**

Características:

- Utilizan múltiples hélices (4, 6, 8 o más).
- Mayor estabilidad en vuelo estacionario.
- Despegue y aterrizaje vertical (VTOL).

Ventajas:

- Ideal para terrenos difíciles o espacios reducidos.
- Mayor control y precisión en la captura de imágenes.

Desventajas:

- Menor autonomía (20-40 minutos).

- Velocidad y cobertura limitada.

Ejemplo: DJI Phantom 4 RTK, DJI Matrice 300 RTK.

❖ **Ala Fija**

Características:

- Diseño similar a un avión con alas fijas.
- Despegue horizontal en pista o con catapulta.

Ventajas:

- Mayor autonomía (1-3 horas).
- Mayor cobertura de terreno en menos tiempo.

Desventajas:

- Requiere más espacio para operar.
- Menos estabilidad en vuelos estacionarios.

Ejemplo: SenseFly eBee X, WingtraOne.

Híbrido (VTOL - Despegue Vertical y Vuelo Fijo)

Características:

- Combinan hélices para despegue vertical y alas para vuelo de largo alcance.
- Flexibilidad en despegue y aterrizaje sin necesidad de pista.

Ventajas:

- Equilibrio entre autonomía y precisión.
- Puede cubrir grandes áreas sin perder estabilidad.

Desventajas:

- Más costosos y complejos en mantenimiento.

Ejemplo: Quantum Systems Trinity F90+, DJI Mavic 3 Enterprise.

Según la Tecnología de Captura:

- **Drones con Cámara RGB**

Uso: Cartografía, modelos 3D, planificación urbana.

Ejemplo: DJI Phantom 4 RTK.

- **Drones con Cámara Multiespectral**

Uso: Agricultura de precisión, monitoreo ambiental.

Ejemplo: Parrot Sequoia, DJI P4 Multispectral.

- **Drones con LIDAR**

Uso: Modelos digitales del terreno (MDT), arqueología, topografía de alta precisión.

Ejemplo: DJI Matrice 300 RTK + Zenmuse L1.

- **Drones con Cámara Termográfica**

Uso: Inspecciones industriales, búsqueda y rescate.

Ejemplo: DJI Mavic 3T, DJI Matrice 30T.

6.1.7. RTK EN DRON

El RTK (Real-Time Kinematic) es una técnica de medición satelital de alta precisión que se utiliza en drones fotogramétricos para mejorar la exactitud de la georreferenciación de las imágenes capturadas.

¿Cómo Funciona el RTK?

El RTK emplea correcciones en tiempo real de una estación base o red de referencia para mejorar la precisión de la ubicación del dron.

Proceso de Funcionamiento:

- **Recepción de Señales GNSS:** El dron recibe datos de satélites GPS, GLONASS, Galileo o BeiDou.
- **Correcciones Diferenciales:** Una estación base RTK o una red de referencia envía datos corregidos al dron en tiempo real.
- **Posicionamiento Preciso:** Se logra una precisión centimétrica (1-2 cm), reduciendo los errores de posición causados por la atmósfera y otros factores.

Beneficios del RTK en fotogrametría

- **Mayor Precisión:** Reducción de errores en la georreferenciación de imágenes sin necesidad de múltiples puntos de control en tierra (GCPs).
- **Menor Dependencia de GCPs:** Aunque sigue siendo recomendable utilizarlos en algunos casos, la cantidad necesaria se reduce considerablemente.
- **Ahorro de Tiempo:** Evita el post-procesamiento extenso de datos GNSS, ya que las correcciones se aplican en tiempo real.
- **Mayor Eficiencia en Grandes Áreas:** Útil para proyectos de cartografía y topografía de grandes extensiones.

Ejemplos de Drones con RTK

DJI Phantom 4 RTK → Para cartografía y levantamientos topográficos.

DJI Matrice 300 RTK → Uso industrial y mapeo avanzado.

WingtraOne PPK/RTK → Ala fija para grandes extensiones.

SenseFly eBee X RTK → Mapeo profesional de alta precisión.

6.1.8. Preparación de vuelo

La preparación de un Dron Fotogramétrico para garantizar un vuelo seguro y obtener imágenes de alta calidad, es fundamental seguir una correcta preparación del dron antes, durante y después del vuelo.

Antes del vuelo

Revisión del equipo:

- **Inspección Física**

Verificar el estado de la estructura, hélices y motores.

Revisar la batería (carga completa y sin daños).

Asegurar la correcta instalación de la cámara y sensores.

- **Configuración del RTK (si aplica)**

Conectar el dron con la estación base RTK o la red de referencia.

Verificar la señal GNSS y la corrección en tiempo real.

- **Planificación de Misión**

Definir el área a cartografiar con software como Pix4Dcapture, DJI Terra o UgCS.

Ajustar la superposición de imágenes (80% longitudinal y 70% transversal recomendado).

Establecer altura de vuelo (dependiendo de la resolución deseada).

Configurar parámetros de la cámara (ISO, velocidad de obturación, balance de blancos).

- **Condiciones Meteorológicas**

Revisar la velocidad del viento (idealmente < 30 km/h).

Evitar vuelos en lluvia o con nubosidad extrema.

Verificar la iluminación para evitar sombras excesivas.

- **Ubicación de Despegue**

Elegir un área despejada sin obstáculos cercanos.

Definir puntos de referencia en tierra (si se usan GCPs).

Durante el Vuelo:

- **Despegue y Monitoreo**

Verificar que el dron despegue sin problemas.

Supervisar en tiempo real la calidad de las imágenes capturadas.

Controlar la señal GNSS y la autonomía de la batería.

- **Seguridad en el Vuelo**

Activar el Retorno a Casa (RTH) en caso de emergencia.

Estar atento a interferencias o fallos en la comunicación.

Después del Vuelo:

- **Descarga y Revisión de Datos**

Extraer imágenes y datos GNSS desde la memoria del dron.

Revisar la calidad y superposición de imágenes.

- **Procesamiento de Datos**

Importar las imágenes a software como Pix4D Mapper, Agisoft Metashape o DroneDeploy.

Generar ortomosaicos, nubes de puntos y modelos 3D.

Aplicar correcciones GNSS (si se usa PPK en lugar de RTK).

- **Mantenimiento y Almacenamiento**

Limpiar el dron y almacenar en un lugar seguro.

Descargar y almacenar baterías al 50% para prolongar su vida útil.

Guardar los datos correctamente etiquetados para futuros análisis.

Consejos Finales:

- Siempre lleva baterías de repuesto.
- Usa una tarjeta de memoria rápida y con suficiente capacidad.
- Realiza vuelos de prueba antes de misiones importantes.
- Sigue las regulaciones locales de vuelo de drones.

6.1.9. Puntos de control

Información puntual sobre puntos de control (GCPs) para drones fotogramétricos:

Definición: Marcadores con coordenadas conocidas y precisas en el terreno, visibles en las fotografías aéreas.

Propósito Principal: Georreferenciar con precisión el modelo 3D generado a partir de las fotos.

Beneficios Clave:

- Precisión geométrica absoluta del modelo.
- Corrección de errores de la cámara y del vuelo.
- Escala uniforme del modelo.
- Posibilidad de realizar mediciones precisas.
- Alineación precisa de múltiples vuelos.

Características Ideales:

- Claramente visibles en las fotos (alto contraste).
- Ubicación estable (no se mueven).
- Distribución uniforme sobre el área.
- Coordenadas precisas (levantamiento topográfico).

Mínimo recomendado: Generalmente, al menos 4 o 5 GCPs bien distribuidos, más para áreas grandes o complejas.

Proceso Básico:

- Colocación: Se colocan antes del vuelo.
- Levantamiento: Se miden sus coordenadas con precisión.
- Identificación: Se marcan en las fotos durante el procesamiento.
- Ajuste: El software usa sus coordenadas para georreferenciar el modelo.

Tipos Comunes: Dianas prefabricadas, marcas pintadas, objetos identificables existentes.

Importancia Crítica: Sin GCPs precisos, la precisión geográfica del modelo fotogramétrico es limitada.

Puntos de Verificación (CPs): Puntos medidos en el terreno NO utilizados para el ajuste, sirven para validar la precisión del modelo final.

6.1.10. Intervenciones imprevistas

Intervenciones imprevistas en un vuelo de dron fotogramétrico

Durante un vuelo de dron fotogramétrico, pueden surgir diversas situaciones imprevistas que afecten la misión. Es importante conocerlas y saber cómo actuar para minimizar riesgos.

Problemas Técnicos

Pérdida de señal GPS o RTK:

- Causa: Interferencias electromagnéticas, áreas con mala cobertura satelital, fallos en el receptor GNSS.
- Solución: Esperar unos segundos para ver si la señal se restablece. Activar el modo de vuelo manual si es posible. Si el RTK falla, se puede recurrir a PPK (post-procesamiento).

Fallo de comunicación con el control remoto:

- Causa: Interferencia de radiofrecuencia, obstáculos entre el dron y el control, batería baja en el control remoto.
- Solución: Verificar que el dron tenga activado el Retorno a Casa (RTH) automático. Intentar moverse a una zona con mejor señal. Evitar volar en zonas con muchas señales Wifi u otras interferencias.

Falla en la cámara o sensores:

- Causa: Error en la configuración, conexión defectuosa, sobrecalentamiento.
- Solución: Aterrizar y revisar la conexión de la cámara. Reiniciar el dron y verificar los parámetros de la cámara. Si la cámara está dañada, usar una de respaldo si está disponible.

Condiciones ambientales adversas**Viento Fuerte:**

- Causa: Ráfagas inesperadas que afectan la estabilidad.
- Solución: Ajustar la altura de vuelo para minimizar el impacto del viento. Evitar volar si el viento supera la capacidad máxima del dron (generalmente 30-40 km/h).

Lluvia o Cambios Climáticos Repentinos:

- Causa: Cambio inesperado en el clima, nubes de tormenta.
- Solución: Aterrizar inmediatamente para evitar daños en la electrónica.
Consultar pronósticos meteorológicos antes del vuelo.

Iluminación Deficiente:

- Causa: Vuelos en condiciones de baja luz o con exceso de sombras.
- Solución: Ajustar la configuración de la cámara (ISO y velocidad de obturación). Programar el vuelo en horarios con mejor luz (evitar amanecer y atardecer extremos).

Riesgos de seguridad

Presencia de Obstáculos No Detectados:

- Causa: Árboles, cables eléctricos, edificios altos no mapeados en la planificación.
- Solución: Usar drones con sensores de detección de obstáculos. Realizar una inspección visual previa del área.

Presencia de Aves o Animales Salvajes:

- Causa: Ataque de aves grandes (halcones, águilas) o reacciones inesperadas de animales.

- Solución: Subir o bajar la altitud para alejarse del ave. Realizar vuelos en zonas sin actividad de fauna silvestre.

Drones No Autorizados o Personas en el Área de Vuelo:

- Causa: Otras aeronaves no tripuladas en el espacio aéreo o personas invadiendo la zona de operación.
- Solución: Suspender el vuelo hasta asegurar la zona. Coordinar con la autoridad local en caso de interferencia de otros drones.

Problemas con la batería o energía

Batería Baja Antes de lo Esperado:

- Causa: Mal cálculo de autonomía, viento fuerte, temperatura baja.
- Solución: Activar Retorno a Casa (RTH) antes de que la batería llegue al mínimo. Usar baterías de respaldo y evitar vuelos prolongados sin planificación.

Sobrecalentamiento de la Batería:

- Causa: Altas temperaturas, uso excesivo o mal almacenamiento.
- Solución: Dejar enfriar la batería antes de recargarla. Evitar exponer el dron al sol directo por largos periodos.

6.2. Dron LIDAR

6.2.1. Definición

Un dron con sistema LIDAR es una aeronave no tripulada equipada con un sensor LIDAR (Light Detection and Ranging), que utiliza pulsos láser para medir distancias con extrema precisión y generar modelos tridimensionales detallados del terreno, estructuras u objetos en su área de escaneo.

A diferencia de los drones fotogramétricos, que dependen de imágenes RGB para reconstrucciones 3D, los drones con LIDAR capturan millones de puntos por segundo, permitiendo penetrar la vegetación densa y mapear superficies ocultas, como el suelo de un bosque o estructuras enterradas.

Funcionamiento del sistema LIDAR en drones

El sistema LIDAR montado en un dron emite miles o millones de pulsos láser hacia el suelo. Cada pulso rebota en un objeto y regresa al sensor, registrando:

- Tiempo de vuelo del láser (para calcular la distancia).
- Intensidad del rebote (para identificar diferentes materiales).
- Ángulo de incidencia (para mejorar la precisión del modelo).

Los datos recopilados generan una nube de puntos 3D, que puede usarse para análisis geoespaciales, modelado topográfico y reconstrucción de estructuras.

Además, estos drones suelen integrar un sistema GNSS RTK/PPK (para posicionamiento georreferenciado) y una IMU (Unidad de Medición Inercial), que mejora la precisión en terrenos inclinados o difíciles.

Características claves de un dron con LIDAR

- **Alta Precisión:** Permite obtener datos con una exactitud de ± 2 a ± 5 cm, dependiendo del sensor y la configuración del vuelo.
- **Capacidad de Penetración:** Puede atravesar vegetación densa, capturando tanto la copa de los árboles como el suelo subyacente.
- **Generación Rápida de Datos:** En un solo vuelo, puede capturar millones de puntos, reduciendo el tiempo de procesamiento en comparación con la fotogrametría.
- **Menor Dependencia de las Condiciones de Luz:** A diferencia de la fotogrametría, el LIDAR no necesita luz solar y puede operar de noche o en condiciones de poca visibilidad.

Aplicaciones de los drones con LIDAR

Los drones con LIDAR se utilizan en una variedad de campos debido a su capacidad para capturar datos precisos en entornos complejos:

Topografía y cartografía:

- Creación de Modelos Digitales de Elevación (MDE) y Modelos Digitales del Terreno (MDT).

- Medición de volúmenes de material en minería y construcción.
- Generación de curvas de nivel precisas en estudios geoespaciales.

Ingeniería civil y construcción:

- Inspección de infraestructura como carreteras, puentes y edificios.
- Monitoreo del avance de proyectos con comparaciones antes/después.
- Control de calidad en obras viales y ferroviarias.

Medio ambiente y forestación:

- Análisis de la estructura del bosque (densidad, altura de árboles).
- Estudios de erosión y cambio climático.
- Mapeo de zonas afectadas por incendios forestales.

Arqueología:

- Descubrimiento de estructuras antiguas ocultas bajo la vegetación.
- Modelado de ruinas y reconstrucción de sitios históricos en 3D.

Agricultura de precisión:

- Evaluación de la altura y salud de cultivos.
- Control de erosión y planificación de riego.
- Detección de irregularidades en el suelo.

Seguridad y rescate:

Mapeo rápido de zonas de desastre para respuesta de emergencia.

Detección de cambios estructurales en edificios colapsados.

Ejemplos de drones con sistemas LIDAR

Aquí algunos modelos populares de drones equipados con LIDAR:

Ventajas y desventajas de usar LIDAR en drones:

Ventajas:

- Mayor precisión en levantamientos topográficos.
- Captura de datos en terrenos difíciles (bosques, montañas, minas).
- Menor necesidad de GCPs (Puntos de Control en Tierra).
- No requiere condiciones óptimas de luz.
- Rápido procesamiento de datos en comparación con la fotogrametría.

Desventajas:

- Costo elevado del sensor LIDAR.
- Mayor consumo de batería (drones LIDAR requieren más energía).
- Mayor complejidad en la operación y post-procesamiento.
- Menor resolución visual (las imágenes LIDAR no tienen color o textura como la fotogrametría).

Los drones con sistema LIDAR son herramientas poderosas para levantamientos topográficos, ingeniería, monitoreo ambiental y arqueología. Aunque su costo es mayor en comparación con la fotogrametría tradicional, su precisión, velocidad y

capacidad de capturar terrenos ocultos bajo vegetación los hacen esenciales para proyectos que requieren datos detallados y confiables.

6.2.2. Partes de un dron

Un dron con sistema LIDAR está compuesto por varias partes fundamentales que trabajan en conjunto para garantizar la precisión en la captura de datos y la estabilidad en el vuelo. A continuación, se detallan los principales componentes:

Plataforma aérea (Dron)

Es la estructura principal que transporta el sensor LIDAR y otros componentes.

Puede ser de tipo:

- Multirrotores (como el DJI Matrice 350 RTK) → Mayor estabilidad en vuelos a baja altitud.
- Ala fija (como Quantum Systems Trinity F90+) → Mayor autonomía para grandes extensiones.

Partes principales del dron:

- Chasis: Estructura que soporta todos los componentes.
- Motores y Hélices: Permiten el desplazamiento y estabilidad del dron.
- Baterías: Proveen la energía al dron y los sensores (LIDAR, GNSS, cámara).
- Controlador de Vuelo: Gestiona la navegación y estabilidad en el aire.

- **Sistema de Comunicaciones:** Permite la transmisión de datos entre el dron y la estación terrestre.

Sensor LIDAR

El componente clave para la generación de la nube de puntos. Se encarga de emitir pulsos láser y medir el tiempo que tardan en regresar después de rebotar en un objeto.

Partes del sensor LIDAR:

- **Emisor de Láser:** Genera los pulsos láser para medir distancias.
- **Receptor:** Detecta los pulsos reflejados para calcular posiciones.
- **Unidad de Escaneo:** Determina el patrón en el que se proyectan los láseres.
- **Procesador Interno:** Convierte los datos brutos en información georreferenciada.

Ejemplo de sensores LIDAR: DJI Zenmuse L1, RIEGL miniVUX-1, Velodyne Puck.

GNSS RTK/PPK (Sistema de Posicionamiento Satelital):

Permite obtener coordenadas precisas con correcciones en tiempo real (RTK) o en post-procesamiento (PPK).

Componentes del GNSS:

- **Antena GNSS:** Recibe señales de satélites GPS, GLONASS, Galileo o BeiDou.
- **Estación Base (opcional):** Mejora la precisión con correcciones en tiempo real.
- **Unidad de Procesamiento RTK/PPK:** Ajusta los datos satelitales para mayor exactitud.

(Unidad de Medición Inercial):

Un sensor esencial que mide los movimientos del dron en vuelo para corregir errores en la nube de puntos.

- **Acelerómetro:** Mide cambios en la velocidad.
- **Giroscopio:** Detecta inclinaciones y rotaciones.
- **Magnetómetro:** Identifica la orientación del dron en relación con el campo magnético terrestre.

Cámara RGB o Multiespectral (Opcional)

Algunos drones LIDAR incluyen una cámara adicional para superponer imágenes a la nube de puntos.

- **Cámara RGB:** Captura imágenes en color para modelos 3D fotorrealista.
- **Cámara Multiespectral:** Detecta diferentes longitudes de onda para análisis ambiental y agrícola.

- **Ejemplo:** La Zenmuse L1 integra un LIDAR con cámara RGB para combinar ambas tecnologías.

Sistema de almacenamiento de datos

Los datos capturados por el LIDAR y el GNSS se almacenan en una unidad de memoria.

- **Tarjeta SD / SSD:** Almacena datos en bruto del sensor LIDAR.
- **Computadora de Procesamiento:** Algunos drones avanzados procesan datos en tiempo real.

Estación de control en tierra

Dispositivo que permite pilotar el dron y monitorear los datos en tiempo real.

- **Control Remoto:** Permite la operación manual y configuración del vuelo.
- **Software de Planificación:** Define la ruta de vuelo y ajustes del LIDAR.
- **Pantalla de Telemetría:** Muestra información en vivo como altura, batería, estado del GNSS y calidad de datos.

6.2.3. Cámaras

Los sistemas LIDAR para drones a menudo se complementan con cámaras para obtener información visual adicional y para colorear la nube de puntos generada por el láser. Aunque el LIDAR en sí mismo no requiere una cámara para su funcionamiento principal de medición de distancia, la integración de cámaras proporciona valiosas capacidades adicionales:

Tipos de cámaras utilizadas

Cámaras RGB (Red, Green, Blue):

- **Propósito Principal:** Capturar imágenes aéreas tradicionales en color. Estas imágenes se utilizan principalmente para:
- **Colorear la Nube de Puntos LIDAR:** Al fusionar las imágenes RGB con la nube de puntos 3D, cada punto adquiere información de color, lo que facilita la interpretación visual y la creación de modelos 3D más realistas.
- **Generación de Ortomosaicos:** Las imágenes RGB pueden procesarse para crear ortomosaicos georreferenciados de alta resolución, que proporcionan una vista aérea detallada del área escaneada.
- **Inspección Visual:** Las imágenes pueden utilizarse para inspecciones visuales, identificación de objetos y evaluación de condiciones en el área levantada.
- **Características Comunes:** Suelen tener resoluciones que van desde los 20 megapíxeles o más, con sensores CMOS de diferentes tamaños (por ejemplo, 1 pulgada, APS-C, o incluso formato completo en sistemas más avanzados). Algunas cámaras pueden tener obturador mecánico para evitar la distorsión en movimientos rápidos.

Cámaras multiespectrales:

- **Propósito Principal:** Capturar imágenes en múltiples bandas del espectro electromagnético, incluyendo el visible (RGB) y otras bandas como el

infrarrojo cercano (NIR), el borde rojo (RedEdge), y en algunos casos, infrarrojo de onda corta (SWIR).

- **Aplicaciones en LIDAR:** Aunque no directamente relacionadas con la funcionalidad del LIDAR, las cámaras multiespectrales se utilizan en conjunto con los datos LIDAR para obtener información más completa en aplicaciones como:
- **Agricultura de precisión:** Evaluar la salud de los cultivos, identificar estrés hídrico o deficiencias de nutrientes, y estimar el rendimiento. La información de altura del LIDAR combinada con los índices espectrales proporciona un análisis más profundo.
- **Silvicultura:** Estimar la biomasa forestal, evaluar la salud de los árboles, y realizar inventarios forestales. El LIDAR proporciona la estructura vertical del bosque, mientras que las bandas multiespectrales ofrecen información sobre la composición y el vigor de la vegetación.
- **Análisis ambiental:** Monitorear cambios en la vegetación, evaluar la calidad del agua y estudiar ecosistemas.
- **Características comunes:** Tienen múltiples sensores, cada uno con un filtro óptico específico para capturar una banda espectral diferente.

Cámaras hiperespectrales:

- **Propósito principal:** Capturar imágenes en un rango aún más amplio y continuo de bandas espectrales que las cámaras multispectrales (a menudo cientos de bandas estrechas).
- **Aplicaciones avanzadas con LIDAR:** Se utilizan en investigaciones más especializadas donde se requiere una discriminación muy fina de los materiales, como:
 - ❖ **Investigación ambiental avanzada:** Análisis detallado de la composición de la vegetación, identificación de especies específicas, y detección de cambios sutiles en el medio ambiente.
 - ❖ **Minería y geología:** Identificación de tipos de rocas y minerales.
- **Características comunes:** Son más complejas y generan una gran cantidad de datos debido al alto número de bandas espectrales.
- **Propósito principal:** Capturar radiación infrarroja emitida por los objetos, lo que permite medir la temperatura superficial.
- **Aplicaciones específicas con LIDAR:** Pueden ser útiles en combinación con LIDAR para aplicaciones como:
 - ❖ **Inspección de infraestructuras:** Detección de puntos calientes en líneas eléctricas, paneles solares o edificios, donde la información 3D del LIDAR puede contextualizar la anomalía térmica.

- ❖ **Búsqueda y Rescate:** Localización de personas o animales en condiciones de baja visibilidad o en áreas densas, donde el LIDAR proporciona el entorno 3D.
- ❖ **Características Comunes:** Miden la intensidad de la radiación infrarroja en diferentes longitudes de onda.

Integración y sincronización:

Es crucial que la cámara esté correctamente integrada con el sistema LIDAR del dron. Esto incluye:

- **Montaje Preciso:** La cámara debe estar montada de forma estable y con una orientación conocida con respecto al sensor LIDAR.
- **Sincronización Temporal:** Los datos de la cámara (posición, orientación y tiempo de captura) deben sincronizarse con precisión con los datos del escaneo LIDAR utilizando el mismo sistema de navegación (GNSS/IMU) y sellos de tiempo. Esto permite la correcta georreferenciación y fusión de los datos.

Ejemplos de sistemas integrados:

Algunos fabricantes ofrecen sistemas LIDAR para drones que ya incluyen una cámara RGB integrada para facilitar el flujo de trabajo. Ejemplos incluyen el DJI Zenmuse L1 y L2, que combinan un sensor LIDAR con una cámara RGB de alta resolución.

6.2.4. Sensores

Además del propio sensor LIDAR, un dron equipado con este sistema utiliza una variedad de otros sensores cruciales para su funcionamiento seguro, preciso y eficiente, así como para la correcta adquisición y georreferenciación de los datos LIDAR. Aquí tienes una lista extendida de los sensores típicos en un dron con sistema LIDAR:

Unidad de medida inercial (IMU):

- **Función principal:** Mide la aceleración lineal y la velocidad angular del dron en los tres ejes (roll, pitch, yaw).
- **Importancia para LIDAR:** La IMU es fundamental para corregir el movimiento del dron durante el escaneo LIDAR. Los datos de la IMU se utilizan para determinar la orientación precisa del sensor LIDAR en cada instante, lo que permite georreferenciar correctamente los puntos de la nube. En sistemas LIDAR de alta precisión, se utilizan IMUs de grado geodésico o de navegación con baja deriva y alta frecuencia de muestreo.

Sistema de Navegación por Satélite (GNSS) - GPS, GLONASS, Galileo,

BeiDou:

- **Función principal:** Determina la posición geográfica del dron mediante la recepción de señales de satélites.

- **Importancia para LIDAR:** El GNSS proporciona la ubicación espacial del dron durante la adquisición de datos LIDAR. Para lograr la precisión centimétrica necesaria en muchas aplicaciones LIDAR, a menudo se utilizan sistemas GNSS de alta precisión que soportan técnicas como:
- **RTK (Real-Time Kinematic):** Proporciona correcciones en tiempo real desde una estación base o una red de referencia, permitiendo una precisión posicional muy alta durante el vuelo.
- **PPK (Post-Processed Kinematic):** Los datos GNSS se procesan después del vuelo utilizando información de una estación base, logrando también una alta precisión posicional.
- **Receptores multibanda:** Capaces de recibir señales de múltiples frecuencias de los satélites GNSS, lo que mejora la precisión y la resistencia a las interferencias.

Barómetro:

- **Función principal:** Mide la presión atmosférica, que se utiliza para estimar la altitud del dron.
- **Importancia para LIDAR:** El barómetro ayuda a mantener una altitud de vuelo constante, lo que es importante para la consistencia de la densidad de la nube de puntos LIDAR. También puede utilizarse como una fuente de información de altitud redundante.

Magnetómetro (Compás):

- **Función Principal:** Mide la intensidad y dirección del campo magnético terrestre para determinar la orientación del dron con respecto al norte magnético (yaw).
- **Importancia para LIDAR:** Ayuda en la navegación y el mantenimiento de la dirección de vuelo durante la adquisición de datos LIDAR. Sin embargo, en entornos con fuertes interferencias magnéticas, la precisión del magnetómetro puede verse afectada, y el sistema puede depender más de los datos del GNSS y la IMU para la orientación.

Sensores de evitación de obstáculos:

- **Función principal:** Detectan la presencia de objetos en la trayectoria del dron para evitar colisiones.
- **Sensores ultrasónicos:** Miden la distancia a los objetos mediante la emisión y recepción de ondas de sonido de alta frecuencia. Son efectivos para detectar obstáculos cercanos.
- **Sensores infrarrojos:** Detectan el calor emitido por los objetos.
- **Sensores de visión (Cámaras):** Utilizan algoritmos de visión por computadora para identificar obstáculos en tiempo real.
- **Sensores láser (aparte del LIDAR principal):** Sensores láser de corto alcance pueden utilizarse específicamente para la detección y evitación de obstáculos.

- **Importancia para LIDAR:** Aunque no están directamente relacionados con la adquisición de datos LIDAR, estos sensores son cruciales para la seguridad del vuelo, especialmente en entornos complejos donde se realiza el escaneo. Evitar colisiones protege tanto el dron como el valioso sensor LIDAR.

Sensores de flujo óptico:

- **Función principal:** Miden el movimiento aparente de la superficie terrestre debajo del dron utilizando una cámara orientada hacia abajo.
- **Importancia para LIDAR:** Pueden mejorar la estabilidad del vuelo, especialmente en entornos donde la señal GNSS es débil o no está disponible. También pueden proporcionar información de velocidad relativa sobre el suelo.

Codificadores de motor (Encoders):

- **Función principal:** Sensores que miden la posición y la velocidad de rotación de los motores.
- **Importancia para LIDAR:** Proporcionan información precisa sobre la velocidad de las hélices, lo que ayuda al controlador de vuelo a mantener la estabilidad y ejecutar comandos de manera precisa, lo cual es importante para una adquisición de datos LIDAR consistente.

Sensor de voltaje y corriente de la batería:

- **Función principal:** Monitorea el voltaje y la corriente de la batería para estimar la capacidad restante y el consumo de energía.
- **Importancia para LIDAR:** Permite al operador controlar el estado de la batería y planificar el vuelo de manera segura, asegurando suficiente energía para completar la misión LIDAR y regresar a la base.

Sensores ambientales (Opcional):

- **Función principal:** Pueden incluir sensores para medir la temperatura ambiente, la humedad y la presión atmosférica.
- **Importancia para LIDAR:** En algunas aplicaciones científicas o en condiciones ambientales extremas, estos sensores pueden proporcionar datos contextuales útiles.

Integración de sensores:

Todos estos sensores trabajan en conjunto, enviando datos al controlador de vuelo, que los procesa para mantener la estabilidad, navegar, evitar obstáculos y coordinar la adquisición de datos LIDAR. La sincronización precisa de los datos de la IMU, el GNSS y el sensor LIDAR es fundamental para lograr una nube de puntos georreferenciada y precisa.

6.2.5. Especificaciones

Especificaciones del sistema LIDAR:

- **Rango de detección:** La distancia máxima a la que el sensor LIDAR puede medir con precisión. Esto puede variar significativamente entre modelos (desde decenas hasta cientos de metros).
- **Precisión:** La exactitud de las mediciones de distancia. Se suele expresar en centímetros (vertical y horizontal).
- **Tasa de puntos (Point Rate):** La cantidad de puntos de datos que el sensor LIDAR puede capturar por segundo. Una tasa de puntos más alta resulta en nubes de puntos más densas y detalladas. Se mide en puntos por segundo (pts/s) o kilohercios (kHz).
- **Número de retornos:** La capacidad del sensor para detectar múltiples retornos de un solo pulso láser (por ejemplo, el primer retorno del dosel de un árbol y el último retorno del suelo). Esto es crucial para aplicaciones forestales y de modelado del terreno bajo vegetación.
- **Campo de visión (FOV):** El ángulo de escaneo horizontal y vertical del sensor LIDAR. Un FOV más amplio permite cubrir áreas más grandes en un solo vuelo.
- **Longitud de onda del láser:** La longitud de onda del láser utilizado puede influir en la capacidad de penetración a través de diferentes materiales (por ejemplo, vegetación, agua).

- **Clase de seguridad del láser:** Indica el nivel de riesgo para los ojos asociado con el láser. La mayoría de los LIDAR para drones son de Clase 1 o Clase 3R, considerados seguros bajo condiciones normales de uso.
- **Peso del sensor LIDAR:** Un factor crucial para la selección del dron, ya que afecta la carga útil máxima y la duración de la batería.
- **Dimensiones del sensor LIDAR:** Importante para la integración con diferentes plataformas de drones.
- **Interfaz de comunicación:** Cómo se conecta el sensor LIDAR con el dron para la alimentación, el control y la transmisión de datos (por ejemplo, Ethernet, serial).
- **Software de procesamiento:** El software compatible para procesar y analizar los datos LIDAR capturados.

Especificaciones del dron (Plataforma):

- **Tipo de dron:** Multirrotores (más común para LIDAR debido a su capacidad de vuelo estacionario) o ala fija (mayor autonomía y cobertura, pero menos maniobrabilidad).
- **Peso máximo al despegue (MTOW):** El peso total máximo permitido del dron, incluyendo la carga útil (sensor LIDAR, cámara, etc.).
- **Carga útil máxima:** El peso máximo que el dron puede transportar de forma segura.

- **Duración de la batería/tiempo de vuelo:** El tiempo que el dron puede permanecer en el aire con una carga específica. Esto es fundamental para la eficiencia del mapeo LIDAR.
- **Velocidad máxima de vuelo:** Importante para la planificación de la misión y la cobertura del área.
- **Resistencia al viento:** La capacidad del dron para mantener la estabilidad en condiciones de viento.
- **Sistema de posicionamiento:** GPS/GNSS de alta precisión (a menudo con RTK o PPK) para georreferenciar con exactitud los datos LIDAR.
- **Sistema de control de vuelo:** Características como planificación de misiones autónomas, seguimiento del terreno y evitación de obstáculos.
- **Cámara RGB integrada (Opcional):** Muchos sistemas LIDAR para drones incluyen una cámara RGB de alta resolución para generar nubes de puntos coloreadas y ortomosaicos. Especificaciones importantes incluyen la resolución del sensor (en megapíxeles) y la distancia focal del objetivo.
- **Gimbal:** Un sistema de estabilización para el sensor LIDAR y la cámara, asegurando datos de alta calidad incluso en condiciones de vuelo inestables.
- **Rango de transmisión:** La distancia máxima a la que se puede comunicar el dron con la estación terrestre.
- **Clasificación IP:** El nivel de protección contra el polvo y el agua.

- **Temperatura de operación:** El rango de temperaturas ambientales en las que el dron puede operar de forma segura.

Especificaciones del sistema integrado (Dron + LIDAR):

- **Peso total del sistema:** El peso combinado del dron y el sensor LIDAR.
- **Precisión del mapeo:** La precisión general de los mapas y modelos 3D generados con el sistema LIDAR. Esto depende de la precisión del sensor LIDAR, el sistema de posicionamiento del dron y el procesamiento de datos.
- **Densidad de puntos en el terreno:** El número de puntos LIDAR por unidad de área (por ejemplo, puntos por metro cuadrado) que se pueden lograr durante un vuelo típico. Esto depende de la tasa de puntos del sensor, la velocidad de vuelo y la altitud.

6.2.6. Tipos de dron

Hay dos tipos principales de drones que se utilizan comúnmente con sistemas LIDAR:

❖ Drones multirrotor:

Características: Estos drones utilizan múltiples rotores (hélices) para sustentarse en el aire. Son conocidos por su capacidad de despegar y aterrizar verticalmente (VTOL), volar estacionariamente (hovering) de manera precisa y realizar maniobras complejas a baja velocidad.

Ventajas para LIDAR:

- **Vuelo estacionario:** Permite una captura de datos LIDAR más densa y uniforme sobre áreas específicas.
- **Maniobrabilidad:** Facilita el vuelo en entornos complejos o con obstáculos.
- **VTOL:** Simplifica las operaciones de despegue y aterrizaje en áreas confinadas.

Desventajas:

- **Menor autonomía:** Suelen tener tiempos de vuelo más cortos en comparación con los drones de ala fija debido al mayor consumo de energía para el vuelo estacionario.
- **Menor cobertura por vuelo:** Cubren áreas más pequeñas en cada misión debido a su menor velocidad y autonomía.

Aplicaciones típicas con LIDAR:

- Inspección detallada de infraestructuras (puentes, torres, líneas eléctricas).
- Mapeo topográfico de alta precisión en áreas pequeñas o complejas.
- Modelado 3D detallado de edificios y estructuras.
- Agricultura de precisión para análisis de cultivos y terrenos.
- Silvicultura para inventario forestal y análisis de la estructura del dosel.

- Arqueología para el descubrimiento y documentación de sitios.

Ejemplos de plataformas multirrotores populares para LIDAR:

- DJI Matrice Series (M300 RTK, M350 RTK, M600 Pro)
- Freefly Alta X
- Acecore Zoe

❖ Drones de Ala Fija:

Características: Estos drones utilizan alas fijas para generar sustentación, similar a un avión convencional. Son conocidos por su alta eficiencia aerodinámica, lo que les permite cubrir grandes áreas con mayor autonomía y a mayor velocidad.

Ventajas para LIDAR:

- **Mayor autonomía:** Pueden volar durante períodos más largos, cubriendo extensiones de terreno más amplias en una sola misión.
- **Mayor cobertura por vuelo:** Su velocidad y autonomía permiten mapear grandes áreas de manera eficiente.

Desventajas:

- **Requieren espacio para el despegue y aterrizaje:** Necesitan pistas o sistemas de lanzamiento y recuperación específicos.
- **Menor maniobrabilidad a baja velocidad:** No son tan eficientes para el vuelo estacionario o las maniobras precisas en áreas confinadas.

- **Menos adecuados para inspecciones detalladas:** La alta velocidad dificulta la captura de datos muy detallados de objetos específicos.

Aplicaciones típicas con LIDAR:

- Mapeo topográfico de grandes extensiones de terreno.
- Monitoreo de cambios en grandes áreas geográficas (deslizamientos de tierra, deforestación).
- Planificación de infraestructuras a gran escala (carreteras, ferrocarriles).
- Agricultura de precisión para el mapeo de grandes campos.
- Minería para el cálculo de volúmenes y la planificación de operaciones.

Ejemplos de plataformas de ala fija populares para LIDAR:

- SenseFly eBee X
- WingtraOne GEN II
- Delair UX11

Consideraciones adicionales:

- **Capacidad de carga útil:** El peso del sistema LIDAR es un factor crucial para la elección del dron. Los drones deben tener la capacidad de transportar el sensor LIDAR, la unidad de procesamiento y cualquier otro equipo necesario sin comprometer la seguridad o el rendimiento del vuelo.
- **Estabilidad y precisión:** Un dron estable es fundamental para obtener datos LIDAR precisos. Los sistemas de control de vuelo avanzados y los

sistemas de posicionamiento de alta precisión (GPS/GNSS con RTK o PPK) son esenciales.

- **Integración del sistema LIDAR:** La compatibilidad y la facilidad de integración del sensor LIDAR con la plataforma del dron son consideraciones importantes. Algunos fabricantes ofrecen soluciones integradas, mientras que otros requieren la integración de componentes de diferentes proveedores.

La elección del tipo de dron con sistema LIDAR dependerá en gran medida de los requisitos específicos de la aplicación, incluyendo el tamaño del área a mapear, la precisión requerida, el entorno de operación y el presupuesto disponible. En muchos casos, los drones multirrotores son la opción más común debido a su versatilidad y capacidad para realizar vuelos estacionarios, lo cual es beneficioso para la captura de datos LIDAR de alta densidad. Sin embargo, los drones de ala fija son preferibles para el mapeo eficiente de grandes áreas.

6.2.7. RTK en dron

El uso de RTK (Real-Time Kinematic) en drones equipados con sistemas LIDAR es una práctica que puede utilizarse para lograr georreferenciación de alta precisión de los datos capturados. A continuación, se explicará su importancia y cómo funciona:

¿Qué es RTK y por qué es importante para drones con LIDAR?

- RTK es una técnica de posicionamiento satelital que utiliza datos de una estación base de referencia (ubicada en un punto conocido con alta precisión) para corregir en tiempo real las señales GNSS (Sistema Global de Navegación por Satélite) recibidas por el receptor del dron.
- La principal ventaja del RTK es que permite alcanzar una precisión centimétrica (horizontal y vertical) en el posicionamiento del dron durante el vuelo.
- Para los sistemas LIDAR, la precisión en la georreferenciación es crucial porque cada punto de la nube de puntos 3D generada se basa en la posición del dron en el momento de la captura. Sin una georreferenciación precisa, la nube de puntos resultante tendrá errores espaciales, lo que afectará la calidad y la utilidad de los modelos 3D y los mapas generados.

¿Cómo funciona el RTK en drones con LIDAR?

- **Estación base RTK:** Se instala una estación base GNSS en un punto conocido con coordenadas exactas. Esta estación base rastrea los mismos satélites GNSS que el receptor del dron.
- **Receptor RTK en el Dron:** El dron está equipado con un receptor GNSS RTK que también rastrea los satélites.

- **Comunicación en tiempo real:** La estación base envía correcciones a través de un enlace de comunicación inalámbrico (como radio o red celular) al receptor RTK del dron durante el vuelo.
- **Corrección de la posición:** El receptor RTK del dron utiliza estas correcciones en tiempo real para calcular su posición con una precisión centimétrica.
- **Georreferenciación de los datos LIDAR:** La posición precisa del dron, obtenida mediante RTK, se registra y se utiliza para georreferenciar cada punto de la nube de puntos LIDAR a medida que se captura.

Beneficios de utilizar RTK en drones con LIDAR:

- **Mayor precisión geográfica:** Se logra una precisión centimétrica en la ubicación de los puntos LIDAR, lo que resulta en modelos 3D y mapas altamente precisos.
- **Eliminación o reducción de la necesidad de puntos de control terrestre (GCPs):** Los GCPs son marcas físicas colocadas en el terreno con coordenadas conocidas que se utilizan tradicionalmente para georreferenciar datos aéreos. Con RTK, la alta precisión del posicionamiento del dron puede reducir significativamente o incluso eliminar la necesidad de GCPs, lo que ahorra tiempo y esfuerzo en el campo.

- **Flujos de trabajo más eficientes:** Al reducir o eliminar la necesidad de GCPs, se simplifica y acelera el proceso de adquisición y procesamiento de datos.
- **Mejor alineación de datos:** Las nubes de puntos LIDAR capturadas en diferentes vuelos o momentos se alinean con mayor precisión, lo que facilita el análisis de cambios a lo largo del tiempo.
- **Mayor confiabilidad de los datos:** La precisión mejorada del RTK conduce a datos geoespaciales más confiables para diversas aplicaciones.

Consideraciones al utilizar RTK con LIDAR:

- **Cobertura de la señal RTK:** Se necesita una comunicación constante y confiable entre la estación base y el dron para recibir las correcciones RTK. Obstáculos como edificios o terrenos accidentados pueden interferir con la señal.
- **Configuración de la estación base:** Es necesario configurar correctamente la estación base en un punto con coordenadas conocidas y asegurar su estabilidad durante la operación.
- **Costo:** Los sistemas GNSS RTK pueden ser más costosos que los receptores GNSS estándar.
- **Alternativas (PPK):** Otra técnica de post-procesamiento cinemático (PPK) también puede lograr una precisión similar al RTK, pero las

correcciones se aplican después del vuelo. PPK puede ser una alternativa en áreas donde la comunicación RTK en tiempo real es difícil de mantener.

La integración de la tecnología RTK en drones con sistemas LIDAR puede ser opcional, pero a la vez esencial para obtener datos geoespaciales de alta precisión. Permite una georreferenciación precisa en tiempo real, reduce la dependencia de los GCPs y mejora la eficiencia de los flujos de trabajo de mapeo y modelado 3D.

6.2.8. Preparación de vuelo

La preparación de vuelo de un dron con sistema LIDAR requiere una planificación meticulosa y la verificación de varios aspectos para garantizar la seguridad y la calidad de los datos recopilados. A continuación, se presenta una guía completa:

Planificación de la misión:

- **Definir los objetivos del levantamiento:** ¿Qué información se necesita obtener con el LIDAR? (ej. modelos digitales de elevación, detección de vegetación, inspección de infraestructuras).
- **Delimitar el área de interés:** Definir con precisión la zona que se va a mapear.

Consideraciones del entorno:

- **Obstáculos:** Identificar edificios, árboles altos, líneas eléctricas u otros obstáculos que puedan afectar la trayectoria del vuelo.

- **Terreno:** Analizar la topografía del área para planificar la altura de vuelo y asegurar una cobertura adecuada.
- **Vegetación:** Considerar la densidad y altura de la vegetación si esto afecta los objetivos del levantamiento.
- **Condiciones meteorológicas:** Revisar el pronóstico del tiempo (viento, lluvia, nubosidad) ya que pueden impactar la calidad de los datos LIDAR y la seguridad del vuelo. Evitar volar con lluvia, niebla densa o vientos fuertes.
- **Restricciones del espacio aéreo:** Verificar las regulaciones locales y las restricciones del espacio aéreo (zonas prohibidas, zonas restringidas, NOTAMs - Notice to Airmen). Obtener los permisos necesarios de las autoridades aeronáuticas de El Salvador.

Parámetros de vuelo:

- **Altura de vuelo:** Determinar la altura óptima para lograr la densidad de puntos LIDAR deseada y mantener una distancia segura de los obstáculos.
- **Velocidad de vuelo:** Ajustar la velocidad para asegurar una cobertura adecuada y evitar el desenfoque de los datos.
- **Solapamiento (Overlap):** Planificar el solapamiento lateral y frontal entre las pasadas para garantizar una cobertura completa y facilitar el

procesamiento posterior. Un solapamiento típico puede estar entre el 50% y el 80%.

- **Patrón de vuelo:** Seleccionar el patrón de vuelo adecuado (ej. líneas paralelas, cuadrícula) según la forma y las características del área de interés.
- **Configuración del sensor LIDAR:** Ajustar los parámetros del sensor LIDAR según los objetivos del levantamiento (ej. frecuencia de escaneo, número de puntos por escaneo).
- **Planificación de la estación base GNSS (si aplica PPK/RTK):** Seleccionar una ubicación adecuada para la estación base GNSS, con cielo abierto y lejos de obstrucciones que puedan afectar la recepción de la señal.

Preparación del Equipo

Dron:

- Inspeccionar el dron en busca de daños (estructura, hélices, motores, tren de aterrizaje).
- Verificar el funcionamiento de todos los sistemas (GPS, brújula, sensores).
- Calibrar la brújula del dron según las indicaciones del fabricante.
- Asegurarse de que el firmware del dron esté actualizado.
- Verificar el estado y la carga de las baterías del dron.
- Asegurarse de tener hélices de repuesto.

Sistema LIDAR:

- Inspeccionar el sensor LIDAR para verificar que esté limpio y sin daños.
- Asegurarse de que el sensor esté correctamente montado y conectado al dron.
- Verificar el funcionamiento del sistema de almacenamiento de datos del LIDAR (tarjeta SD, SSD).
- Asegurarse de que el firmware del sensor LIDAR esté actualizado.

Estación base GNSS (si aplica PPK/RTK):

- Verificar el estado y la carga de la batería de la estación base.
- Asegurarse de tener todos los accesorios necesarios (trípode, cableado).
- Conocer la ubicación precisa de la estación base o planificar su levantamiento.

Controlador terrestre (Estación de Control):

- Verificar el estado y la carga de la batería del controlador.
- Asegurarse de tener la última versión del software de control de vuelo instalada y funcionando correctamente.
- Verificar la conexión entre el controlador y el dron.
- Software de Planificación de Vuelo: Utilizar un software de planificación de vuelo compatible con el dron y el sensor LIDAR para crear y cargar la

misión de vuelo. Verificar que todos los parámetros de vuelo sean correctos.

Equipo adicional:

- Tarjetas SD adicionales.
- Herramientas básicas para reparaciones menores.
- Equipo de seguridad personal (chaleco reflectante, etc.).
- Botiquín de primeros auxilios.

Verificaciones previas al vuelo (Checklist)**Sitio de vuelo:**

- Confirmar que el área de despegue y aterrizaje esté libre de obstáculos y sea segura.
- Verificar que no haya personas o animales no autorizados cerca del área de vuelo.
- Evaluar las condiciones del viento en el sitio de vuelo.
- Comunicación: Verificar la comunicación entre el controlador y el dron.

Sensores:

- Confirmar que el sensor LIDAR esté encendido y funcionando correctamente.
- Verificar que el sistema de almacenamiento de datos esté listo.

- (Si aplica) Verificar la conexión y el funcionamiento de la estación base GNSS.

Software de vuelo:

- Confirmar que la misión de vuelo esté cargada correctamente en el software de control.
- Verificar todos los parámetros de vuelo (altura, velocidad, solapamiento, patrón de vuelo).
- Verificar la configuración de seguridad (altitud máxima, distancia máxima, retorno al punto de inicio en caso de pérdida de comunicación).
- Baterías: Verificar que las baterías del dron, el controlador y la estación base (si aplica) estén completamente cargadas.
- GPS: Asegurarse de que el dron tenga una buena recepción de la señal GPS antes del despegue.
- Calibración: Reconfirmar la calibración de la brújula si se ha cambiado de ubicación significativamente desde la última calibración.
- Lista de verificación final: Revisar una lista de verificación detallada antes del despegue para asegurarse de que no se haya omitido ningún paso importante.

Ejecución del vuelo

- **Despegue:** Realizar el despegue de manera segura y controlada.

- **Monitoreo del vuelo:** Mantener una vigilancia constante del dron durante el vuelo, monitoreando la altitud, la velocidad, la posición, el estado de la batería y cualquier advertencia o error que pueda surgir.
- **Adquisición de datos:** Asegurarse de que el sistema LIDAR esté adquiriendo datos correctamente durante toda la misión.
- **Aterrizaje:** Realizar el aterrizaje en un área segura y controlada.

5. Después del Vuelo:

- **Descarga de datos:** Descargar los datos LIDAR y los datos de vuelo del dron y de la estación base GNSS (si aplica).
- **Verificación de datos:** Realizar una verificación inicial de los datos LIDAR para asegurarse de que se hayan recopilado correctamente y que la cobertura sea la esperada.
- **Mantenimiento del equipo:** Realizar el mantenimiento básico del dron y del sensor LIDAR según las recomendaciones del fabricante.
- **Análisis y procesamiento de datos:** Utilizar software especializado para procesar los datos LIDAR y generar los productos finales deseados (nubes de puntos, modelos digitales, etc.).

Consideraciones adicionales específicas para El Salvador:

- **Regulaciones de drones:** Es fundamental conocer y cumplir con las regulaciones de la Autoridad de Aviación Civil (AAC) de El Salvador para la operación de drones. Esto puede incluir el registro del dron, la obtención

de licencias de piloto, restricciones de vuelo en ciertas áreas y requisitos de seguro.

- **Permisos especiales:** Dependiendo de la ubicación y el propósito del vuelo, puede ser necesario obtener permisos especiales de otras entidades gubernamentales o propietarios de terrenos.
- **Coordinación con autoridades locales:** En algunos casos, puede ser recomendable coordinar las operaciones de vuelo con la policía local u otras autoridades para evitar malentendidos o problemas de seguridad.

Siguiendo estos pasos y prestando atención a las regulaciones locales, se puede llevar a cabo una preparación de vuelo segura y eficiente para un dron con sistema LIDAR en El Salvador, garantizando la obtención de datos de alta calidad.

6.2.9. Puntos de control

Los puntos de control (Ground Control Points - GCPs) son marcadores de alta precisión colocados en el terreno cuyas coordenadas (latitud, longitud y altitud) se conocen con exactitud mediante levantamientos topográficos convencionales (estación total, GPS de alta precisión). Su uso es opcional, pero a su vez si se utiliza en el procesamiento de datos LIDAR adquiridos con drones, mejora la precisión geométrica del modelo 3D resultante.

A continuación, se presenta los puntos clave sobre los puntos de control en un levantamiento con dron y sistema LIDAR:

¿Podrían ser importantes los GCPs para LIDAR con drones?

- **Georreferenciación con mayor precisión:** Los GCPs permiten georreferenciar la nube de puntos LIDAR al sistema de coordenadas deseado con alta precisión absoluta. Sin GCPs, la nube de puntos estaría referenciada internamente, pero su ubicación geográfica real podría tener errores significativos.
- **Corrección de errores:** Los GCPs ayudan a corregir errores sistemáticos en los datos LIDAR y en la trayectoria del vuelo del dron, como deriva del GPS/GNSS, errores de IMU (Unidad de Medición Inercial) y distorsiones del sensor.
- **Mejora de la precisión vertical:** Los GCPs son especialmente importantes para mejorar la precisión vertical del modelo digital de elevación (DEM) generado a partir de los datos LIDAR.
- **Validación de la precisión:** Los GCPs independientes (no utilizados en el ajuste) pueden utilizarse para validar la precisión geométrica del modelo LIDAR final.
- **Alineación de múltiples vuelos:** Si un área grande requiere varios vuelos, los GCPs aseguran que las nubes de puntos de diferentes vuelos se alineen correctamente.

Características de los buenos GCPs:

- **Claramente identificables:** Deben ser objetos o marcas fácilmente visibles en los datos LIDAR (nube de puntos) y en las imágenes RGB (si se utilizan simultáneamente).
- **Ubicación estable:** Deben estar ubicados en superficies planas y estables que no se muevan durante el periodo del levantamiento.
- **Distribución estratégica:** Deben estar distribuidos uniformemente sobre el área de interés, tanto horizontal como verticalmente, para proporcionar una buena cobertura para el ajuste.
- **Coordenadas precisas:** Sus coordenadas deben ser determinadas con un equipo topográfico de alta precisión y con métodos adecuados.
- **Número adecuado:** La cantidad de GCPs necesarios depende del tamaño y la complejidad del área, la precisión requerida y la calidad del sistema LIDAR y del GPS/GNSS del dron. Generalmente, se recomienda tener al menos 5 GCPs bien distribuidos, pero en áreas más grandes o con mayor variabilidad topográfica, se necesitarán más.

Tipos comunes de GCPs:

- **Dianas prefabricadas:** Son placas circulares o cuadradas con patrones de alto contraste (blanco y negro o naranja y blanco) que son fácilmente identificables en los datos. Vienen en diferentes tamaños.

- **Marcas pintadas:** Se pueden pintar cruces o círculos de colores brillantes directamente sobre superficies duras como asfalto o concreto.
- **Objetos naturales o artificiales existentes:** Se pueden utilizar características permanentes y claramente identificables como esquinas de edificios, centros de tapas de alcantarillas, marcas viales, etc., siempre y cuando sus coordenadas puedan determinarse con precisión.

Proceso de uso de GCPs en un levantamiento LIDAR con dron:

- **Planificación:** Durante la planificación de la misión, se decide la ubicación y el número de GCPs necesarios para cubrir el área de interés de manera efectiva.
- **Colocación:** Se colocan físicamente los GCPs en las ubicaciones planificadas antes del vuelo del dron. Es importante asegurarse de que estén bien fijados y sean claramente visibles.
- **Levantamiento topográfico:** Se miden las coordenadas (X, Y, Z o latitud, longitud, altitud) de cada GCP utilizando un equipo topográfico de alta precisión (estación total o receptor GNSS RTK/PPK). Es crucial registrar estas coordenadas con la mayor exactitud posible.
- **Adquisición de datos LIDAR:** Se realiza el vuelo del dron con el sistema LIDAR, capturando la nube de puntos del área de interés.
- **Identificación de GCPs en la nube de puntos:** Durante el procesamiento de los datos LIDAR, se identifican visualmente las ubicaciones de los

GCPs en la nube de puntos. Esto se realiza utilizando software especializado.

- **Ajuste de la nube de puntos:** Se utiliza el software de procesamiento para realizar un ajuste de la nube de puntos, utilizando las coordenadas conocidas de los GCPs para corregir la posición y orientación de la nube de puntos. El software busca la mejor transformación que haga coincidir las ubicaciones de los GCPs en la nube de puntos con sus coordenadas medidas en el terreno.
- **Generación de productos finales:** Una vez ajustada la nube de puntos, se pueden generar los productos finales como modelos digitales de elevación (DEM/DTM), modelos 3D, curvas de nivel, etc., con una precisión geométrica mejorada.
- **Validación:** Se pueden utilizar GCPs independientes (no utilizados en el ajuste) para verificar la precisión del modelo final. Se comparan las coordenadas de estos puntos en el modelo con sus coordenadas medidas en el terreno.

Consideraciones importantes:

- **Precisión del levantamiento de GCPs:** La precisión de los GCPs es fundamental. Cualquier error en la medición de las coordenadas de los GCPs se propagará al modelo LIDAR.

- **Visibilidad:** Asegurarse de que los GCPs sean claramente visibles desde la altura de vuelo del dron y en los datos LIDAR.
- **Documentación:** Registrar cuidadosamente la ubicación de cada GCP (puede ser útil tomar fotos), su tipo y sus coordenadas.
- **Software de procesamiento:** Utilizar software de procesamiento LIDAR que admita la incorporación de GCPs para el ajuste de la nube de puntos.

6.2.10. Intervenciones imprevistas

Las intervenciones imprevistas durante un vuelo de dron con sistema LIDAR en El Salvador (o en cualquier otro lugar) pueden surgir debido a una variedad de factores, desde problemas técnicos hasta condiciones ambientales inesperadas. Es crucial estar preparado para manejarlas de manera segura y eficiente para proteger el equipo, la integridad de los datos y la seguridad de las personas en tierra.

A continuación, se presenta algunas intervenciones imprevistas comunes y cómo podrían abordarse:

Problemas técnicos del Dron

Pérdida de señal de control:

- **Intervención:** El dron debería estar programado para activar el protocolo de "Retorno al Punto de Inicio" (RTH) automáticamente. Monitorear la telemetría para verificar si la señal se recupera. Si no se recupera y el dron

aterriza de forma autónoma, asegurar el área antes de acercarse. Investigar la causa de la pérdida de señal (interferencia, distancia excesiva, problemas con la antena).

Batería baja inesperada:

- **Intervención:** El dron debería alertar sobre el nivel bajo de batería. Iniciar manualmente el RTH o intentar un aterrizaje seguro en un área despejada cercana si el RTH no es factible o si la distancia al punto de inicio es demasiado grande.

Fallo del motor o de la hélice:

- **Intervención:** Esto es una emergencia. Intentar mantener el control del dron si es posible y dirigirlo a un área segura para un aterrizaje de emergencia. Si la pérdida de control es inminente, priorizar evitar daños a personas o propiedades. Inspeccionar el dron después del incidente para identificar la causa.

Mal funcionamiento del GPS/GNSS:

- **Intervención:** El dron podría volverse inestable o perder la capacidad de mantener la posición con precisión. Si es seguro hacerlo, intentar volar manualmente a un área despejada y aterrizar. Si el vuelo se basa en waypoints, la misión podría verse comprometida.

Fallo del sensor LIDAR:

- **Intervención:** Si se detecta un mal funcionamiento del LIDAR (datos erróneos, falta de datos), puede ser necesario abortar la misión y regresar el dron de forma segura. Evaluar si los datos recopilados hasta el momento son útiles o si se requiere un nuevo vuelo.

Problemas con el Sistema LIDAR**Errores de adquisición de datos:**

- **Intervención:** Si se observan datos inconsistentes o errores en tiempo real (si el software lo permite), considerar abortar la misión. Analizar los registros del sensor después del vuelo para identificar la causa (obstrucciones, configuración incorrecta).

Problemas de sincronización entre el LIDAR y el dron:

- **Intervención:** Esto puede llevar a datos georreferenciados incorrectamente. Si se sospecha un problema de sincronización, abortar la misión y verificar la configuración y el cableado del sistema.

Obstrucción del láser:

- **Intervención:** Si algo obstruye el campo de visión del láser (ej. una rama que se mueve), esto puede generar huecos en los datos. Si es una obstrucción temporal, el problema podría resolverse solo. Si es

persistente, podría ser necesario ajustar la trayectoria del vuelo o abortar la misión.

Condiciones ambientales inesperadas

Cambios repentinos en el clima (viento fuerte, lluvia, niebla):

- **Intervención:** Monitorear constantemente las condiciones climáticas. Si el viento excede los límites de seguridad del dron, o si comienza a llover o formarse niebla densa, abortar la misión inmediatamente y regresar el dron al punto de inicio o a un área segura para aterrizar. La lluvia y la niebla pueden afectar la calidad de los datos LIDAR y la seguridad del vuelo.

Interferencia electromagnética inesperada:

- **Intervención:** La interferencia puede afectar la señal de control o el sistema GPS. Si se experimentan comportamientos erráticos del dron, intentar alejarlo de la fuente de interferencia si se puede identificar y es seguro hacerlo. Si el problema persiste, aterrizar el dron de forma segura.

Presencia inesperada de personas o animales:

- **Intervención:** Mantener una distancia segura de personas y animales en todo momento. Si su presencia interfiere con la misión o representa un riesgo, pausar o abortar el vuelo hasta que el área esté despejada.

Problemas con la estación de control terrestre (GCS)

Fallo del software de control:

- **Intervención:** Si el software de control falla, intentar reiniciarlo rápidamente. Si el problema persiste, el dron debería activar el protocolo RTH. Asegurarse de tener un plan de contingencia para controlar el dron manualmente si es necesario.

Pérdida de energía del GCS:

- **Intervención:** Asegurarse de que la batería del GCS esté suficientemente cargada. Si la energía se agota inesperadamente, el dron debería activar el RTH.

Protocolos Generales para Intervenciones Imprevistas:

- **Mantener la calma:** Es fundamental mantener la calma para tomar decisiones racionales bajo presión.
- **Priorizar la seguridad:** La seguridad de las personas y del equipo debe ser siempre la máxima prioridad.
- **Seguir los protocolos de emergencia:** Tener protocolos de emergencia predefinidos para diferentes escenarios.
- **Comunicación:** Mantener la comunicación con el observador del vuelo (si hay uno) y con cualquier persona relevante en tierra.

- **Abortar la misión si es necesario:** No dudar en abortar la misión si las condiciones son inseguras o si se produce un fallo técnico significativo.
- **Documentar el incidente:** Registrar detalladamente cualquier intervención imprevista, incluyendo la hora, la ubicación, la descripción del problema y las acciones tomadas. Esto ayudará a analizar la causa y prevenir futuros incidentes.
- **Inspección post-vuelo:** Después de cualquier intervención imprevista, realizar una inspección exhaustiva del dron y del sistema LIDAR antes del próximo vuelo.

Preparación para Intervenciones Imprevistas:

- **Planificación exhaustiva:** Una buena planificación puede ayudar a anticipar algunos problemas.
- **Verificaciones previas al vuelo rigurosas:** Asegurarse de que todo el equipo esté en perfectas condiciones de funcionamiento antes del despegue.
- **Conocimiento profundo del equipo y del software:** Estar familiarizado con las capacidades y limitaciones del dron y del sistema LIDAR.
- **Entrenamiento adecuado:** Los pilotos y operadores deben estar bien entrenados en el manejo de situaciones de emergencia.
- **Listas de verificación de emergencia:** Tener listas de verificación detalladas para diferentes escenarios de emergencia.

- **Plan de contingencia:** Desarrollar un plan de contingencia que incluya procedimientos para diferentes tipos de fallos o condiciones inesperadas.
- **Seguro:** Contar con un seguro adecuado para cubrir posibles daños o responsabilidades.

CAPITULO 7 LEVANTAMIENTOS FOTOGRAMETRICOS CON DRON

7.1. Levantamiento en campo

7.1.1. Descripción y ubicación del lugar

El área del levantamiento fotogramétrico se realizó en la finca Lutecia, perteneciente al centro urbano de planes de Renderos; éste es un centro urbano compartido por tres distritos salvadoreños del municipio de San Salvador Sur, departamento de San Salvador: Panchimalco, San Marcos y San Salvador, la capital del país. Este se encuentra alrededor de 9.5 kilómetros al sureste de la capital y supone la frontera sur del área metropolitana de San Salvador. Además, una altitud media de 1,000 metros sobre el nivel de mar, mantiene un intervalo entre los 504 a 1,131.24 m.s.n.m.

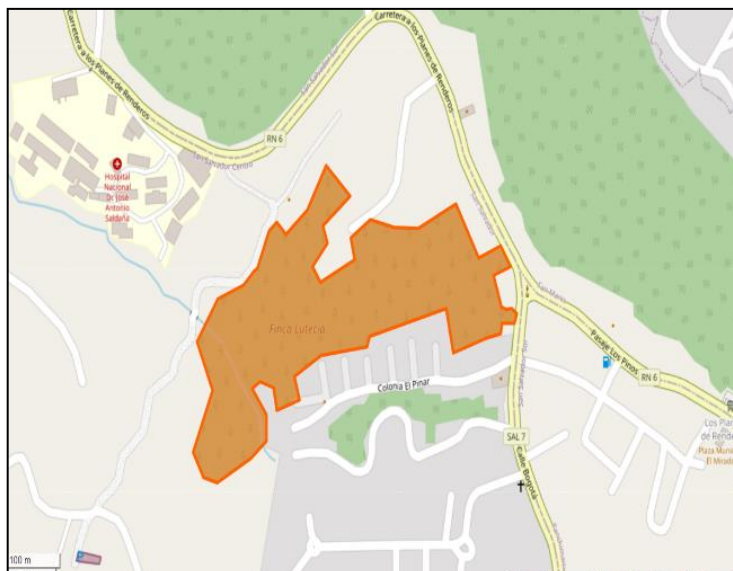


Figura N° 64. Ubicación de Finca Lutecia

Fuente: www.google.com/maps

Finca Lutecia es un bosque de coníferas y se ubica a una altitud de entre 950 a 1,000 metros sobre el nivel del mar. Con una Longitud -89.1905° o $89^{\circ} 11' 26''$ oeste y una Latitud 13.6453° o $13^{\circ} 38'$ norte.

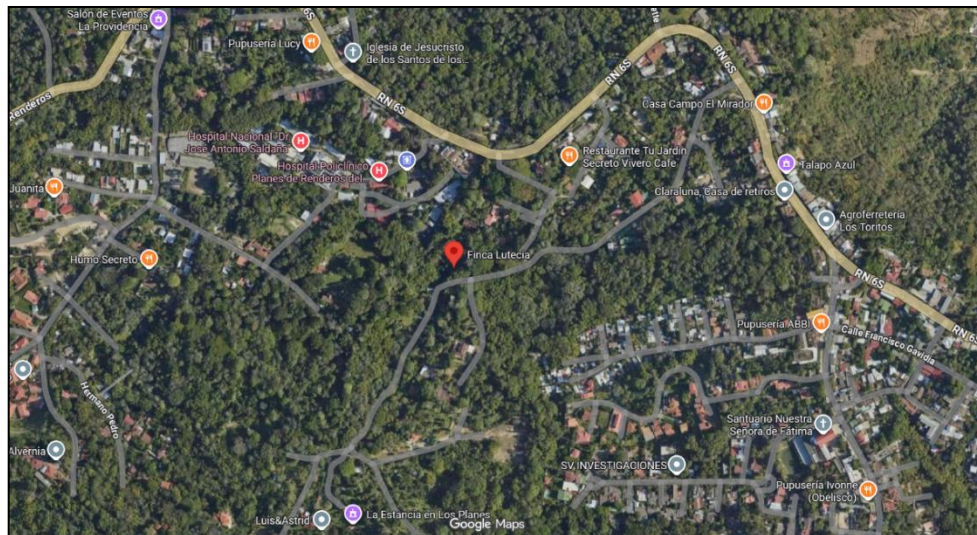


Figura N° 65. Mapa Satelital de la Finca

Fuente: [Google.com/maps](https://www.google.com/maps)

7.1.2. Pix4D Capture



Figura N° 66. Pix4D Capture

Fuente: [Runco.com.ar](https://www.runco.com.ar)

Pix4Dcapture es una aplicación móvil gratuita para Android y iOS que planifica vuelos de drones, permitiendo a los usuarios crear y ejecutar misiones de mapeo para capturar datos de imágenes de manera optimizada. Estos datos se utilizan luego para generar mapas y modelos 3D georreferenciados mediante el uso de otros softwares de la suite de Pix4D, como Pix4Dmapper o la plataforma en la nube Pix4Dcloud.

Funciones clave de Pix4Dcapture:

- **Planificación de vuelos:** Permite definir áreas de interés y generar planes de vuelo para obtener una cobertura óptima de imágenes.
- **Captura de datos:** Facilita la recopilación de datos de imágenes para diversas aplicaciones, como la topografía, la inspección de infraestructuras y la agronomía.
- **Soporte para drones:** Es compatible con una amplia gama de drones, lo que la convierte en una herramienta versátil para profesionales.
- **Mapas sin conexión:** Permite descargar mapas base para planificar y trabajar sin conexión en áreas con conectividad limitada.

¿Cómo funciona?

1. **Planifica el vuelo:** Usando tu dispositivo móvil, defines el área que quieres mapear y el tipo de misión de vuelo.

2. **Ejecuta la misión:** La aplicación controla tu dron para capturar automáticamente las imágenes necesarias.
3. **Procesa los datos:** Las imágenes capturadas se importan al software de escritorio Pix4Dmapper o a la plataforma en la nube Pix4Dcloud para su procesamiento y creación de mapas.

Beneficios de usar Pix4Dcapture:

- **Optimización de la captura:** Ayuda a obtener datos de imágenes de alta calidad para la fotogrametría.
- **Flujo de Trabajo simplificado:** Convierte tu dron en una herramienta de mapeo profesional, integrándose con otros softwares de Pix4D.
- **Acceso desde Dispositivos Móviles:** Al ser una aplicación para Android e iOS, es fácilmente accesible para los usuarios.

7.1.3. Preparación y configuración del equipo

Al llegar a la zona, se realizó un recorrido previo por todo el perímetro para verificar el área más óptima para realizar el vuelo; una vez observado el lugar más ideal para iniciar con los preparativos, se colocaron las estaciones para la obtención de los puntos de control con la técnica de medición de coordenadas RTK.



Figura N° 67. Colocación de estaciones para puntos de control.

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

En esta etapa colocamos 4 estaciones en puntos estratégicos para la toma de los puntos de control fotogramétricos, la decisión de tomar cuatro puntos fue el hecho de que el área a levantar era pequeña. Una vez colocadas estas estaciones nos dirigimos al lugar donde iniciaríamos con el vuelo fotogramétrico.

El primer paso fue el armado del equipo a utilizar, para ello contamos con:

1. Dron Mavic 2 Pro
2. Control remoto
3. Dispositivo Móvil para el enlace con el Control remoto



Figura N° 68. Preparando el equipo para el vuelo

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

Se comenzó la preparación del equipo que se utilizó para el vuelo fotogramétrico y se hicieron los respectivos ajustes para la recopilación de datos a recabar.

Dron utilizado para el vuelo fotogramétrico:



Figura N° 69. Dron Mavic 2 Pro

Fuente: Videolinea.com

Características del Dron Mavic 2 Pro:

Una de las características que llamaron la atención del Mavic 2 Pro, fueron las lentes de su cámara de la marca sueca Hasselblad L1D-20C. Poseen un focal equivalente a 28 mm superando a los modelos anteriores.

Cuenta con un sensor CMOS de 1" de 20 megapíxeles (lo cual le confiere una mayor resolución y detalle) y que tiene una apertura ajustable de f/2.8 a f/11.

Otra característica interesante es que permite que las fotografías tengan un perfil de color Dlog-M de 10 bits, al igual que para video HDR. Lo que resulta en una mayor flexibilidad y rango dinámico al momento de la edición.

Por otra parte, este equipo tiene un sistema de transmisión de video OcuSync 2.0 y un cambio de frecuencia automático entre 2.4 y 5.8 GHz.

En general, es un equipo muy completo, se puede mantener una distancia de transmisión de video de hasta 8 km a 1080p con 31 minutos de duración de tiempo de vuelo. Este dron aporta funciones de time-lapse, panorámicas, así como de hyperlapse y ráfaga.

Cámara:

- **Sensor:** 1" CMOS. Píxeles efectivos: 20 millones
- **Objetivo:** FOV: 77°. Formato equivalente a 35 mm: 28 mm. Apertura: f/2.8 – f/11. Distancia de enfoque: 1 m a ∞

- **Rango ISO:** Vídeo: 100 – 6400 (automático). Foto: 100 – 3200 (auto).
100 – 12 800 (manual).
- **Velocidad de obturación:** Obturador electrónico: 8 – 1/8000 s.
- **Tamaño de fotografía:** 5472x3648.
- **Modos de fotografía:** Disparo único. Disparo en ráfaga: 3/5 fotogramas. Exposición automática en horquillado (AEB), 3/5 horquillas de exposición a 0.7 EV bias. Intervalo: (JPEG: 2/3/5/7/10/15/20/30/60s RAW:5/7/10/15/20/30/60s).
- **Resolución de vídeo:** 4K: 3840x2160 24/25/30p
2.7K: 2688x1512 24/25/30/48/50/60p
FHD: 1920x1080 24/25/30/48/50/60/120p
- **Tasa de bits máx. de almacenamiento de vídeo:** 100 Mbps
- **Modo de color:** Dlog-M (10 bits), permite vídeo en HDR (HLG 10 bits)
- **Sistemas de archivo compatibles:** FAT32 (\leq 32 GB). exFAT ($>$ 32 GB)
- **Formatos de fotografía:** JPEG / DNG (RAW)
- **Formatos de vídeo:** MP4 / MOV (MPEG-4 AVC/H.264, HEVC/H.265)

Aeronave

- **Peso de despegue:** 907 g (Mavic 2 Pro)905 g (Mavic 2 Zoom)

- **Dimensiones: Plegado:** 214x91x84 mm (largo x ancho x alto)
Desplegado: 322x242x84 mm (largo x ancho x alto)
- **Distancia diagonal:** 354 mm
- **Velocidad máx. en ascenso:** 5 m/s (modo S), 4 m/s (modo P)
- **Velocidad máxima (cerca del nivel del mar, sin viento):** 72 km/h (modo S)
- **Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar:** 6000 m.
- **Tiempo máx. de vuelo (sin viento):** 31 minutos (a una velocidad constante de 25 km/h).
- **Tiempo máx. en vuelo estacionario (sin viento):** 29 minutos
- **Distancia máx. de vuelo (sin viento):** 18 km (a una velocidad constante de 50 km/h).
- **Resistencia al viento máx.:** 29 – 38 km/h.
- **Ángulo de inclinación máx.:** 35° (Modo S, con control remoto) 25° (Modo P).
- **Velocidad angular máx.:** 200°/s
- **Rango de temperatura de funcionamiento:** -10 °C – 40 °C
- **Frecuencia de funcionamiento:** 2.400 – 2.483 GHz
5.725 – 5.825 GHz

- **Transmisión de potencia (PIRE):** 2.400 – 2.483 GHz: FCC: ≤ 26 dBm. CE: ≤ 20 dBm.; 5.725 – 5.850 GHz: FCC: ≤ 26 dBm. CE: ≤ 14 dBm
- **GNSS:** GPS + GLONASS.
- **Rango de precisión en vuelo estacionario:** Vertical: ± 0.1 m (con posicionamiento visual). ± 0.5 m (con posicionamiento por GPS).; Horizontal: ± 0.3 m (con posicionamiento visual). ± 1.5 m ((con posicionamiento por GPS)
- **Almacenamiento interno:** 8 GB.

Sistema de detección

- **Sistema de detección:** Detección de obstáculos omnidireccional
- **Frontal:** Alcance de la medición con precisión: 0.5 – 20 m
- **Alcance de detección:** 20 – 40 m
- **Velocidad de detección efectiva:** ≤ 14 m/s
- **Campo de visión (FOV):** Horizontal: 40° , Vertical: 70°
- **Trasero:** Alcance de la medición con precisión: 0.5 – 16 m
Alcance de detección: 16 – 32 m
Velocidad de detección efectiva: ≤ 12 m/s
Campo de visión (FOV): Horizontal: 60° , Vertical: 77°
- **Superior:** Alcance de la medición con precisión: 0.1 a 8 m

- **Inferior:** Alcance de la medición con precisión: 0.5 a 11 m
Rango de detección: 11 a 22 m
- **Lateral:** Alcance de la medición con precisión: 0.5 a 10 m
Velocidad de detección efectiva: ≤ 8 m/s
FOV: Horizontal: 80°; Vertical: 65°
- **Entorno operativo: Frontal, trasera y lateral:**
Superficie con un patrón definido y una iluminación adecuada (lux > 15)
Superior: Detecta superficies reflectantes difusas (>20%) (paredes, árboles, personas...). Inferior: Superficie con un patrón definido y una iluminación adecuada (lux > 15). Detecta superficies reflectantes difusas (>20%) (paredes, árboles, personas...)

Control remoto

- **Frecuencia de funcionamiento:** 2.400 – 2.483 GHz; 5.725 – 5.850 GHz
- **Distancia máx. de transmisión (sin obstáculos, libre de interferencias):** 2.400 – 2.483 GHz; 5.725 – 5.850 GHz. FCC: 10000 m. CE: 6000 m
- **Rango de temperatura de funcionamiento:** 0 °C – 40 °C
- **Transmisión de potencia (PIRE):** 2.400 – 2.483 GHz: FCC: ≤ 26 dBm; CE: ≤ 20 dBm; 5.725 – 5.850 GHz: FCC: ≤ 26 dBm; CE: ≤ 14 dBm
- **Batería:** 3950 mAh

- **Corriente de funcionamiento:** 1800 mA@3.83 V
- **Tamaño de dispositivos móviles compatibles:** Longitud máx.: 160 mm
Grosor máximo: 6.5 – 8.5 mm
- **Puertos USB compatibles:** Lightning, Micro USB (Type-B), USB (Type-C)

Inicio del vuelo fotogramétrico:

Una vez armado el Dron se colocó en el suelo (Figura N° 70) para hacer la configuración de los parámetros que se realizarán en la aplicación móvil de pix4D Capture para el vuelo fotogramétrico.



Figura N° 70. Colocando la Aero nave no tripulada en el suelo.

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

Para ello se vinculó el control remoto con el teléfono móvil (Figura N° 71) para poder realizar las configuraciones con los parámetros a usar para el vuelo.



Figura N° 71. Vinculación de control remoto con teléfono móvil

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

Dentro de la interfaz de la Aplicación encontramos muchas opciones para el tipo de Aero nave a utilizar, en nuestro caso utilizaremos Mavic 2 Pro (Figura N° 72) es por ello que se selecciona ese dispositivo.

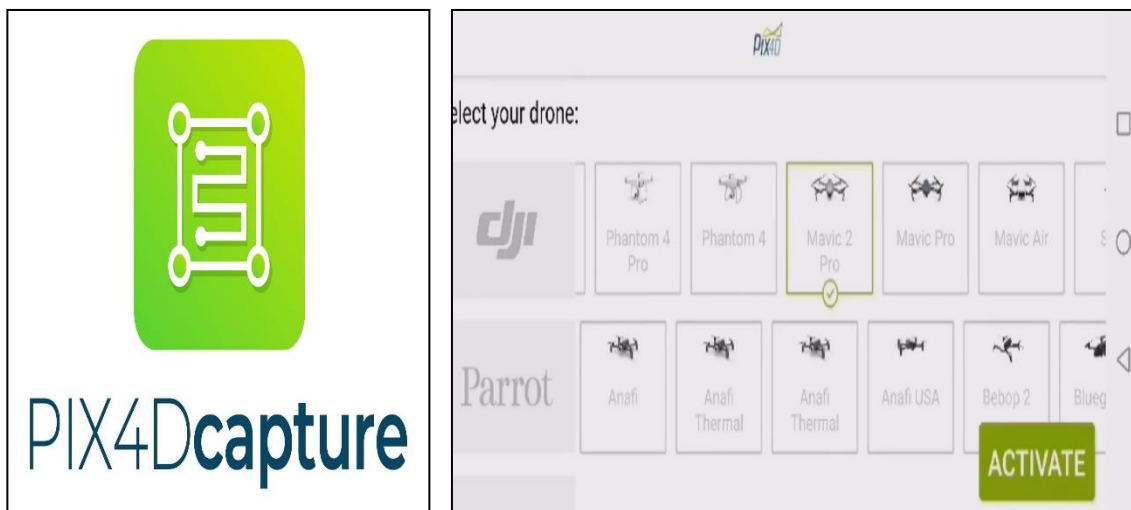


Figura N° 72. Opciones de Aero nave a utilizar

Fuente: Propia

En esta ventana utilizaremos la primera opción de **Polygon Mission** como observamos en la Figura N° 73.



Figura N° 73. Opciones para el Área a sobre volar

Fuente: Propia

En las siguientes opciones de la Figura N° 74, aparecieron al lado izquierdo de la pantalla la Opción de altura de vuelo y en la parte inferior apareció el Área a sobre volar y el tiempo aproximado del vuelo.

En este caso, la altura de vuelo fue de 60 metros, ya que en la zona se hizo notar la presencia de árboles muy grandes; es por ello que se configuró esta altura para evitar la colisión del artefacto con cualquier tipo de árbol.

Para el área a sobrevolar se toma en consideración un tamaño considerable de 167 x 165 m.

Para el tiempo de vuelo, la aplicación hizo un cálculo de aproximadamente 7 minutos con 12 segundos.

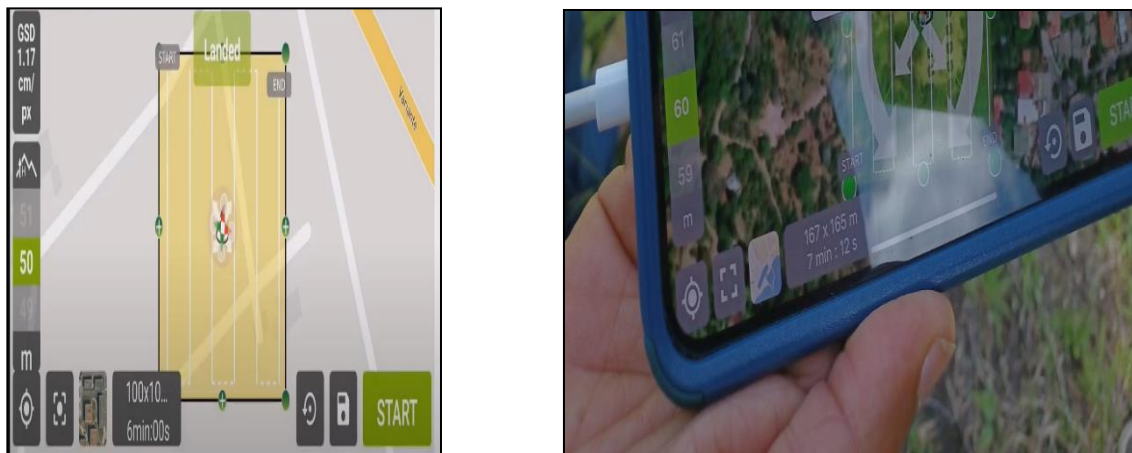


Figura N° 74. Configuración para el vuelo fotogramétrico en pix4D Capture

Fuente: Propia

Con la aplicación configurada y el Dron debidamente armado y preparado se procedió a encenderlo y a iniciar el vuelo (Figura N° 75). Cabe mencionar que para un vuelo óptimo de esta categoría de levantamientos fotogramétricos es necesario que las condiciones atmosféricas en la zona de vuelo sean excelentes; por ejemplo un cielo despejado sin nubes alrededor, ya que esto podría bloquear la captura de la señal de los satélites que pudiesen encontrarse, de igual manera la presencia de árboles demasiado alto en los cuales el dron podría colisionar, así como una fuerte cantidad de ráfagas de viento que podrían desestabilizar el dron durante el vuelo, o también mencionar la presencia de aves en estado de migración o sobrevolando la zona, entre otras incertidumbres.



Figura N° 75. Encendido del Dron



Figura N° 76. Inicio del vuelo
fotogramétrico

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

7.1.4. Recolección de información durante el vuelo



Figura N° 77. Recorrido del Vuelo Fotogramétrico

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

En esta etapa el dron inició su proceso de vuelo según la configuración que se le dio a la aplicación de pix4D Capture, en la que fue tomando las respectivas imágenes (Figura N° 77) del área seleccionada.

7.1.5. Finalización y obtención de la toma de información

Finalización del vuelo fotogramétrico

La cantidad de fotos tomadas fueron un total de 136 imágenes con alta definición en un período de 7 minutos y 12 segundos de vuelo.



Figura N° 78. Descargando imágenes tomadas con el Dron

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

Después del vuelo se hizo la respectiva descarga de las fotos recolectadas, el tiempo del descargado fue de aproximadamente 12 minutos. Estas imágenes serán el insumo para el proceso de datos en los respectivos softwares a utilizar.

RTK en puntos de control

Una vez teniendo la información recolectada del vuelo fotogramétrico se procedió a la toma de datos RTK con el método NTRIP que en campo permite vincular el sistema de referencia geodésico SIRGAS-ES2007 obteniendo coordenadas en tiempo real, para las actividades de post-procesamiento de la información en el levantamiento fotogramétrico en campo nos permitirá amarrar y comparar si las coordenadas están correctamente georreferenciadas.

Para poder realizar una correcta toma de datos debemos recordar los estudios previos durante la materia electiva de GPS y considerar los parámetros adecuados que necesitaremos configurar para equipos de RTK.

Tabla N° 2. Parámetros de Medición en Tiempo Real RTK.

FUENTE: [Scribd.com](https://www.scribd.com)

Parámetros	Valor
Valor de mascara	10° - 15°
Intervalo de medición	1 s
Número de satélites mínimos necesarios	4
Precisión máxima	± (1 cm + cppm)

Distancia recomendada entre Base y Rover	RTK NTRIP	Hasta 50 km de la base
	RTK UHF	Con radio interno la distancia oscila entre 3 y 4 km
Tiempo mínimo de Observación	1 – 5 min	

Equipo a utilizar:

Tersus Oscar Basic: El receptor GNSS RTK Tersus Oscar Basic es una SmartAntenna de alta precisión y gran capacidad de trabajo, gracias a sus dos baterías extraíbles. Liviano, resistente y de fácil operación este receptor permite coleccionar estáticos, y en nuestro caso realizar tomas de puntos PCF en RTK y trabajar con comodidad en el sistema Android y la aplicación Tersus Nuwa.

Los pasos que se siguieron para configurar tu Tersus GNSS y capturar los puntos de control en la Finca Lutecia son:

- **Ensamble del equipo:** Una vez se ha colocado los puntos de apoyo fotogramétricos se dispone a colocar o ensamblar el receptor con el jalón y asegurándose que este tenga la mira topográfica para una correcta nivelación.



Figura N°. 79 Ensamblando el jalón con el colector

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

- **Configuración del receptor:** Para conectar el receptor Tersus Oscar a una Tablet o teléfono mediante Wifi o Bluetooth, primero se debe encender el receptor. Luego, en la configuración del dispositivo móvil, busca las redes Wifi o los dispositivos Bluetooth disponibles ya sea en lista o solo el que este relativamente cerca. En la configuración de la aplicación Nuwa aparecerá el nombre o serie a colector Tersus Oscar. Se selecciona para establecer la conexión.
- **Configuración de la aplicación Nuwa:** Una vez se haya conectado con el receptor Tersus Oscar a la aplicación Nuwa, se procederá a ajustar los parámetros de configuración. Para ello, se dirige al menú de "Configuración" o "Ajustes" dentro de la app. Allí se encontrará opciones como "Sistema de coordenadas", "Elipsoide" y "Datum"

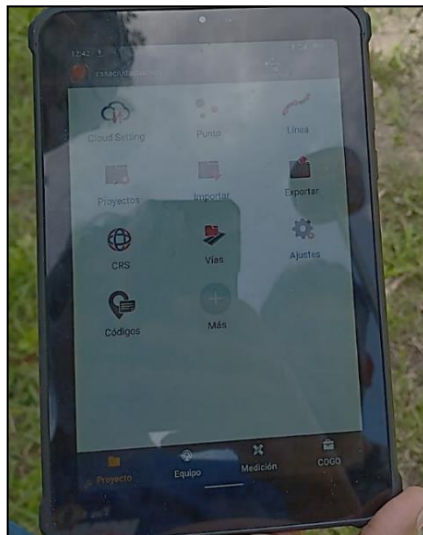


Figura N° 80. Configuración de la aplicación Nuwa

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

- **Creación del proyecto:** Se creará un nuevo proyecto en Nuwa con el nombre de "PCF". Primero se abrirá en la aplicación la opción de "Nuevo proyecto". Generalmente, esta opción se encuentra en el menú principal o en la pantalla de inicio. Al seleccionar "Nuevo proyecto", la aplicación pedirá que se ingrese un nombre para el proyecto. En este caso, será llamado "PCF" de los puntos de control fotogramétricos colocados en el levantamiento de la Finca Lutecia. También se puede agregar una descripción si así se desea. Una vez que se haya ingresado el nombre y la descripción, la aplicación Nuwa creará el proyecto y te llevará a la pantalla principal del mismo.
- **Captura de puntos:** Para la captura de puntos, primero se debe posicionar la mira topográfica y/o el jalón topográfico una vez se haya

ensamblado correctamente con el colector Tersus en el punto exacto donde se desea medir este sobre los puntos de apoyo fotogramétricos o dianas fotogramétricas. Asegurarse de que la mira esté nivelada y estable. Luego, en la aplicación Nuwa, se pulsa el botón de captura, que generalmente tiene un ícono de punto o un signo "+". La aplicación registrará las coordenadas del punto y te permitirá guardarlo con un nombre y descripción.



Figura N° 81. Toma de puntos de control PCF

Fuente: Propia (Finca Lutecia)

La cantidad de puntos de control fotogramétricos tomados fue de cuatro perfectamente distribuidos por el área considerada. Como ya se había mencionado, estos puntos de control, junto con el sistema de referencia geodésico utilizado, nos permitirán una buena georreferenciación de la zona levantada.

7.2. Proceso de datos

Una vez obtenidos los insumos recolectados en campo, se procedió a utilizar los softwares para iniciar con el procesamiento de estos datos fotogramétricos. Para ello se auxilió del software Pix4D Mapper.

7.2.1. PIX4D MAPPER

PIX4Dmapper es un software de fotogrametría de escritorio que convierte imágenes aéreas y terrestres en mapas y modelos digitales 3D para diversas aplicaciones. Utiliza triangulación aérea automática para procesar miles de puntos clave en las imágenes y crear resultados con precisión topográfica, como orto mosaicos y modelos digitales de superficie (MDS). Permite un flujo de trabajo completo, desde la captura y el procesamiento hasta la edición, el control del proyecto y la exportación de datos a formatos compatibles con GIS y CAD.

7.2.2. Creación de un nuevo proyecto

El primer paso es abrir el Software Pix4D Mapper en la computadora:

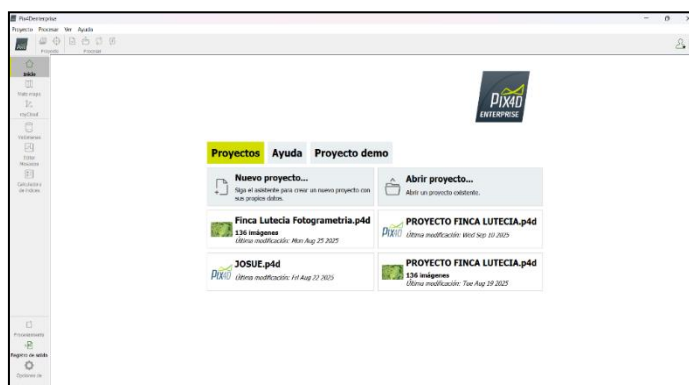


Figura N° 82. Interfaz de Pix4 Mapper

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

En la pestaña **PROYECTO**, se creará un nuevo proyecto que tomará el nombre: Proyecto Finca Lutecia.

En el cuadro que se abre, se coloca el nombre del Proyecto y la Ruta donde se guardara el proyecto, en este caso se creó una carpeta en el disco local C con el mismo nombre y se dará clic en **Siguiente**.

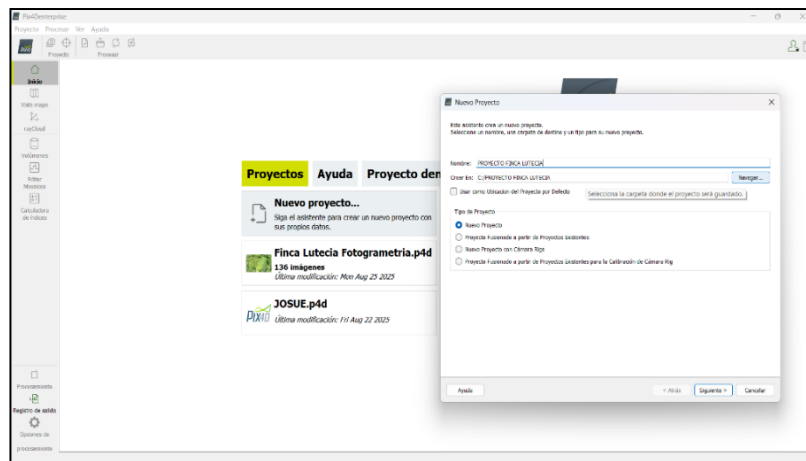


Figura N° 83. Nuevo Proyecto

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.3. Importación de la información obtenida en campo

Luego se abre el cuadro siguiente (Figura N° 84), y se añade imágenes, por lo cual se hará clic en esa pestaña y se abrirá la ruta donde se encuentra la carpeta (Figura N° 79) de las imágenes recolectadas en campo.

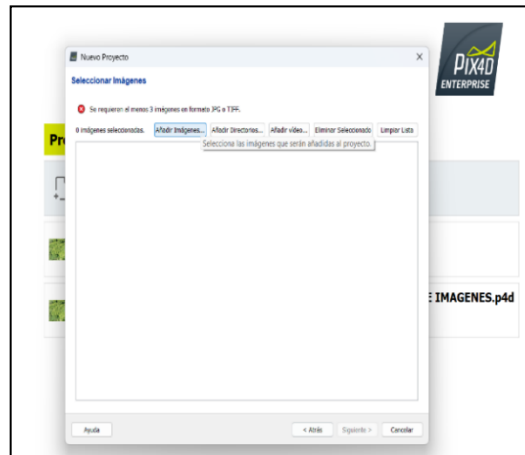


Figura N° 84. Selección de fotografías.

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

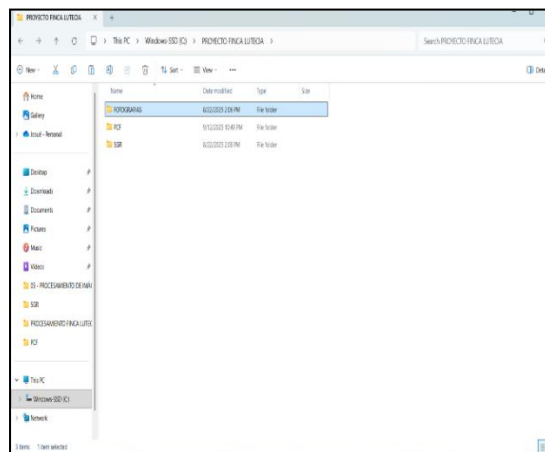


Figura N° 85. Carpeta de fotografías

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Se selecciona la carpeta **FOTOGRAFIAS** (Figura N° 85) y se dará Abrir, luego se selecciona todas las fotografías (Figura N° 86) obtenidas que como se sabe previamente fueron 136 imágenes recolectadas.

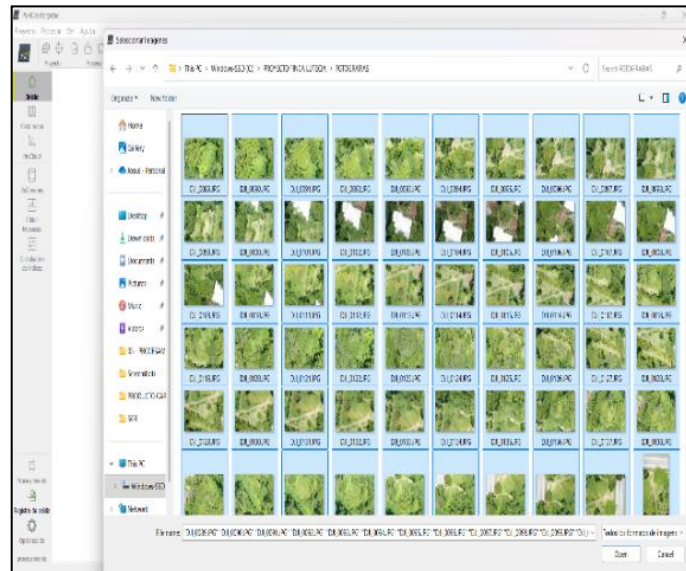


Figura N° 86. Colocación de fotografías

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

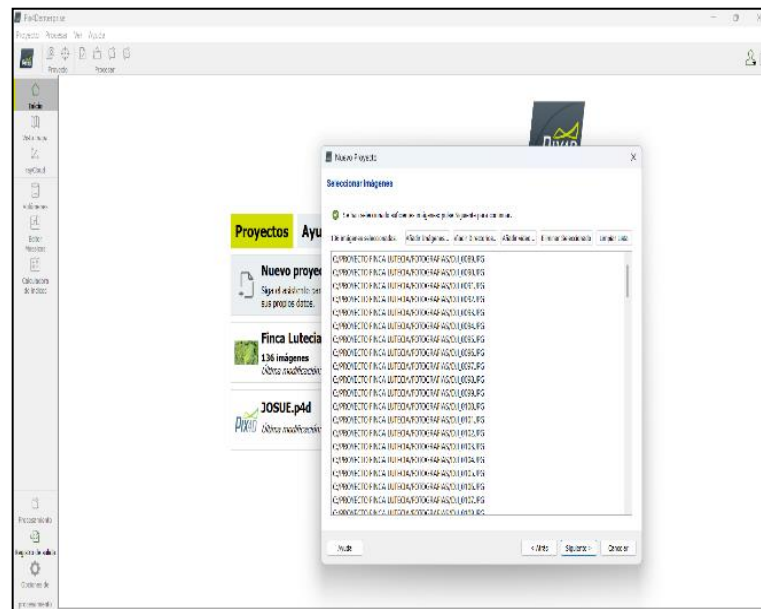


Figura N° 87. Imágenes colocadas

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.4. Definir el sistema geodésico

Se abre este cuadro siguiente (Figura N° 88) con el sistema de coordenadas por default, y en ella se pondrá el sistema de coordenadas con el que se trabajara en el proyecto el cual es el Sistema SIRGAS-ES2007. Luego se dará clic en **siguiente** y se abrirá el cuadro de adentro en la cual seleccionaremos **Editar**.

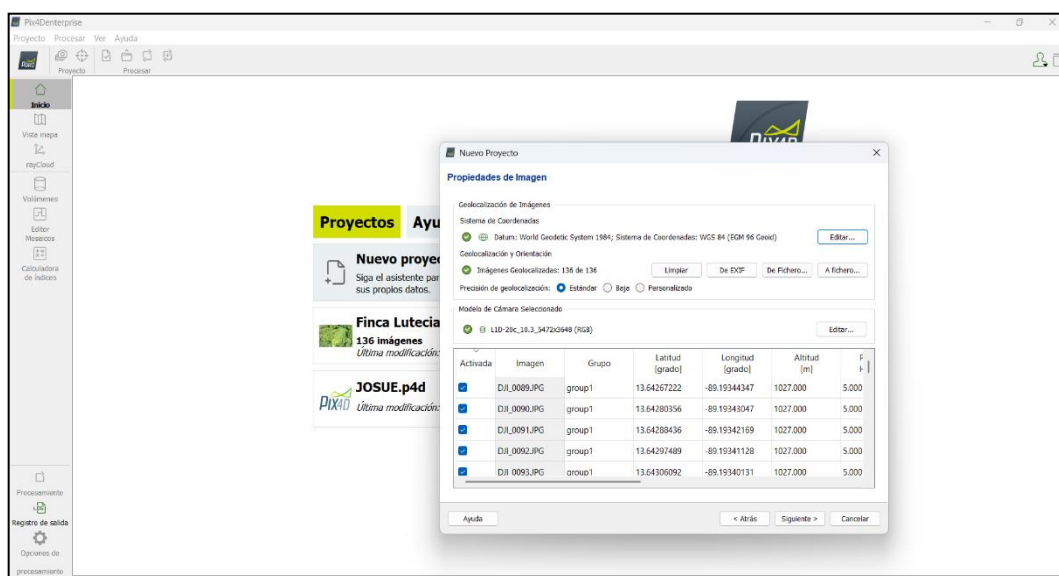


Figura N° 88. Insertar el sistema de coordenadas geodésico

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Se observa el cuadro situado en la parte izquierda de la Figura N° 89 para establecer el sistema de coordenadas desde un archivo PRJ. Luego se abrirá la Ruta donde se tenga el sistema de referencia geodésico en el cuadro de la derecha de la Figura N° 89.

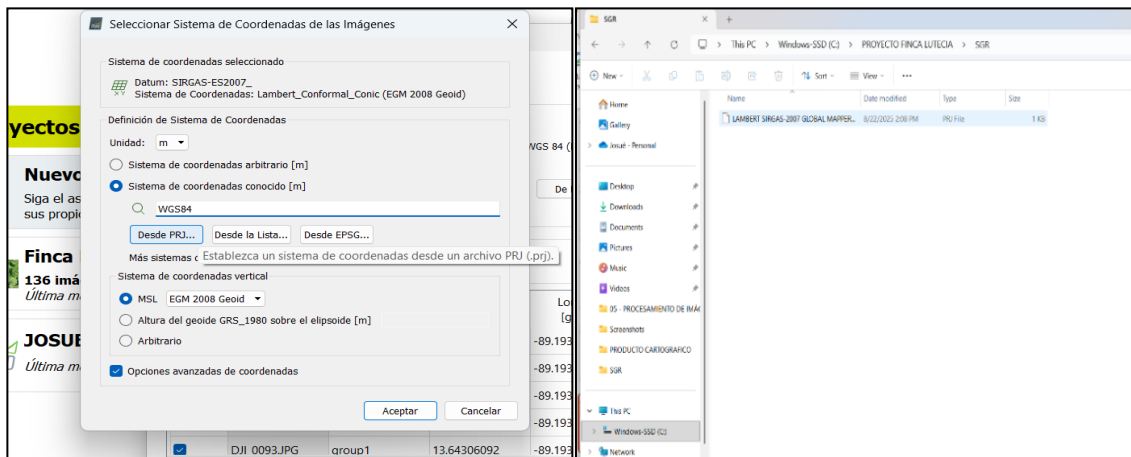


Figura N° 89. Seleccionando el sistema de coordenadas geodésico

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

El sistema de referencia se ubica en el disco local C, en la carpeta **Proyecto Finca Lutecia**. Aquí se puede observar el sistema geodésico seleccionado, el sistema de coordenadas vertical en este caso es el EGM 2008 Geoid.

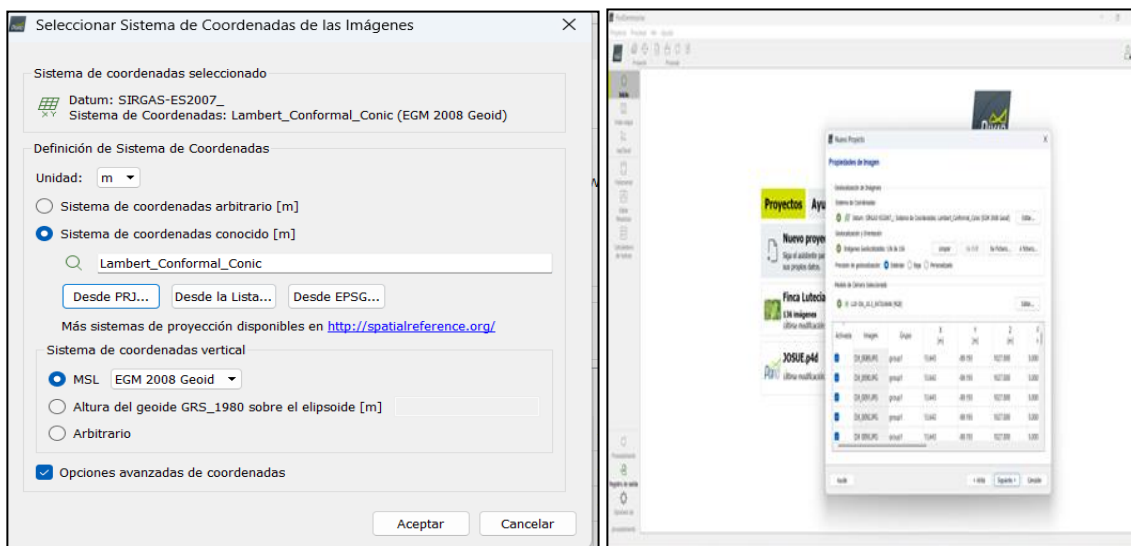


Figura N° 90. Proyección Cartográfica, Sistema de coordenadas conocido

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Como se puede observar en la siguiente Figura N° 91, ya aparece el sistema SIRGAS-ES2007, luego se dará clic en **Aceptar** y **Siguiente**.

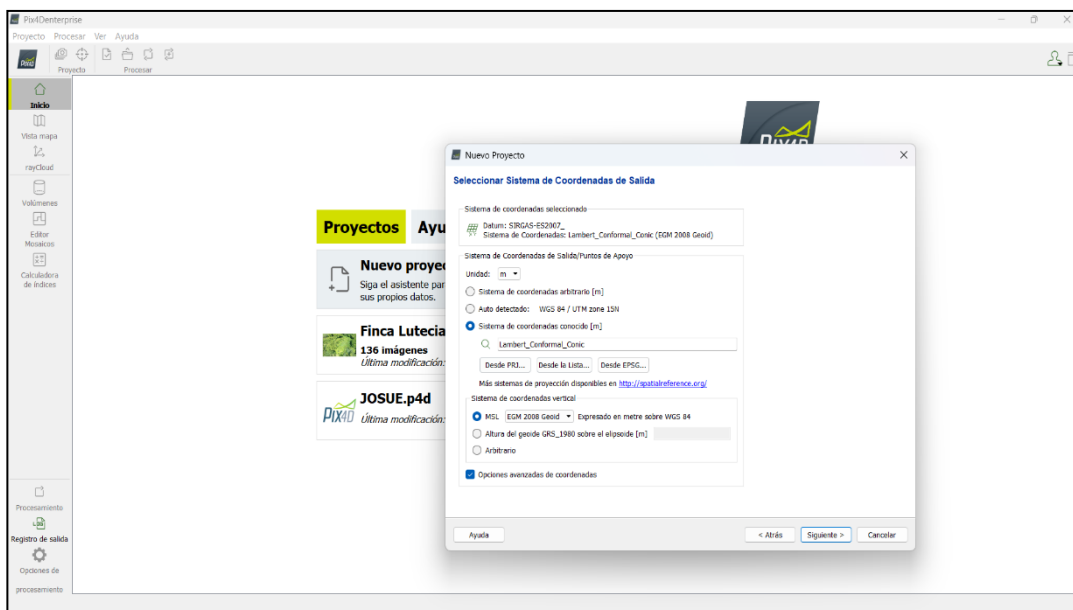


Figura N° 91. SRG Colocado

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Con lo anteriormente realizado, ya se tendrá configurado el proyecto y el sistema geodésico con el que se trabajará.

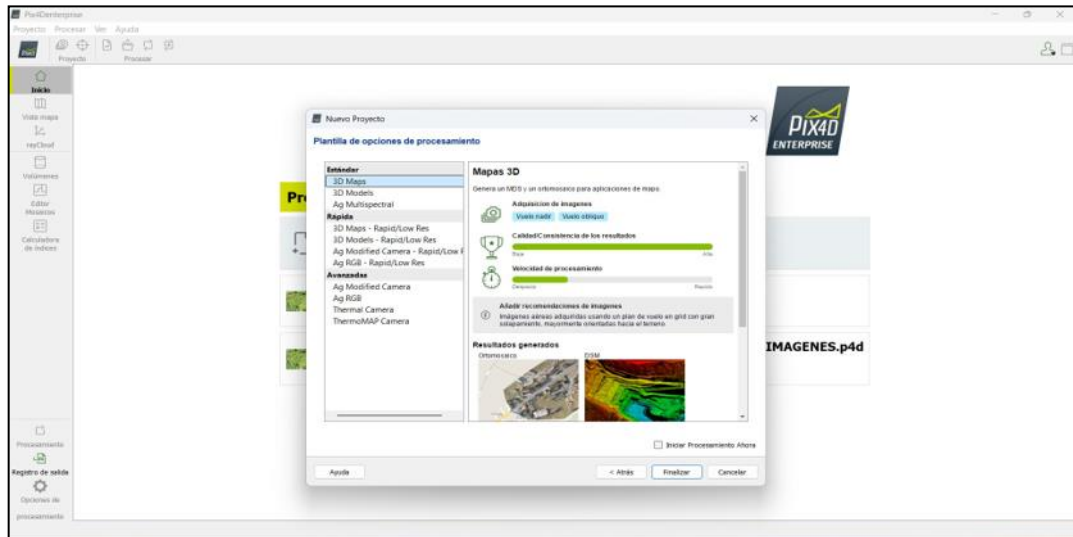


Figura N° 92. Configuraciones previas realizadas

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Para terminar con estas configuraciones anteriormente realizadas, solo se dará clic en la pestaña **Estándar** y seleccionar la primera opción de **3D MAPS**, y luego dar clic en **finalizar**.

De esta manera aparecerán las fotografías procesadas y el sistema geodésico SIRGAS en la parte inferior derecha de la Figura N° 93, constatando que se está trabajando con el sistema correctamente ubicado en el software.

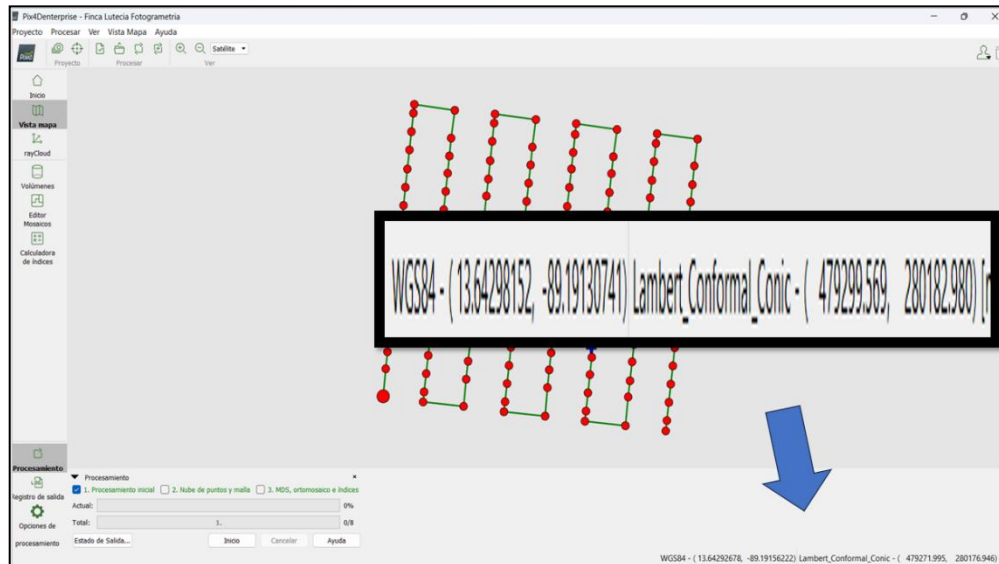


Figura N° 93. Sistema de referencia geodésico sirgas colocado en el software

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.5. Procesamiento del programa

El procesamiento se hará en 3 pasos que detallaremos a continuación:

Paso N°1 Procesamiento Inicial

Para el inicio del procesamiento inicial dar clic en Opciones de procesamiento y seleccionar la primera opción llamada procesamiento inicial y una vez hecho esto dar clic en Aceptar y en la parte izquierda inferior de la pantalla seleccionar Procesamiento y escoger la primera opción llamada **Procesamiento inicial**. Luego de esto dar clic en “**inicio**” para dar comienzo al desarrollo de los datos. Cabe mencionar que el tiempo para este proceso está vinculado a la capacidad de la maquina utilizada.

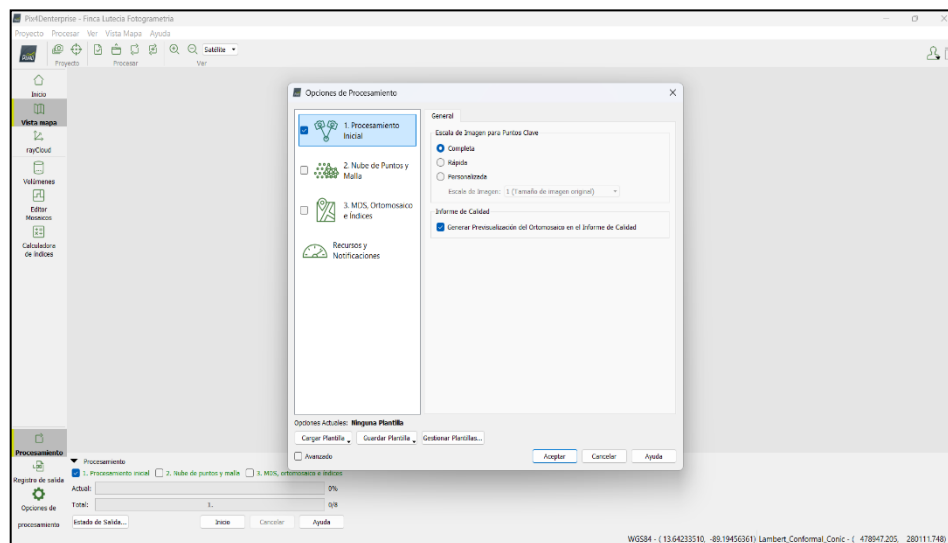


Figura N° 94. Configuraciones iniciales

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

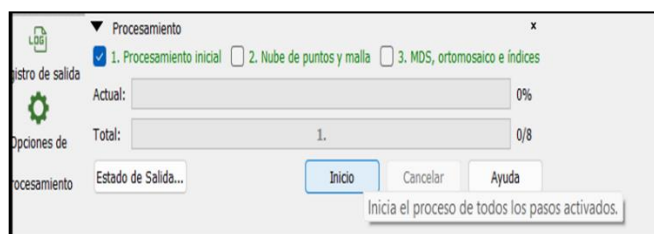


Figura N° 95. Inicio del Procesamiento del paso #1

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al terminar este proceso, el software arrojó el vuelo recorrido por el Dron en la Figura N° 96. Todos los puntos rojos representan cada una de las fotografías tomadas por el dispositivo.

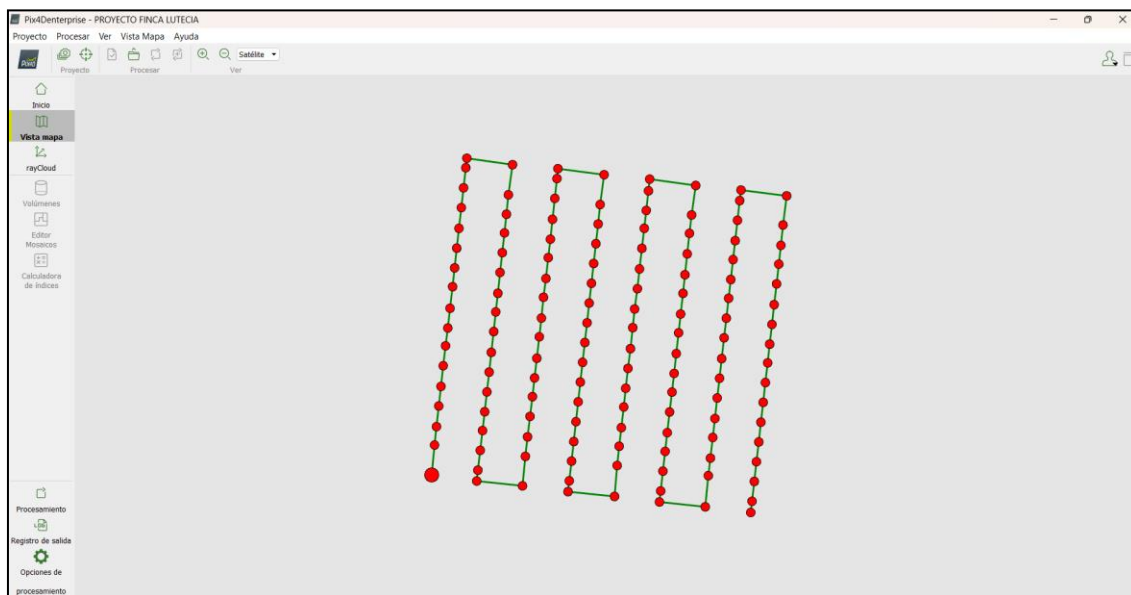


Figura N° 96. Procesamiento inicial finalizado

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

De igual manera el software arrojó un reporte de calidad como, por ejemplo:

- **Imágenes:** mediana de 74448 puntos clave por imagen.
- **Conjunto de datos:** 129 de 136 imágenes calibradas (94%), todas las imágenes habilitadas.
- **Optimización de la cámara:** 1.8% de diferencia relativa entre los parámetros internos iniciales y optimizados de la cámara.
- **Coincidencia:** mediana de 7943.84 coincidencias por imagen calibrada.
- **Georreferenciación:** sí, 4gcp (4.3d), error medio rms=0.016m.



Figura N° 97. Reporte de calidad del Procesamiento inicial

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

En la siguiente Figura N° 98, se puede apreciar la nube de puntos dispersa que se logró obtener a través del primer paso procesado.

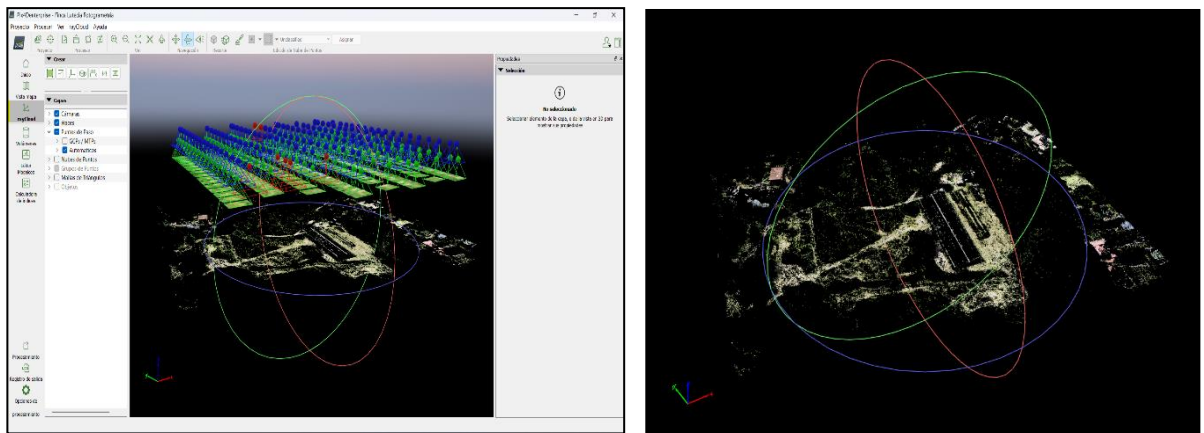


Figura N° 98. Nube de puntos dispersa

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.6. Creación de puntos de paso

Puntos de paso:

Los Puntos de Control Fotogramétricos Foto identificables son puntos que sirven para vincular las imágenes aéreas con la realidad terrestre, georreferenciarlas y aumentar la precisión del modelo fotogramétrico.

Si se hace clic en un punto cualquiera en la nube de puntos dispersa obtenida en el paso anterior, se abrirán las imágenes en donde está presente ese punto en común seleccionado.

Lo que se debe tomar en cuenta es asegurar los puntos que consideraremos como puntos de paso, ya que estos deben ser foto identificables como la palabra lo indica, se puede considerar como punto de paso, por ejemplo: la esquina de una acera presente en la zona de estudio, cajas tragantes, alcantarillas, y objetos físicos lo más cercanos al suelo.

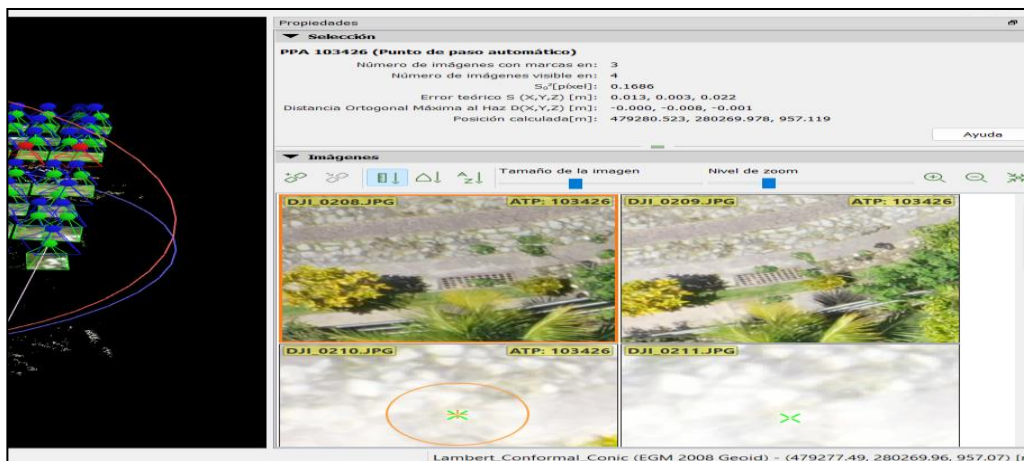


Figura N° 99. Colocación de puntos de paso

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software



Figura N° 100. Verificando colocación de puntos de paso

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Para iniciar con el proceso, en este caso para el primer punto de paso a elegir será la esquina de una caja tragante como vemos en las Figuras 102 y 103, al observar ese punto se debe localizar también en una segunda fotografía, al tener el punto observado en dos fotografías diferentes, se dará clic en el icono de la cadenita que nos aparece en la parte superior izquierda de la Figura N°100, al cliquearla aparecerá una mira en color negro que servirá para ir seleccionando ese punto de paso; al hacer el clic, en las dos fotografías previstas y posteriormente hacer un clic en el icono de foco de selección que nos aparece al lado superior derecho de la Figura N°100, esto con el objetivo de encerrar en un círculo amarillo ese punto en común en todas las fotografías en las que aparece ese punto. De esa manera lo único que debemos hacer es ir cliqueando lo más cercano al centro de los círculos amarillos, al hacer este paso lo que resta es hacer clic en el cuadro de Aplicar. De esta manera aparecerá ese punto de paso en color verde en la nube de puntos dispersa, así como vemos en la siguiente Figura N°101.

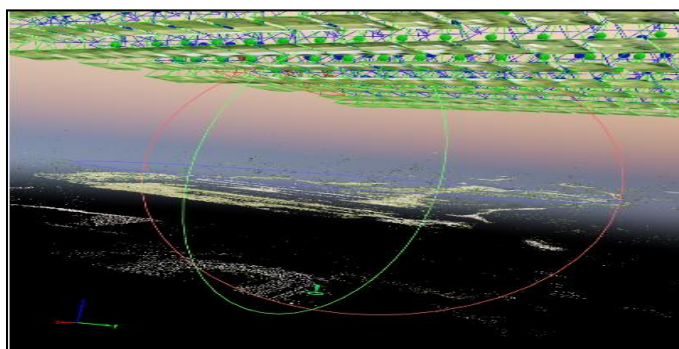


Figura N°101. Primer punto de paso colocado

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

El proceso anteriormente descrito se hará de la misma manera en todos los puntos que se considerarán como puntos de paso, la idea es colocar puntos de paso en distintas partes de la nube de puntos, en este caso se colocarán tres puntos de paso por cada punto cardinal, por ejemplo 3 al norte de la nube de puntos, 3 al sur, 3 al este y 3 al oeste, y al final se colocará un punto más al centro de la zona del levantamiento para un mejor alineamiento. En total se colocó 13 puntos de paso fotogramétricos foto identificables.

Al concluir con todos estos pasos, seleccionaremos la pestaña de **Procesar** y nos iremos a la opción de **Re emparejar y optimizar** para terminar con el proceso.

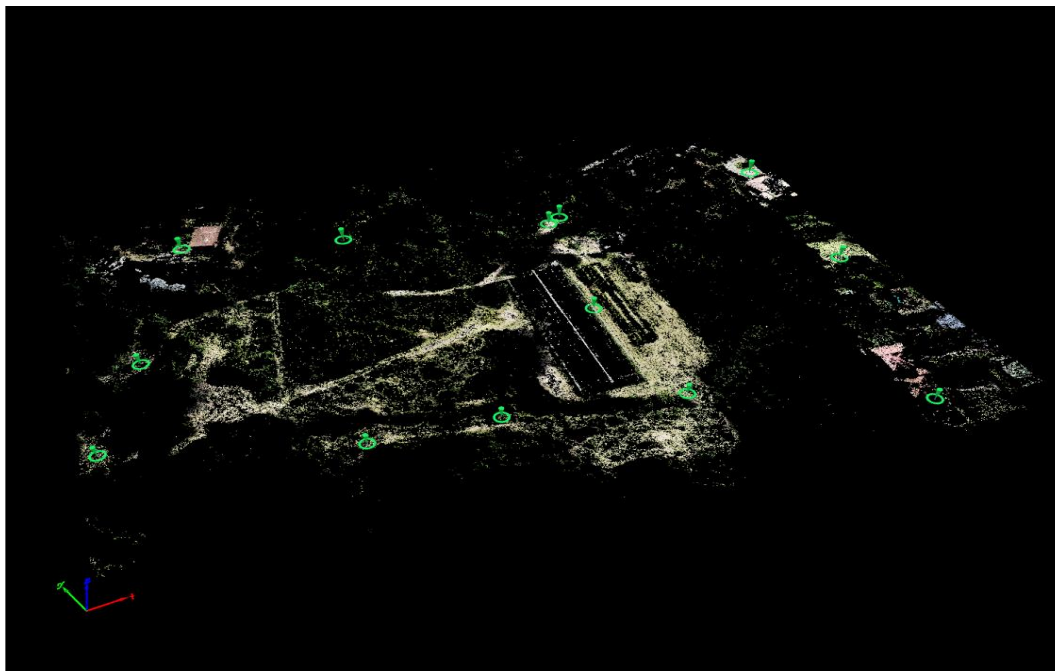


Figura N° 102. Puntos de paso colocados en la nube de puntos dispersa

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.7. Georreferenciar con los puntos de control

Puntos De Control:

Se debe recordar que los puntos de control, son puntos Foto identificables a la cual nosotros definimos su ubicación a la cual queremos que se encuentren, además estos puntos tienen coordenadas geodésicas reales que fueron tomadas en campo con la ayuda de equipos GNSS y que están enlazados a la red geodésica nacional.

Para ubicar en la nube de puntos dispersa, los puntos de control obtenidos con la técnica de RTK, primero se debe ir a la pestaña de **Proyecto** en la Figura N°103, y se abrirán las siguientes opciones en la que se elegirá **Gestor GCP/MTP...**

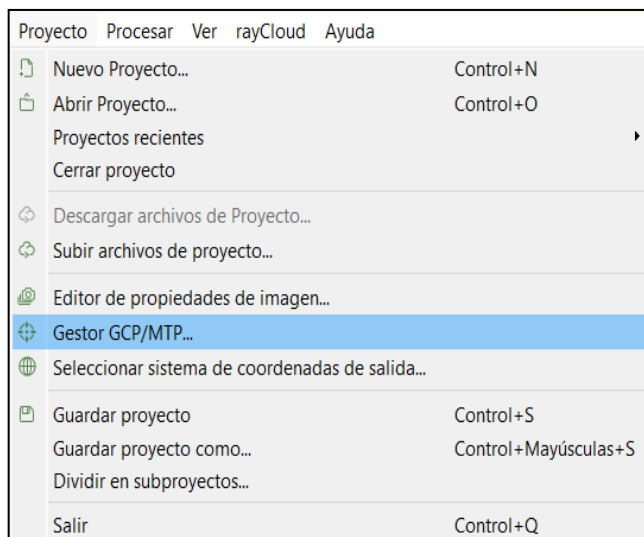


Figura N° 103. Opciones de Proyecto

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Esta opción abrirá la siguiente ventana de la Figura N° 104 en la que se dará clic en la pestaña **Importar puntos de apoyo**.

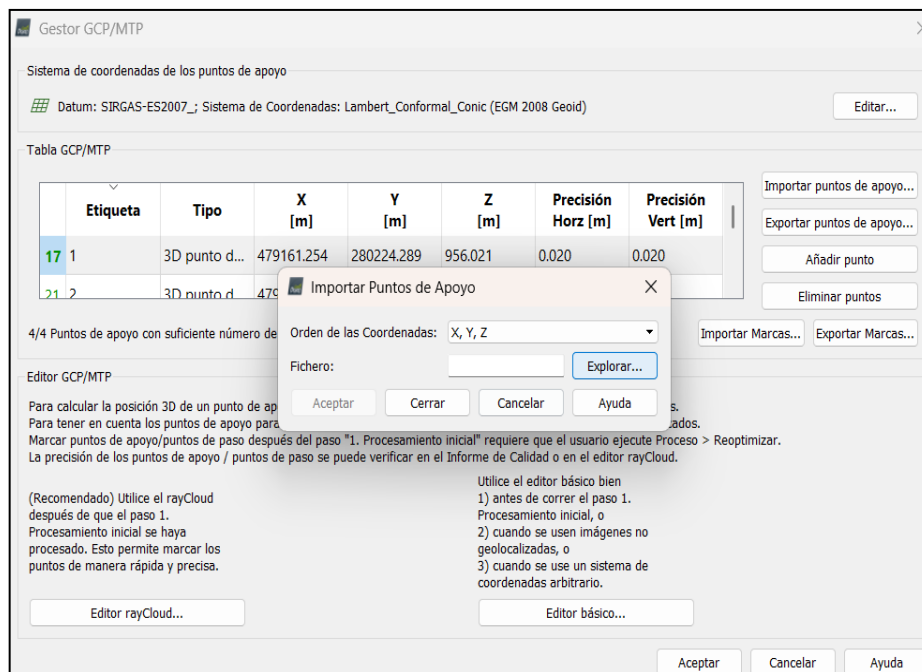


Figura N° 104. Importando puntos de apoyo

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

En la ventanita que se abre en la Figura N° 104 se colocará el orden de las coordenadas que para este proyecto será X Y Z. Luego al dar en la pestaña **Explorar** se abrirá la Ruta donde se encuentra el archivo PRJ que contiene las coordenadas de los puntos de control obtenidos en campo en la Figura N°105. La carpeta que contiene este archivo se encuentra en el disco local C, en la carpeta llamada Proyecto Finca Lutecia con el nombre de PCF.

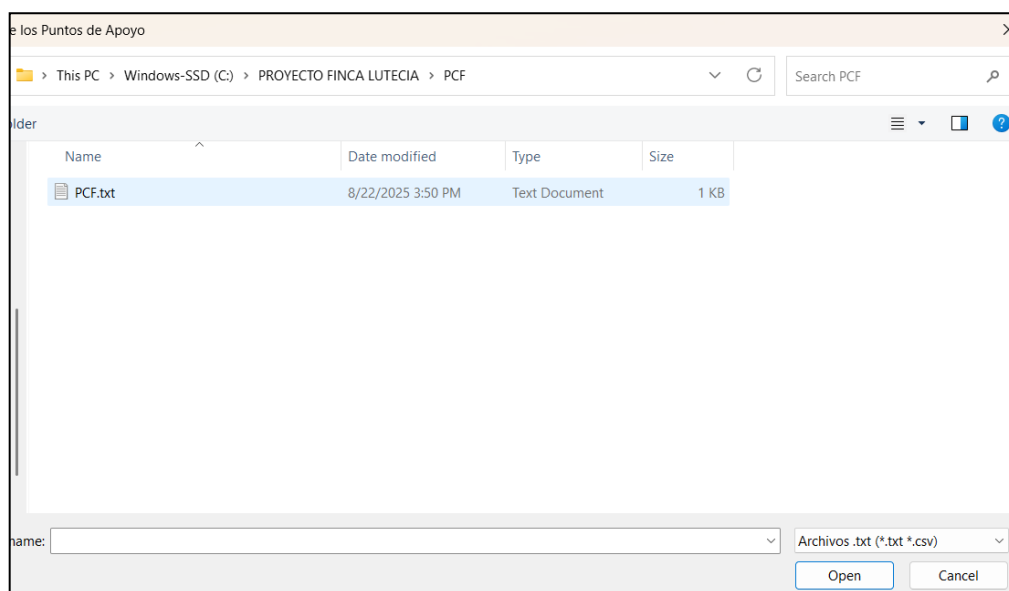


Figura N° 105. Carpeta con los puntos de paso obtenidos en campo

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Se dará clic en **Open** y luego en **Aceptar**, y se abrirá esta ventanita que pregunta si se desea georreferenciar el proyecto y damos clic en **Sí**.

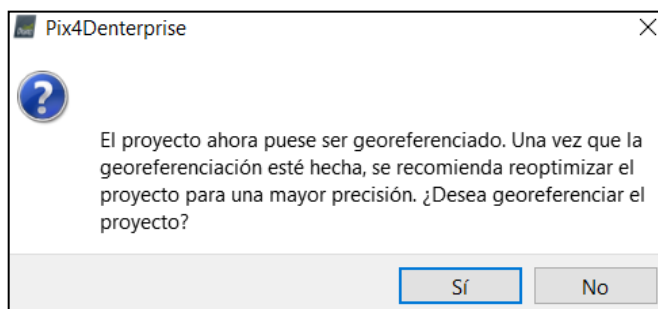


Figura N° 106. Georreferenciar el proyecto

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Con este procedimiento anterior realizado y con el procedimiento de colocación de puntos fotogramétricos foto identificables, aparecerán los puntos de control en la nube de puntos dispersa, como se puede observar en la Figura N°107.

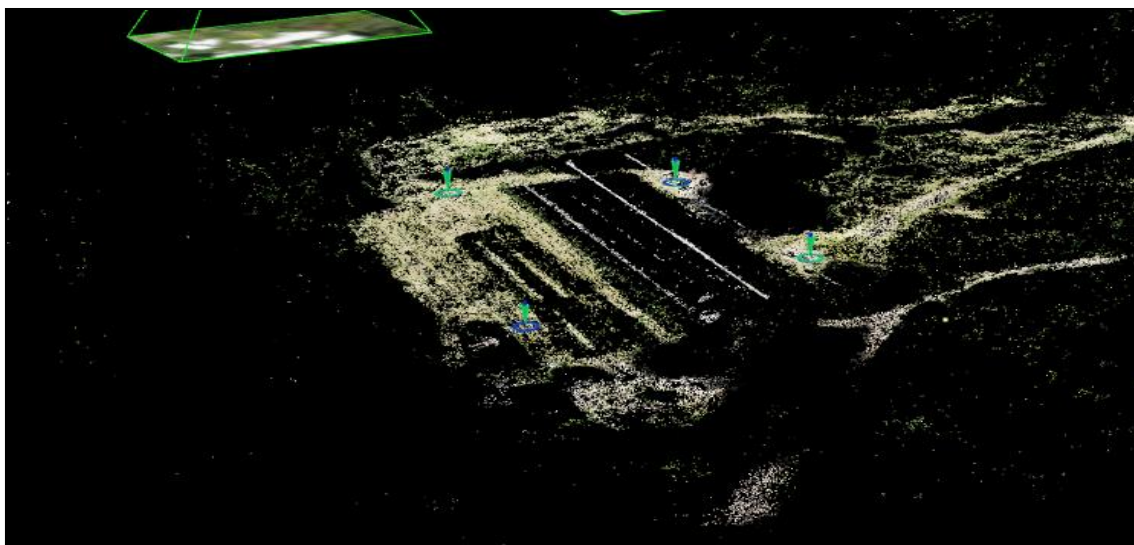


Figura N° 107. Puntos de control colocados en la nube dispersa

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.8. Obtención de la nube de puntos

Paso N°2 Procesamiento de la nube de puntos y malla

En el siguiente paso ir a **Opciones de procesamiento** y aquí seleccionar la segunda opción **Nube de puntos y malla** que se encuentra al lado izquierdo de la ventana en la Figura N°108, se colocarán los parámetros que se indican en la ventana de la Figura N°108 al lado derecho y se exportarán en archivo LAS.

Luego en la pestaña de Malla 3D con textura (Figura N°109), se colocará también los parámetros que se indican.

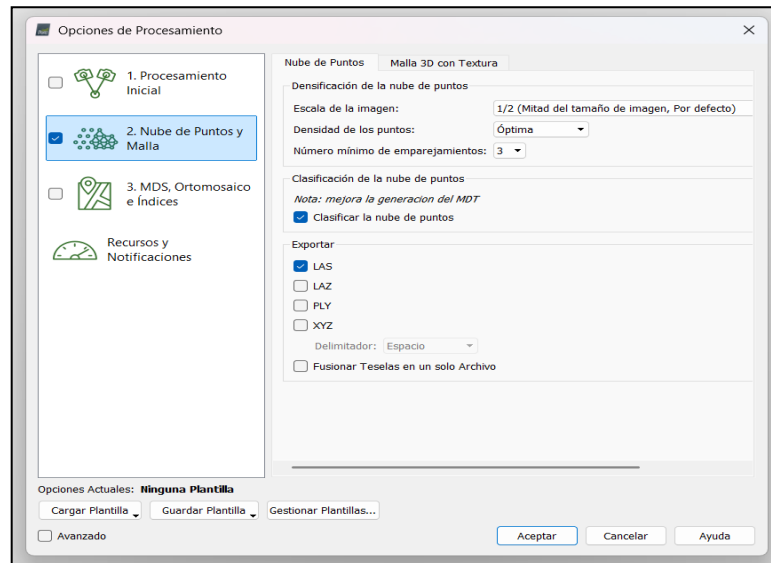


Figura N° 108. Configuración para nube de puntos

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

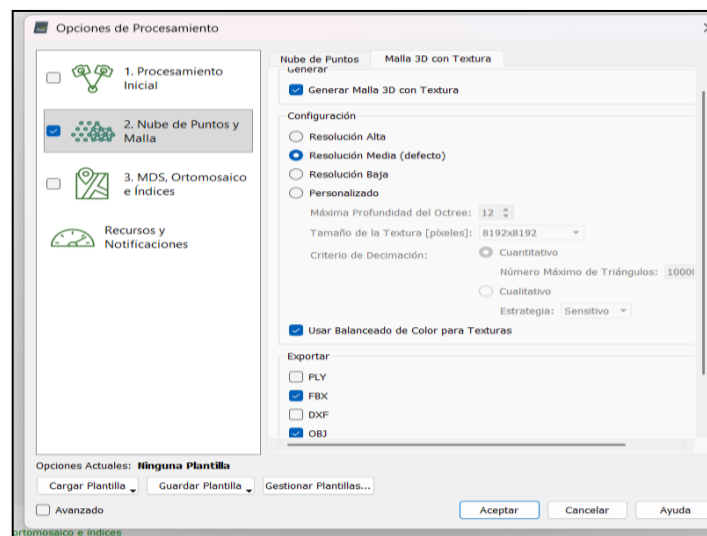


Figura N° 109. Configuración de Malla 3D con textura

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Con estos criterios seleccionados, dar clic en **Aceptar** y en la pestaña de Procesamiento, seleccionar la opción numero 2 (**Nube de puntos y malla**) y luego dar clic en **Inicio**.

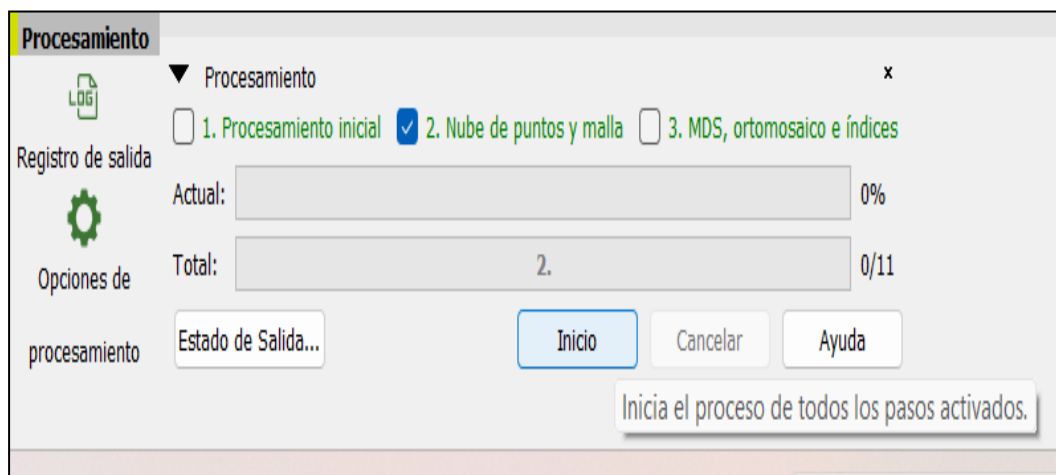


Figura N° 110. Inicio del procesamiento del Paso N°2

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al igual que el procesamiento de los datos del paso N°1, el tiempo del proceso de este segundo paso está ligado a la capacidad de la computadora, en este caso duró aproximadamente 60 minutos.

En la siguiente Figura N° 111, se puede observar la nube de puntos densa obtenida del paso anterior junto con los puntos de paso fotogramétricos foto identificables y los puntos de control fotogramétricos añadidos.

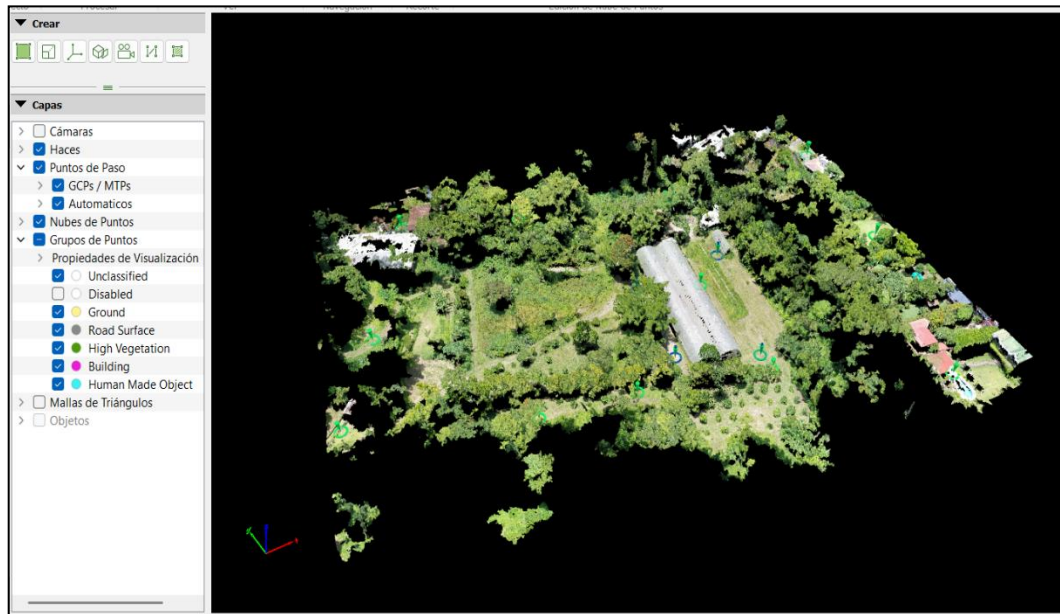


Figura N° 111. Nube de puntos densa

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.9. Orto mosaico

Paso N°3 Procesamiento del modelo digital de superficie, ortomosaicos e índices

Para el tercer y último paso hacer clic nuevamente a **Opciones de procesamiento** en la Figura N° 112 y seleccionar la pestaña de **MDS, Orto mosaico e índices** y en las opciones MDS y Orto mosaico seleccionar las siguientes configuraciones:

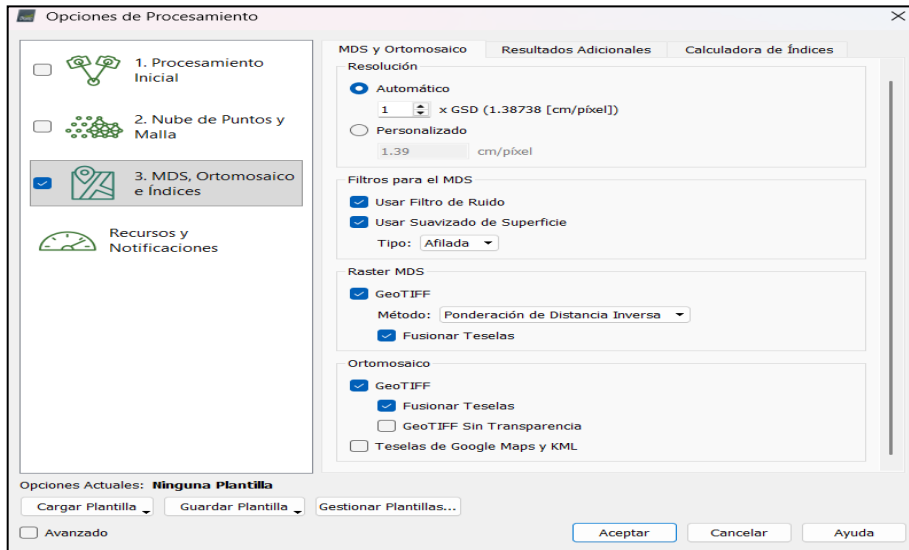


Figura N° 112. Opciones de procesamiento

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Igualmente, en las Opciones de **Resultados Adicionales** seleccionar las configuraciones siguientes:

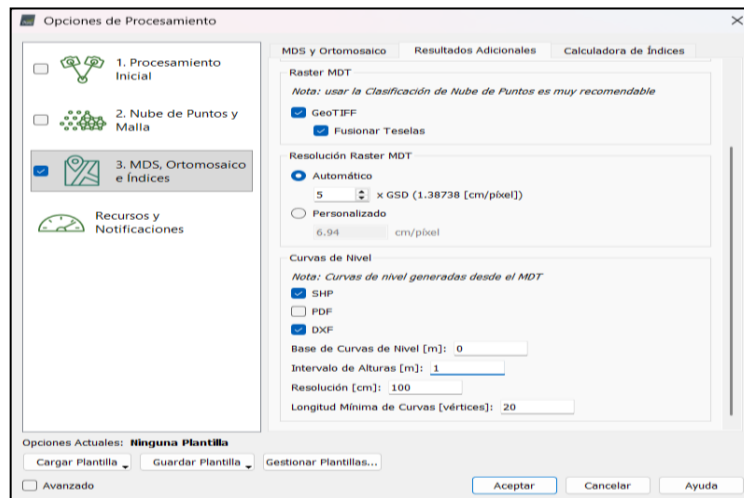


Figura N° 113. Opciones de procesamiento

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al tener todos estos parámetros seleccionados, dar clic en **Aceptar**.

Una vez hecho este procedimiento antes configurado se procede a iniciar el proceso. Solo se activa la opción 3. **MDS, orto mosaico e índices** y damos clic en **Inicio**.

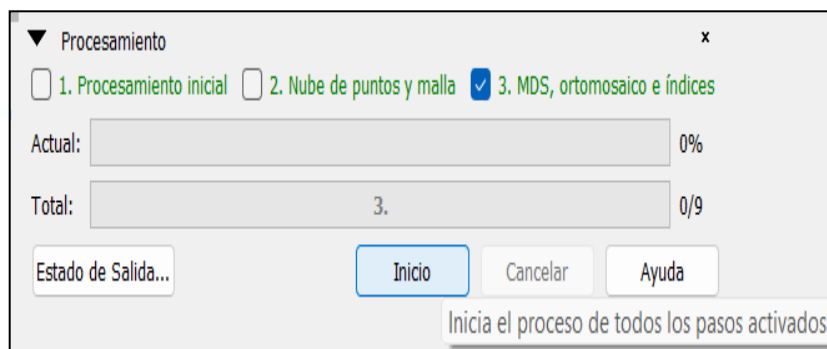


Figura N° 114. Inicio del paso N°3

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al final de todo lo antes realizado y haber terminado con los 3 pasos para el procesamiento de los datos, el software arrojará los siguientes modelos esperados:

Ortomosaico

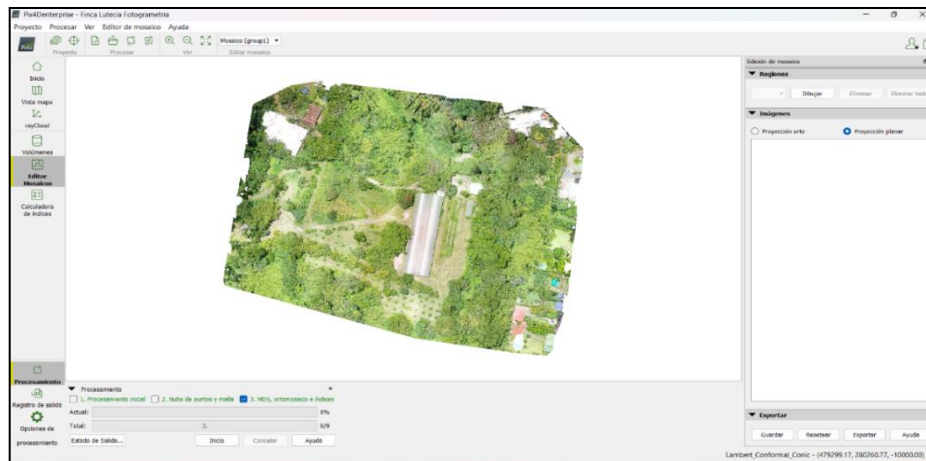


Figura N° 115. Orto mosaico

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.10. Modelo Digital de Superficie (MDS)

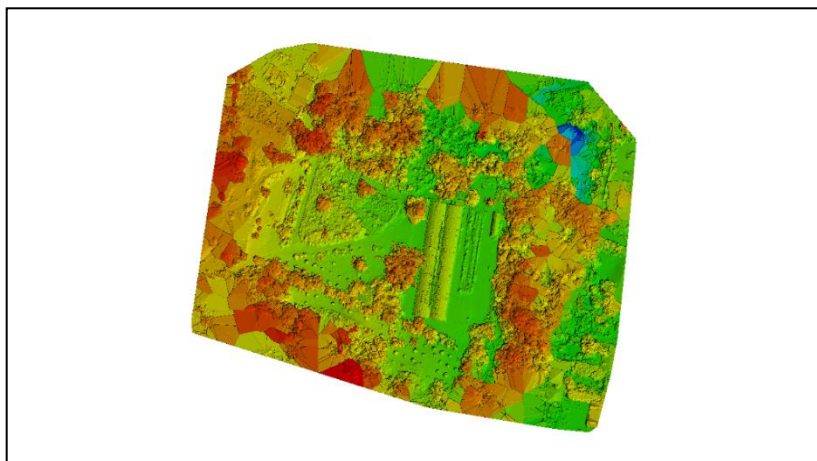


Figura N° 116. Modelo digital de superficie.

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.11. Modelo Digital de Elevación (MDT)

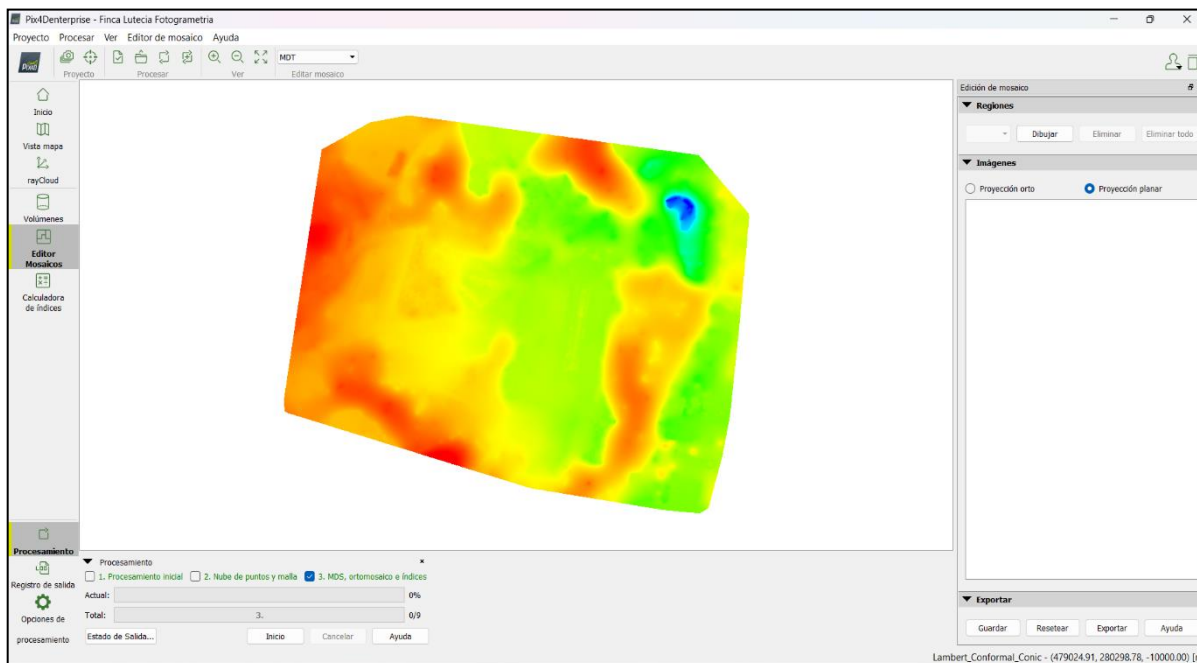


Figura N° 117. Modelo digital de terreno

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

7.2.12. Clasificación de puntos y curvas de nivel en Global Mapper 26.0

Transportando nube de puntos de pix4d mapper a Global Mapper para la clasificación de puntos y las curvas de nivel.

La nube de puntos densa que se obtuvo de la aplicación pix4D Mapper es la que se utilizará para la clasificación de los puntos en Global Mapper. El primer paso será abrir la nube en el software Global Mapper 26.0.

En la interfaz de Global Mapper 26.0 se seleccionará la primera Opción llamada: **Open data files** como vemos en la Figura N° 118, esto conducirá a la ruta donde

se encuentra la nube de puntos densa, almacenada en el disco local C, en la carpeta Proyecto Finca Lutecia. Se selecciona y se dará clic en **Open**.

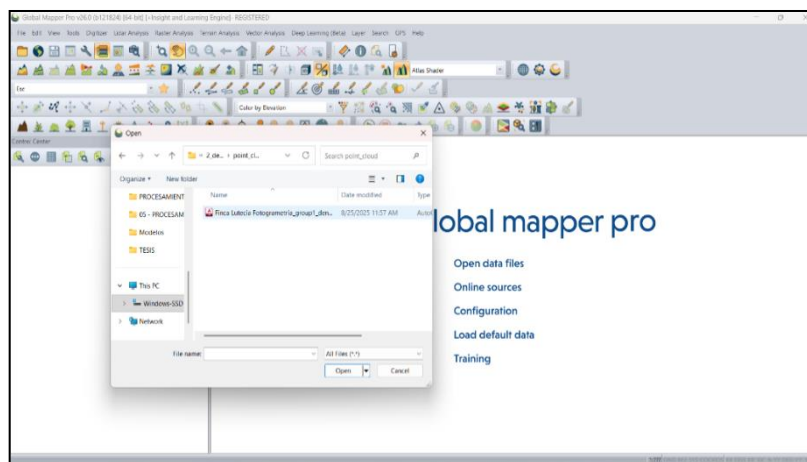


Figura N° 118. Global Mapper 26.0

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Y se obtendrá la nube de puntos densa tal como se observa en la pantalla de la Figura N° 119.

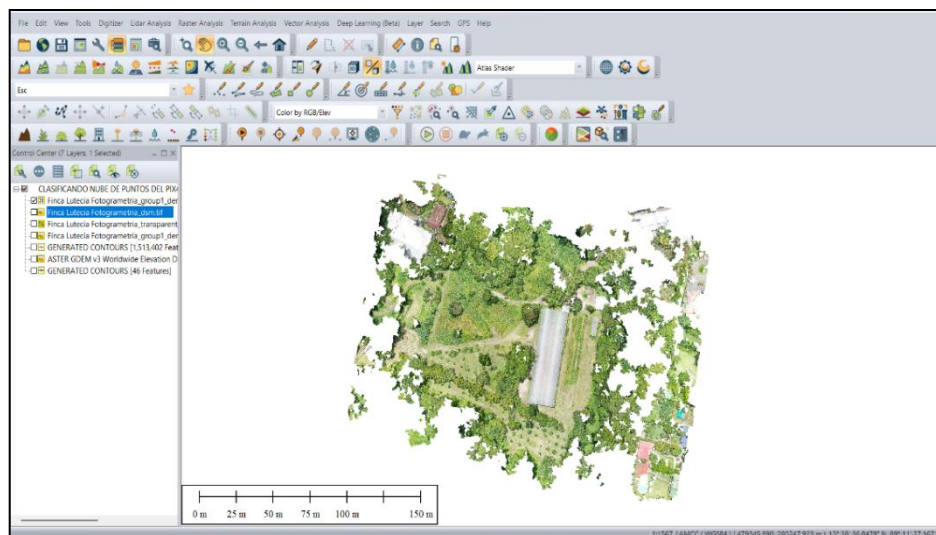


Figura N° 119. Nube de puntos Densa

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Sabiendo que esta nube de puntos no tiene una clasificación previa o tiene una mala clasificación, se dará a la tarea de realizar una clasificación de todos los puntos procesados por el software pix4D Mapper; esta clasificación se hará en dos partes, clasificación automática y clasificación manual.

Clasificación automática

Para hacer la clasificación automática, dar clic en la pestaña seleccionada y colocar **Color by Elevation** como vemos en la Figura N° 120.

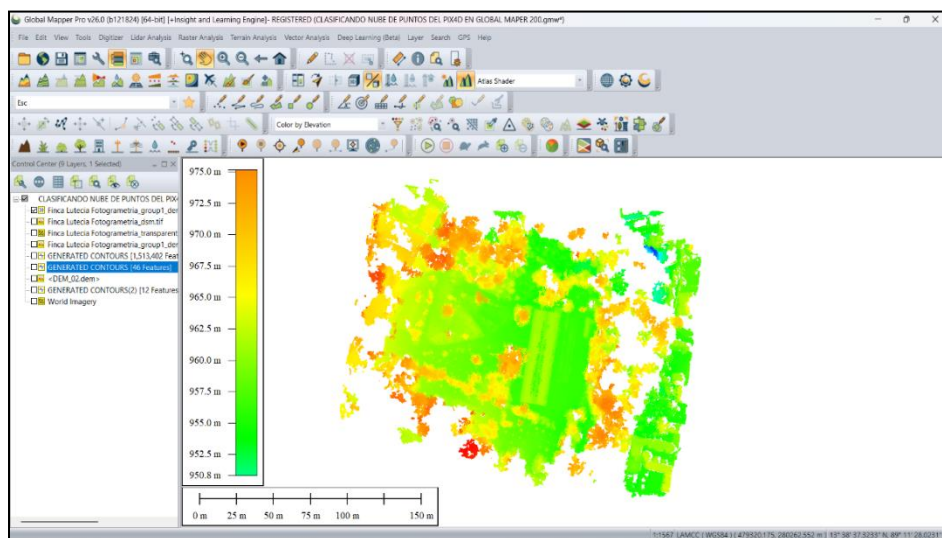


Figura N° 120. Nube de puntos densa en la opción de color by Elevation

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Luego ir a la barra de menú y seleccionar en la opción de **Lidar Analysis** y hacer clic en **Automatic Classification** como se observa en la Figura N° 121. Esto llevará a configurar los puntos de ruido, es por ello que se dará clic en **Noise points**.

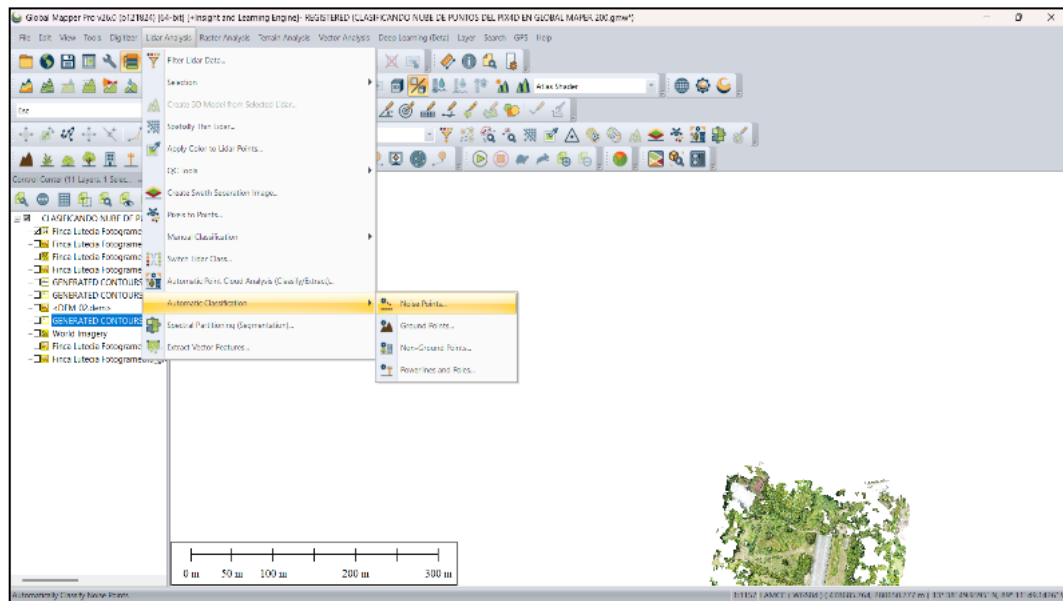


Figura N° 121. Configuración de puntos de ruido

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Luego aparecerán las siguientes ventanas de clasificación de puntos, en las cuales todo se dejará por defecto, considerando que los parámetros están bajo límites aceptables de esta medición:

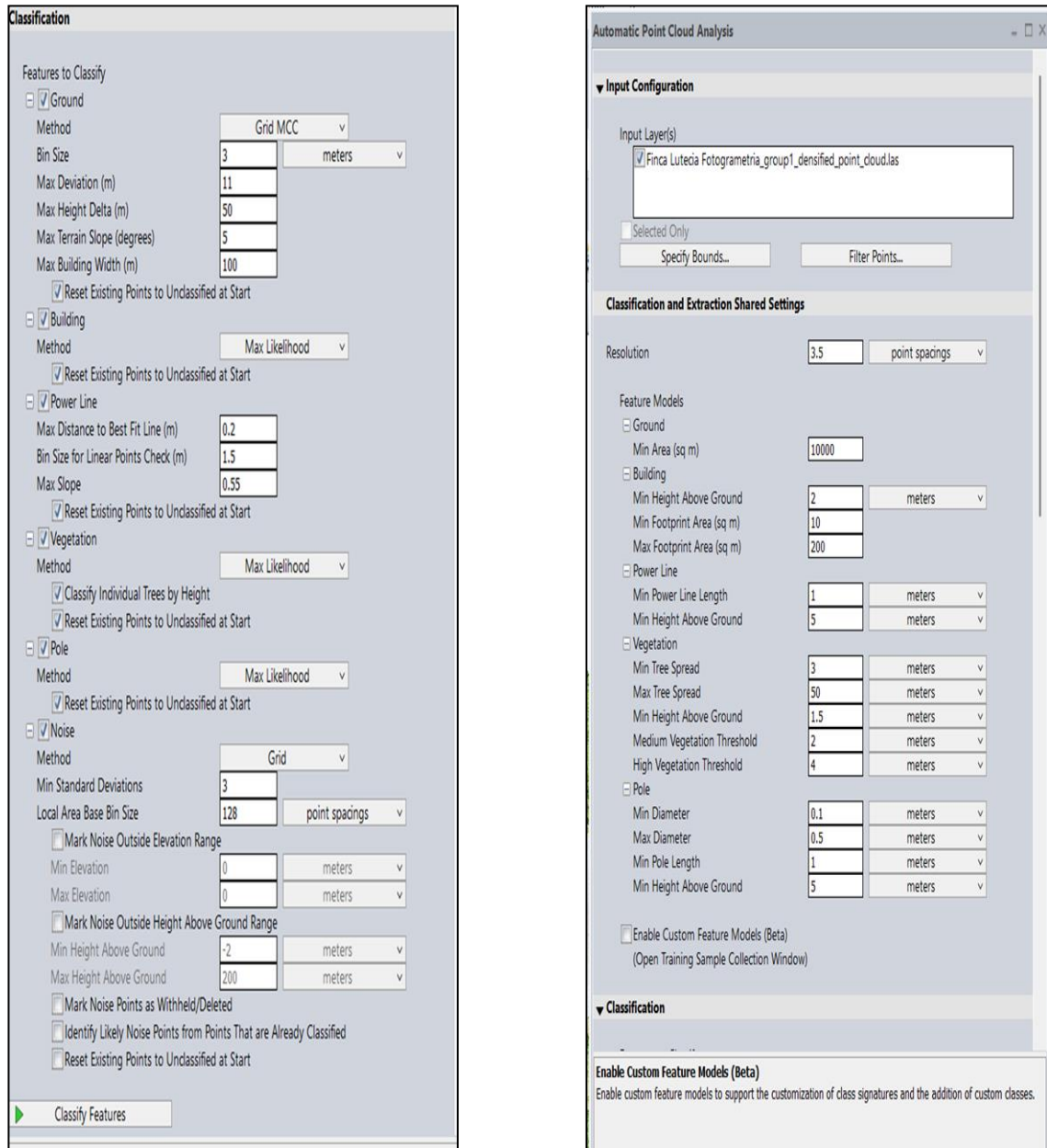


Figura N° 122. Clasificación de puntos de ruido

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Luego dar clic en Clasificación de parámetros o Classify Features.

De igual manera proceder a la clasificación de puntos de suelo como vemos en la Figura N° 123, para ello ubicarse nuevamente en la pestaña de **Lidar Analysis** e ir a la opción de **Automatic Classification** y seleccionar **Ground Points**.

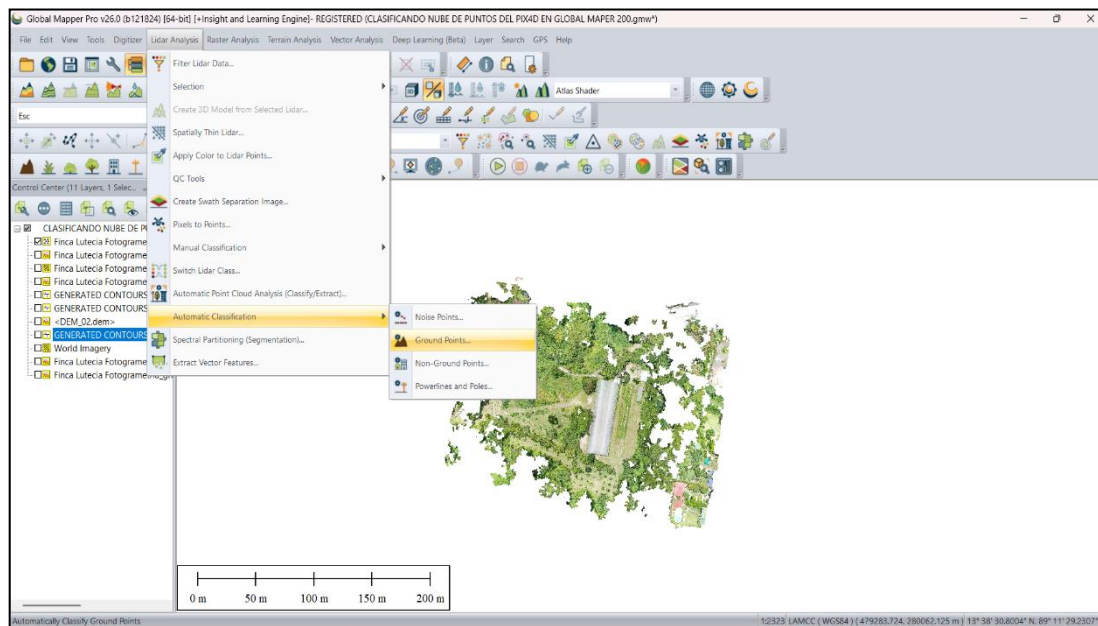


Figura N° 123. Clasificación de Puntos de suelo

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al clicar la opción de puntos de suelo o Ground points, se abrirá nuevamente los parámetros siguientes en la Figura N° 124, en los cuales se dejará todo por defecto.

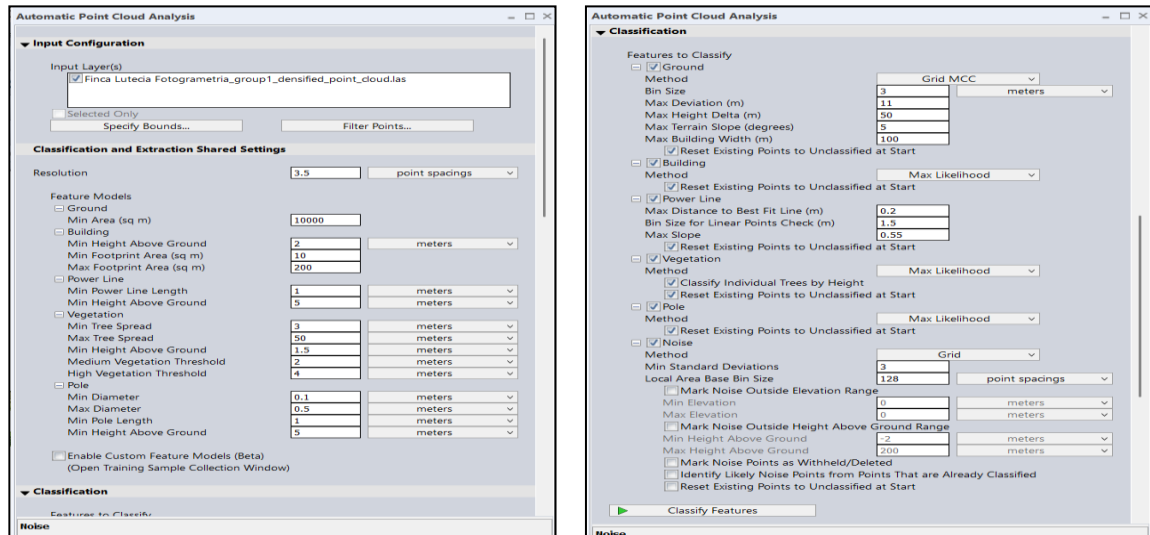


Figura N° 124. Clasificación de puntos de suelo

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

El tiempo del proceso de clasificación automática fue de 90 minutos.

Como se sabe, el proceso anterior no clasificó de manera completa y eficiente todos los puntos de la nube, es por ello que se hará uso de la clasificación manual, para ello se hará clic en el siguiente icono **Path Profile**, esto permitirá clasificar de forma manual la nube de puntos.

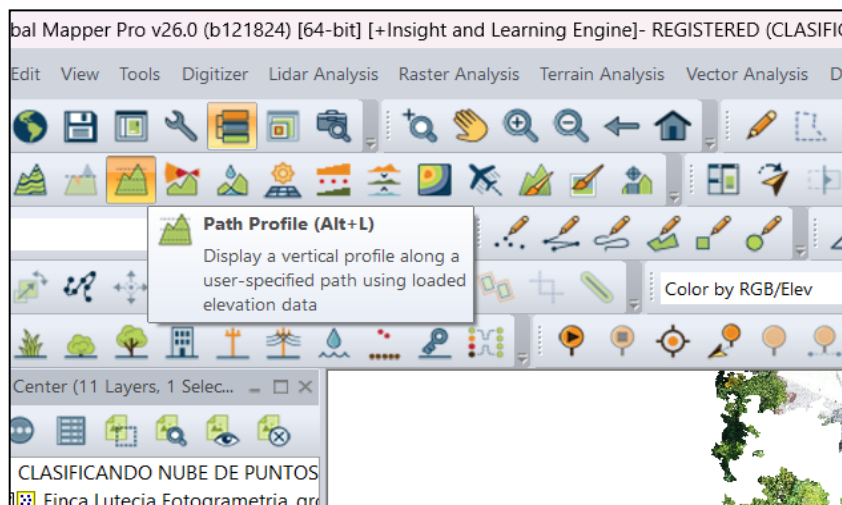


Figura N° 125. Clasificación de nube de puntos

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

La manera de hacer esta clasificación es arrastrar con el puntero aquellos puntos que se quiere clasificar, como se observa en la siguiente Figura.

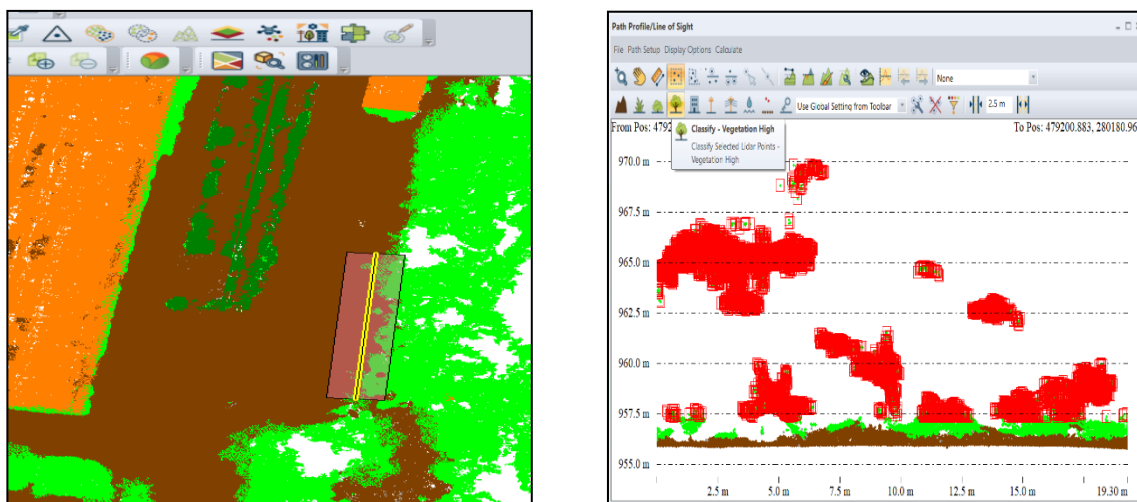


Figura N° 126. Clasificación de puntos manual

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Como se puede ver en las imágenes anteriores, se seleccionará los puntos de interés, luego hacer clic en la clasificación según lo que represente; para este caso se dará una clasificación alta, ya que como se observa en la Figura N° 126 al lado izquierdo, estos puntos representan árboles de gran tamaño. Es así como se realiza la clasificación, moviéndose y seleccionando los puntos que se desea clasificar.

Al hacer todo este proceso, nuestra nube de puntos densa nos quedará de la siguiente manera:

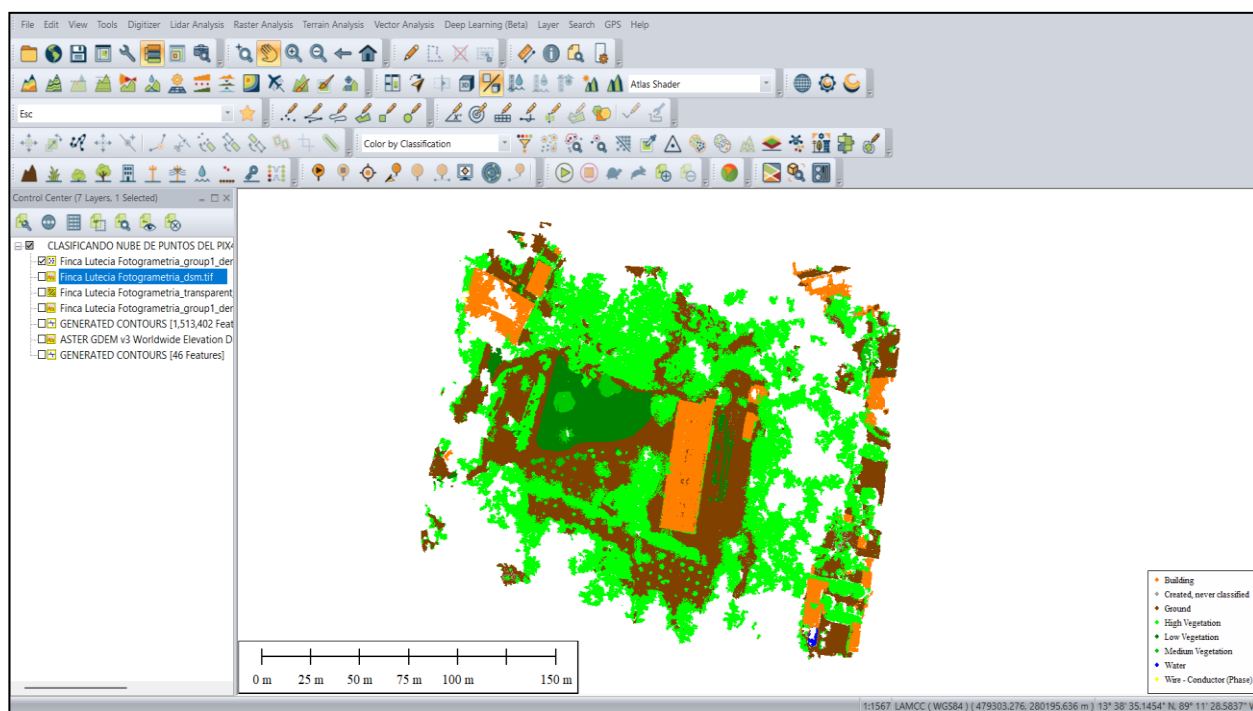


Figura N° 127. Nube de puntos clasificada automática y manualmente

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Como se puede observar en la parte inferior derecha de la Figura N° 127, aparece una leyenda de la clasificación de puntos que se encuentra en el área de estudio; en ella encontramos estructuras, suelo, vegetación alta, vegetación baja, vegetación media, agua, y postes de energía eléctrica.

Posteriormente al proceso de clasificación automática y manual de puntos, se procederá a revisar la correcta georreferenciación de la nube de puntos del proyecto realizado, para ello se debe ubicar en el icono siguiente de la Figura N° 128, en el que nos conectamos a datos en la red; al dar clic en el icono se nos abrirá la siguiente ventana de la Figura N° 129 en la que seleccionamos **World imagery**.

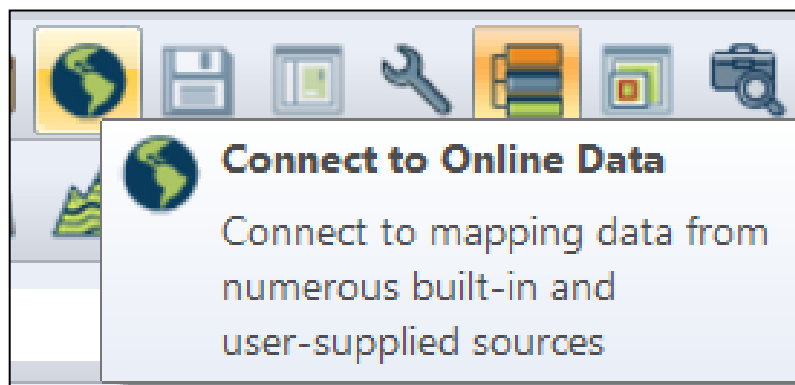


Figura N° 128. Conexión con los servidores

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

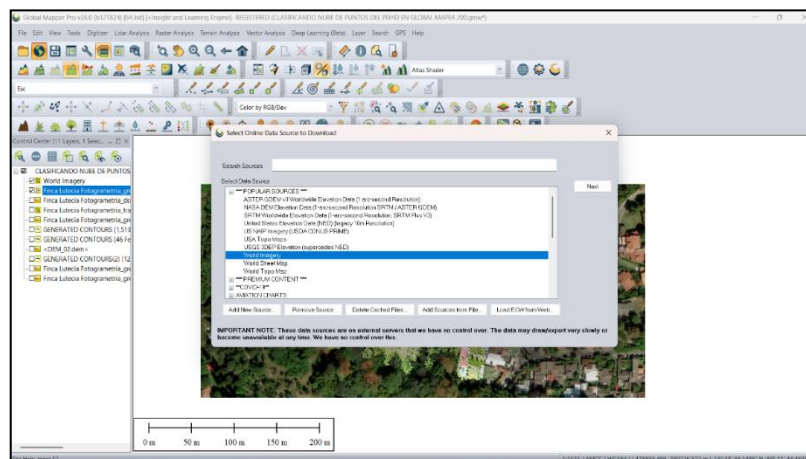


Figura N° 129. Chequeando georreferenciación de nuestro proyecto.

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al tener abierta la nube de puntos densa y sobre ponerla en la imagen satelital, podemos observar la correcta georreferenciación de la nube de puntos del proyecto:

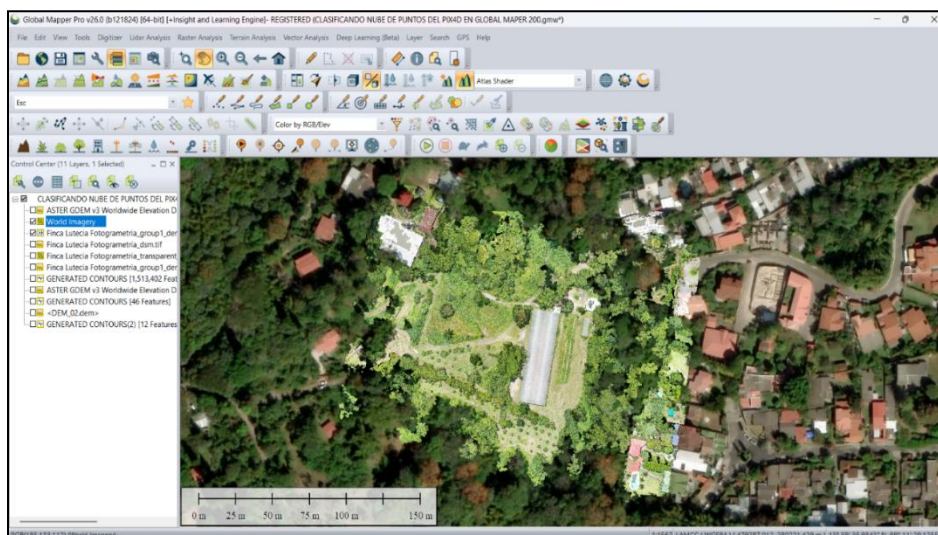


Figura N° 130. perfectamente georreferenciada

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Como un dato aparte debemos saber que para una correcta georreferenciación se necesita los puntos de control fotogramétricos y el sistema de referencia geodésico.

Ahora solamente queda chequear el Modelo Digital de Superficie y Modelo Digital de Terreno en Global Mapper. Para ello se debe ir al icono de **Create Elevation Grid**.

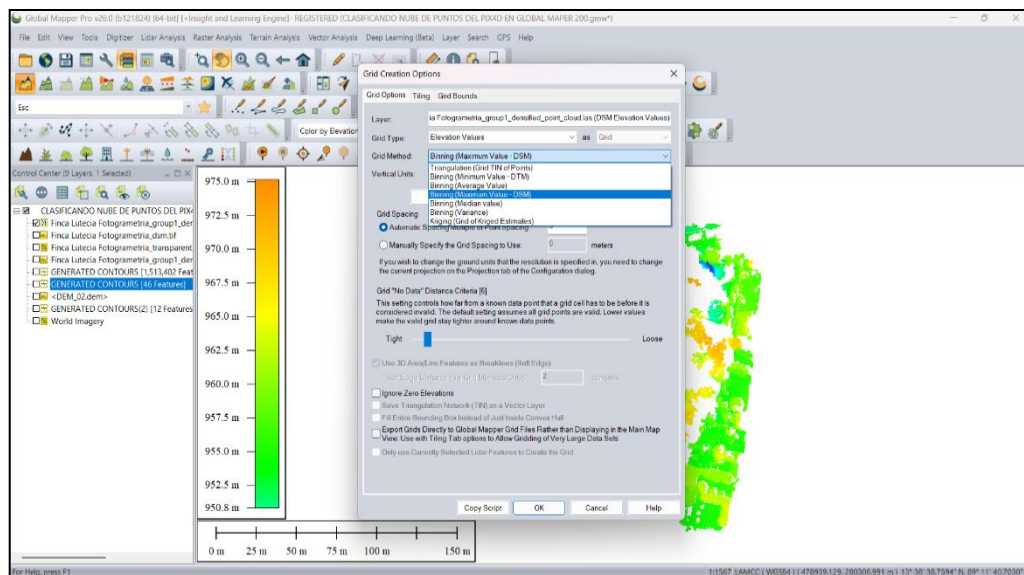


Figura N° 131. Obteniendo el Modelo Digital de Superficie y de Terreno

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

En ella se seleccionará **Grid Method** y se dará clic en la opción de **Binning (Maximum Value-DSM)**. Luego seleccionar la opción de **Grid Bounds** y esta abrirá las ventanas siguientes en las que se dará clic en **Draw Box** para que abra una imagen de la nube de puntos de la que se encerrará en un cuadro aquella

zona en la que se quiere que aparezca el Modelo Digital de Superficie, para este caso se dibuja el cuadro que vemos en la Figura N° 132 y luego dar clic en **OK**.

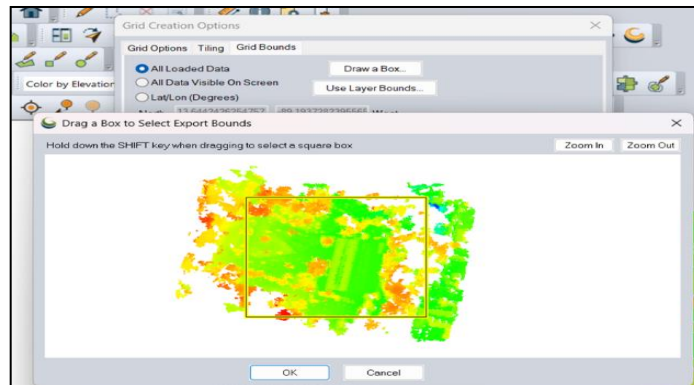


Figura N° 132. Obteniendo el Modelo digital de Superficie

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

De esta manera solamente se activa las sombras en el ícono llamado **Enable/Disable Hill Shading** y obtenemos el MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE.

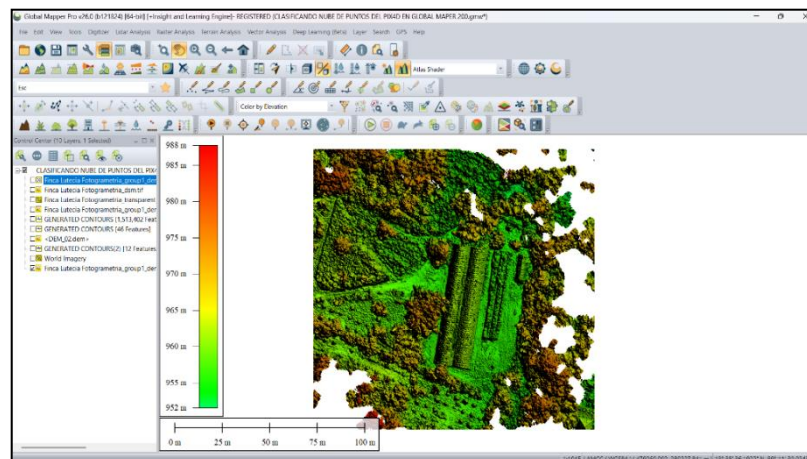


Figura N° 133. Modelo Digital De Superficie

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Para obtener el Modelo Digital de Terreno se hace el mismo procedimiento anterior con la única diferencia que en la opción de Grid Method, se debe seleccionar Binning (Mínimum Value-DTM) y se obtendrá el **Modelo Digital De Terreno**

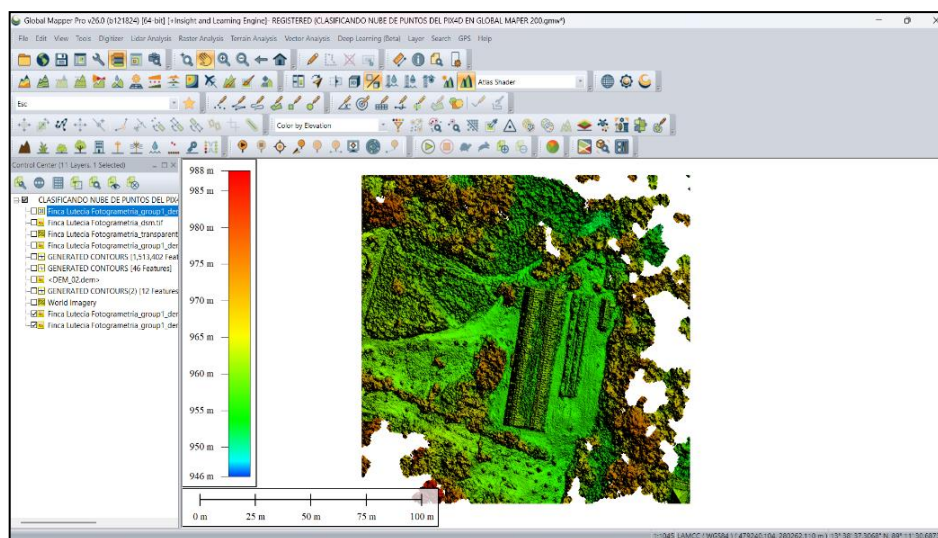


Figura N° 134. Modelo Digital De Terreno

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

El final será obtener las curvas de nivel, para ello se dará clic nuevamente al ícono de **Connect to Online Data** y en esta ocasión seleccionar la opción de **ASTER GDEM** en el que se abrirá el cuadro y se dará clic en **Connect**.

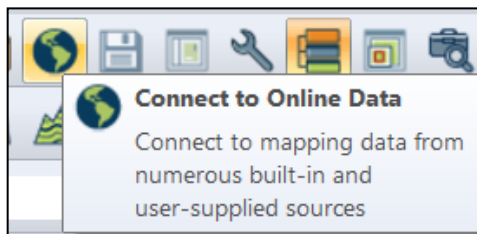


Figura N° 135. Conexión con datos en línea

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

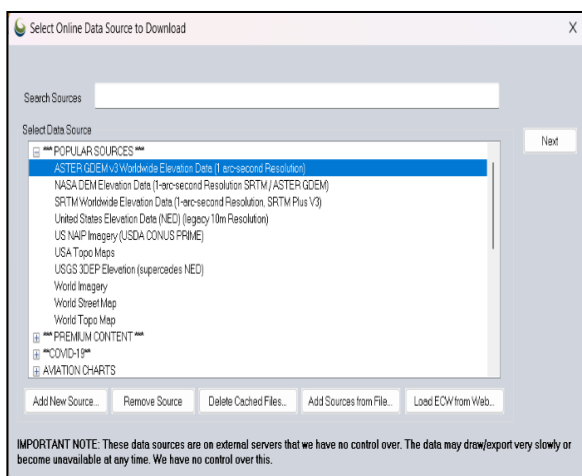


Figura N° 136. Seleccionando fuentes populares

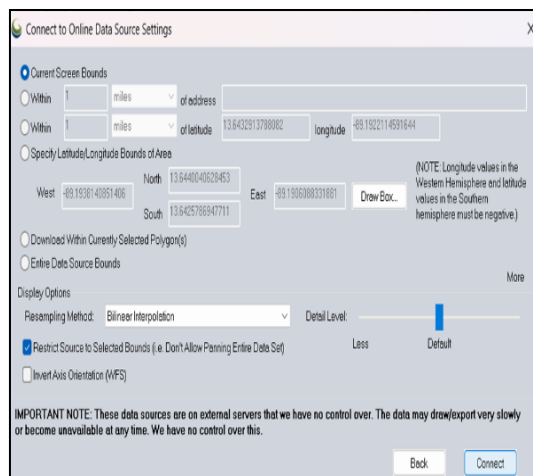


Figura N° 137. Conectando con datos en línea

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Luego se abrirá este cuadro en imagen ASTER GDEM (Figura N° 138) en el que se colocará las curvas de nivel.

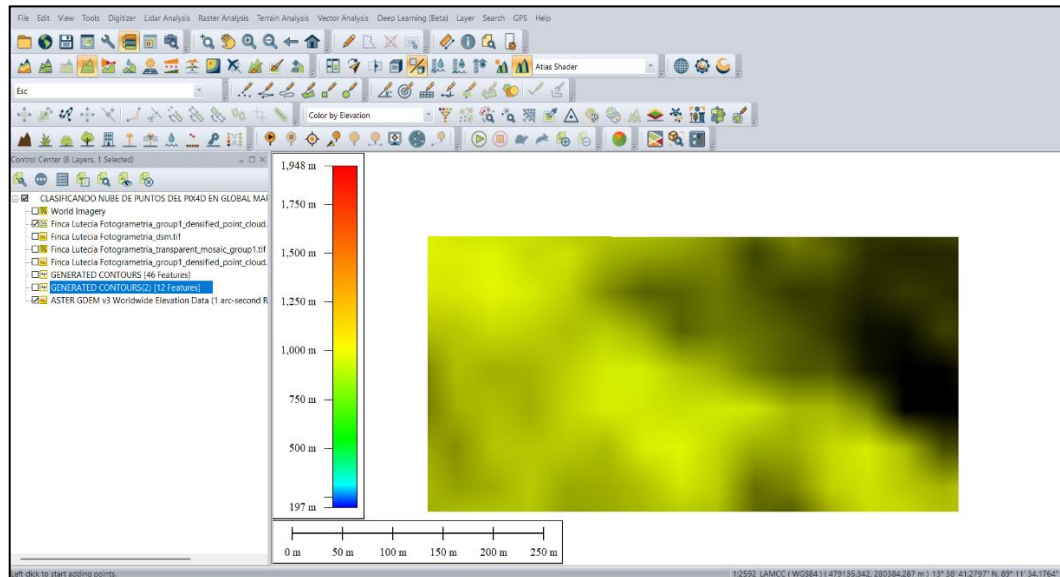


Figura N° 138. ASTER GDEM

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Para ello se debe seleccionar ASTER GDEM en la parte izquierda de la pantalla anterior (Figura N° 138) y dar clic derecho y se abrirán las siguientes opciones Figura N° 139. En el primer cuadro ir a **Layer** y en el segundo cuadro dar clic en **Export- Export Layer to New File**.

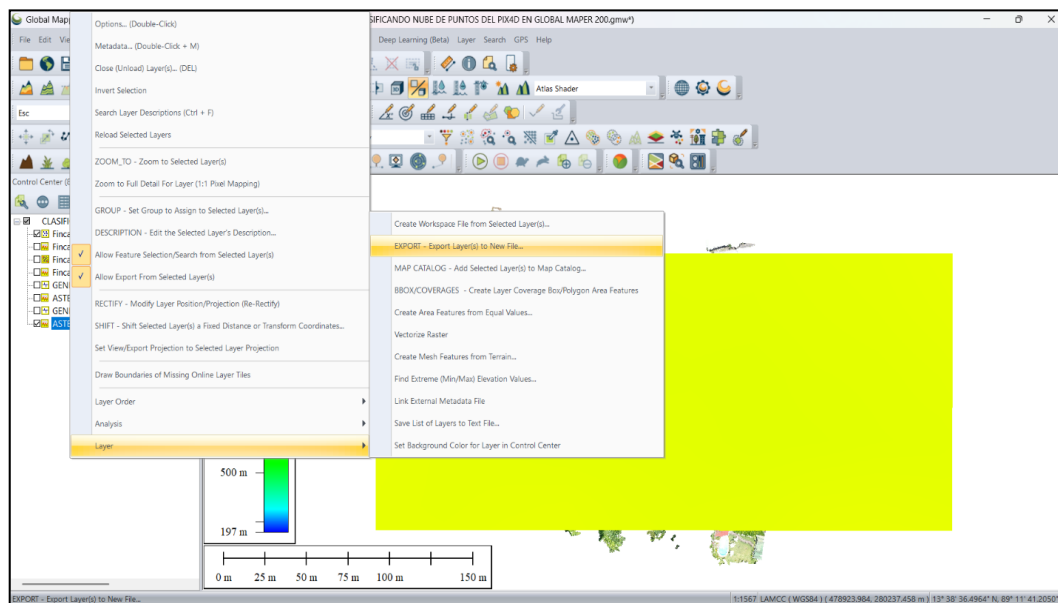


Figura N° 139. Exportación a un nuevo archivo

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

De esta manera se abrirán las siguientes ventanas en la que se debe seleccionar solamente **ASTER GDEM** y **Ok** (Figura N° 140). Luego aparecerá el cuadro **Select Export Format** y seleccionar **DEM** y **OK** (Figura N° 141) y en la Figura N°142 dar clic en **Yes**.

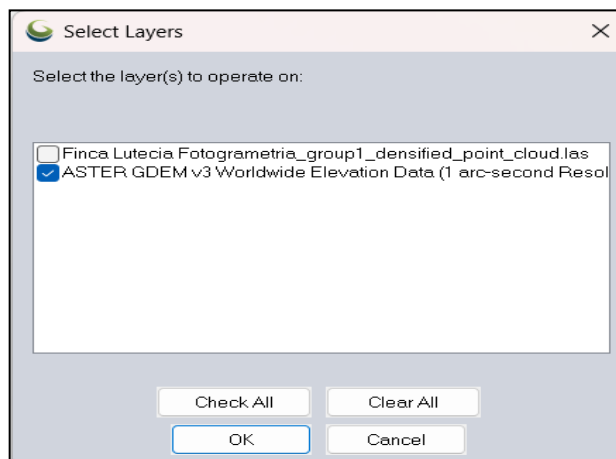


Figura N° 140. Opción de modelado a utilizar

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

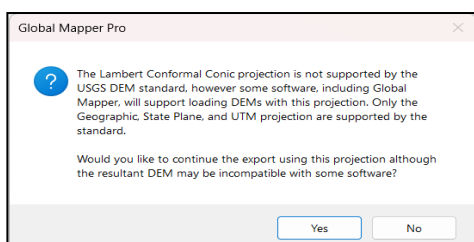


Figura N° 141. Selección del ASTER
GDEM

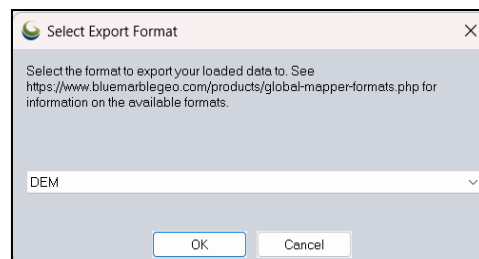


Figura N° 142. Aceptando todos los
parámetros a utilizar

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Luego se abrirá la siguiente ventana Figura N° 143 y en **DEM Export Options**, seleccionar **Export Bounds** el cual abrirá el cuadro para poder ubicar la zona donde se quiere que aparezcan las curvas de nivel, es por ello que se dibujara en un cuadrito el área de interés y luego dar clic en **OK**.

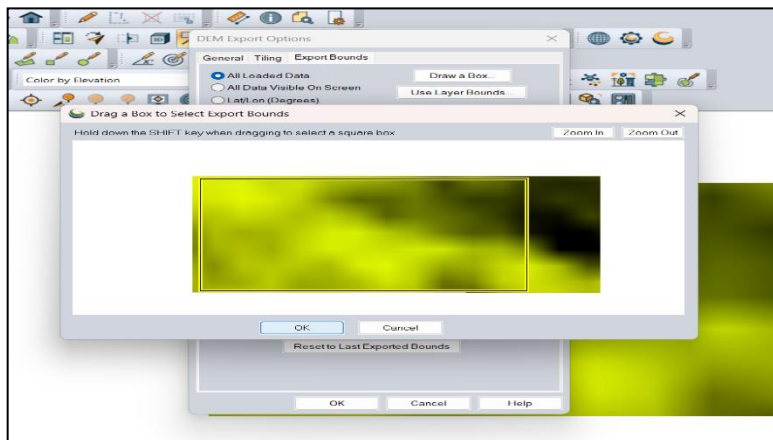


Figura N° 143. Seleccionando área para el DEM

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

El paso anterior abrirá una ruta que es donde se guardará el DEM creado el cual será llamado DEM01. Luego se debe dirigir hacia el ícono de **Open data files** y abrir la DEM que se ha creado.

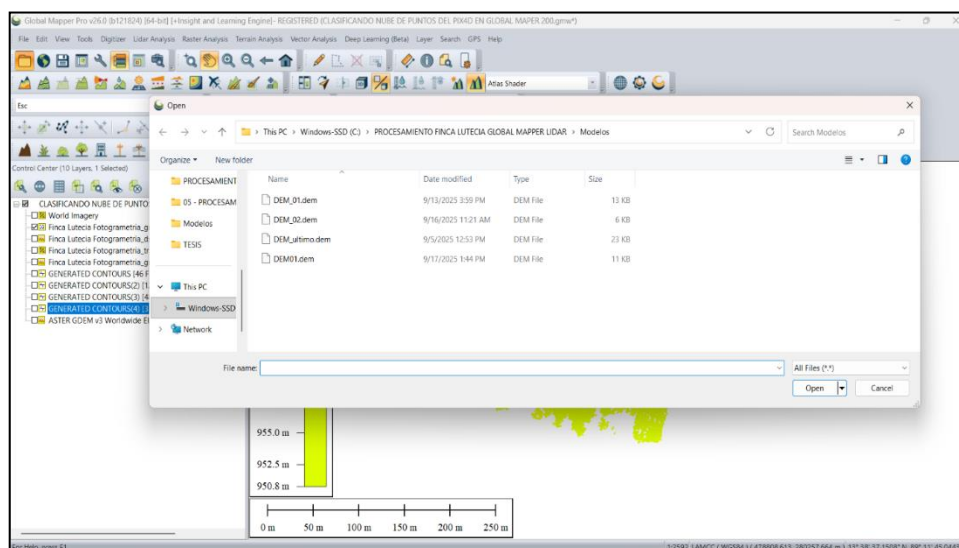


Figura N° 144. Ruta donde estará guardado el DEM

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Una vez seleccionada y abierta la DEM, dirigirse al ícono de Create Contours para generar las curvas de nivel. En este caso se seleccionará solamente la pestañita que dice DEM01.dem en el cuadro de la izquierda de la Figura N° 145, luego dar clic en OK y en el cuadro abierto de la derecha de la Figura N°145, solamente dar clic en el intervalo de curvas o Contour Interval con el cual se tirará curvas a 1 metro y luego dar en OK.

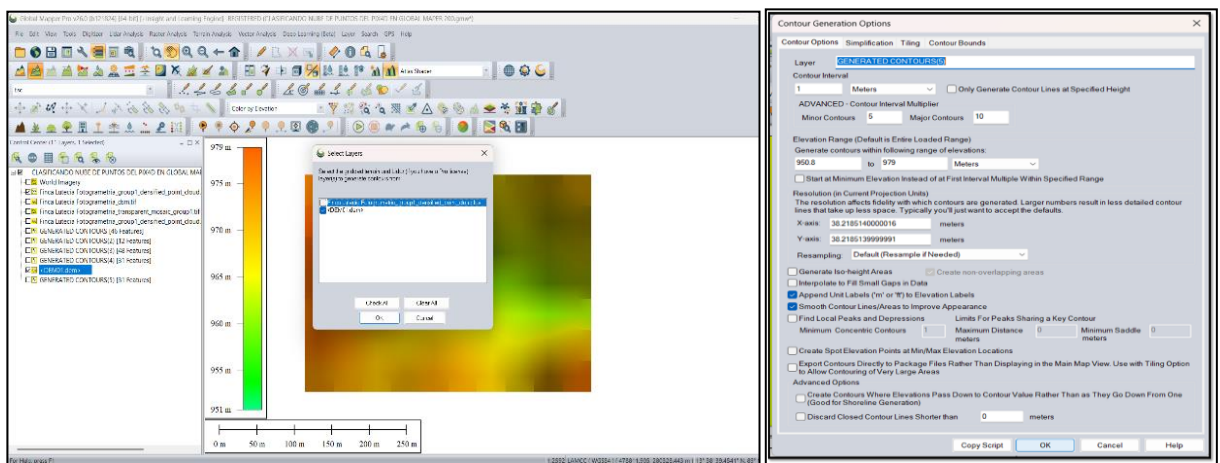


Figura N° 145. Creando curvas de nivel

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

Al final de todos los procesos realizados se obtendrán las curvas de nivel a 1 metro como se observa en la Figura N°146.

Curvas de nivel a 1 metro

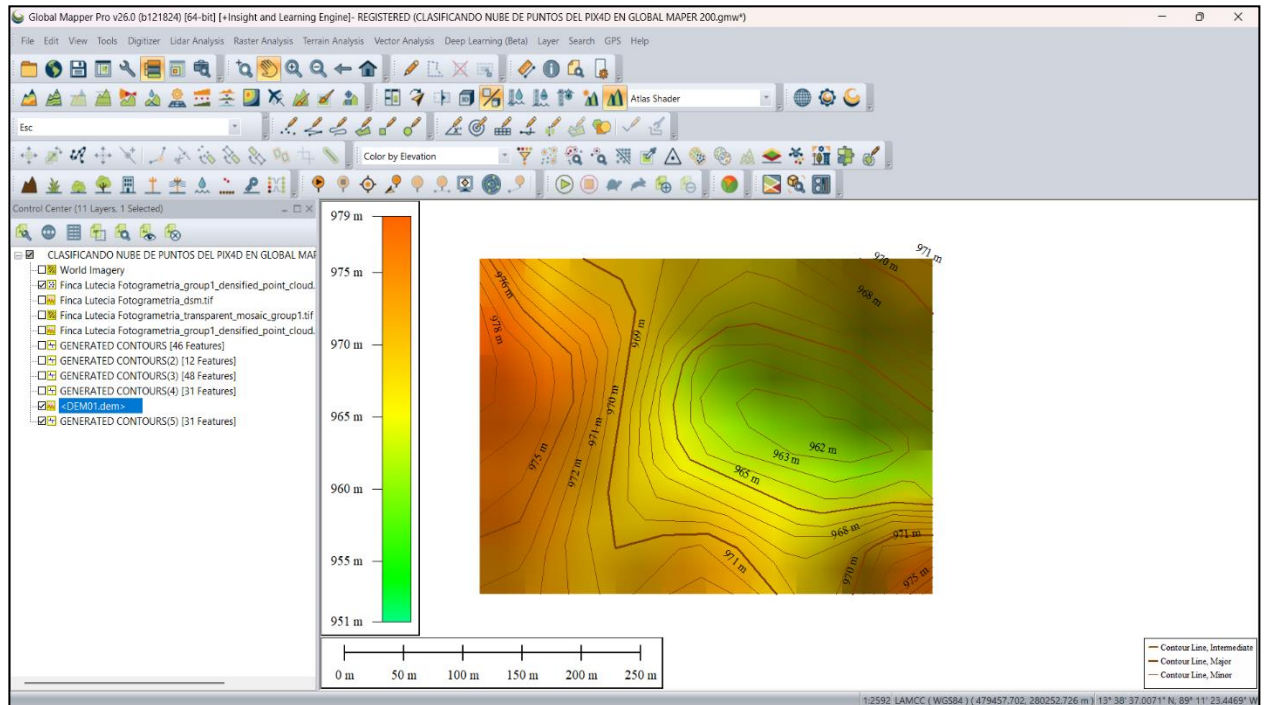


Figura N°146. Curvas de nivel a 1 metro

Fuente: Propia, captura de pantalla tomada de software

CAPÍTULO VIII: LEVANTAMIENTO CON SISTEMA LIDAR Y DRON

8.1. Levantamiento en campo.

8.1.1. Pix4D Capture o Pilot 2

Pix4DCapture:

Pix4DCapture es una aplicación gratuita para dispositivos inteligentes que permite planificar vuelos y capturar datos con drones para crear mapas y modelos 3D. Aunque, es una herramienta popular, el soporte de Pix4DCapture finalizó, por lo que ya no se recomienda su uso, aunque puede seguir usándose sin actualización.

DJI Pilot 2:

Pilot 2 se refiere a la segunda versión de la aplicación DJI Pilot, diseñada para operar drones DJI, que mejora las funciones de vuelo y la interfaz del usuario respecto a su predecesora. Es un sistema de certificación para edificios saludables que en su versión 2.0 pone más énfasis en la salud mental y el bienestar a través del diseño y las políticas de programación.

Concepto: Es una aplicación móvil para el control de drones DJI, un software que se carga en el control remoto antes del vuelo. Esta aplicación está diseñada para los drones de la línea DJI Enterprise, como el Matrice 350 RTK, y el Mavic 3 Enterprise, ofreciendo funcionalidades avanzadas como la gestión de sensores,

la planificación de misiones y la visualización de parámetros de vuelo. A diferencia de otras aplicaciones de DJI para drones recreativos, DJI Pilot está orientada a operaciones industriales y profesionales, integrándose con plataformas como FlightHub 2 para la gestión integral de flotas y datos.

Funciones clave: Interfaz de usuario. Ofrece una pantalla de inicio con la posibilidad de explorar sus configuraciones.

Funciones de seguridad: Permite definir alturas de vuelo y configurar acciones ante la pérdida de control, como regresar al punto de origen o aterrizar.

Información del dron: Muestra en la barra de estado el modo de vuelo, el estado del GNSS, la intensidad de la señal del control y la batería.

Características clave de DJI Pilot:

- **Control avanzado de drones Enterprise:** Permite controlar drones de la gama profesional, como los Matrice y Mavic Enterprise.
- **Verificación de sensores y parámetros:** Ofrece una vista detallada del estado de los sensores de la aeronave, la propulsión y la batería, tanto del dron como del control remoto.

- **Gestión de mantenimiento:** Proporciona programas de mantenimiento para drones Enterprise, registrando distancia recorrida y datos de servicios.
- **Checklist de seguridad:** Incluye una checklist previa al vuelo para verificar el correcto funcionamiento de todos los sensores.
- **Configuración de vuelo:** Permite configurar parámetros como el modo de vuelo, la altitud de regreso a casa (RTH), y el comportamiento ante obstáculos.
- **Control de cámaras y sensores:** Permite controlar las diferentes cámaras del dron, incluyendo las térmicas y funciones como el telémetro láser.
- **Integración con FlightHub 2:** La versión PE permite el uso de FlightHub en una nube privada y es compatible con la plataforma FlightHub 2 para la gestión de operaciones en la nube.
- **Planificación de misiones:** Incluye funciones inteligentes para planificar misiones como la inspección lineal de infraestructuras.

8.1.2. Preparación y configuración del equipo.

La preparación del dron DJI Matrice 350 RTK implica una inspección completa del dron y sus componentes, incluyendo las hélices, la batería, los sensores y el sistema de transmisión. También se debe asegurar que el firmware esté actualizado y que la aeronave esté limpia y en buen estado. Antes del vuelo, es crucial verificar la meteorología y configurar el plan de vuelo en la aplicación DJI Pilot, cargando las baterías por completo y revisando el nivel de energía.

Dron DJI matrice 350 RTK: Es la plataforma dron comercial de DJI, es de los más reciente y se inspira en los sistemas de aviónica más modernos. Ofrece un tiempo de vuelo de hasta 55 minutos, una avanzada IA y un sistema de gestión del estado del VANT, entre otros. El M350 RTK redefine lo que se puede esperar de un dron de empresa gracias a una combinación líder de funciones inteligentes, alto rendimiento y fiabilidad.

Zenmuse L2: es un sensor de escaneo láser de alta precisión que facilita la obtención de información LIDAR para la creación de un modelo más detallado y preciso de la superficie terrestre. Características destacadas: Sistema completo LIDAR Plug & Play.



Figura N° 147. Dron: DJI matrice 350 RTK y sensor LIDAR Dji Zenmuse L2

Fuente: vistadroneperu.pe

Inspección Pre-Vuelo:

- **Inspección visual:** Revisa el dron en busca de daños, grietas o suciedad en los brazos, tren de aterrizaje, cámara y cardán.
- **Baterías:** Asegúrate de que estén completamente cargadas y que el nivel de energía sea normal.
- **Hélices:** Verifica que no estén deformadas, desgastadas o rotas.
- **Motores y tornillería:** Gira los rotores para comprobar que no estén bloqueados y que los tornillos de los motores estén bien apretados.

- **Sensores y sistema de transmisión:** Comprueba que estén limpios y funcionando correctamente.
- **Carga útil (cámara/LIDAR):** Confirma que la cámara o el sensor esté correctamente instalado y funcionando.

Preparación del Dron:

- **Tren de aterrizaje:** Una vez se abre el estuche del dron Matrice 350 en un lugar seguro, se colocan las dos piezas soporte (Tren de aterrizaje). Paso siguiente: coloca el dron sobre una superficie plana y estable, lejos de personas, animales u objetos que puedan afectar la estabilidad del mismo.
- **Preparación de las hélices:** Se extienden los brazos de las hélices y de una forma ordenada y cuidadosa utilizando las marcas guías, colocar las hélices en diagonal también siguiendo las marcas (estas pueden tener colores).
- **Sensor:** Se coloca el sensor en la parte inferior del Dron utilizando marcas guías para su correcto ensamble.
- **Carga de baterías:** Carga completamente las baterías del dron y del control remoto antes de cada vuelo.

- **Actualización de firmware:** Asegúrate de que tanto el dron como el control remoto tengan el firmware actualizado a la última versión.
- **Limpieza:** Limpia el dron para eliminar cualquier polvo, aceite o arena que pueda obstruir los ventiladores o sensores.



Figura 148. Dron: DJI matrice 350 RTK – Preparación de las hélices

Fuente: [YouTube. MISURA Topografía](#)



Figura 149. Sensor LIDAR Dji Zenmuse – Colocación

Fuente: [YouTube. Acre](#)

Configuración del vuelo:

- **Aplicación DJI Pilot:** Abre la aplicación y verifica que el ícono de la aeronave aparezca en la pantalla. Se seleccionan los parámetros requeridos para el vuelo según las condiciones topográficas de la zona a levantar.
- **Condiciones meteorológicas:** Revisa las condiciones del clima para asegurarte de que sean adecuadas para volar.
- **Plan de vuelo:** Crea un plan de vuelo automatizado y asegúrate de que la altitud de retorno a casa y la altura de vuelo programada concuerden.

- **Punto de partida (H amarilla):** Verifica que el punto de partida de la aeronave (representado por la letra "H" amarilla) esté configurado.



Figura 150. Control de mando – selección de plan de vuelo.

Fuente: [YouTube. MISURA Topografía](#)

8.1.3. Recolección de información durante el vuelo

Ejecución del vuelo:

- **Lanzamiento:** Una vez que la misión esté cargada y todo esté correcto presiona "start" para comenzar el vuelo automático.
- **Control y supervisión:** Sigue el vuelo a través de la telemetría y la aplicación y mantén el control manual si es necesario.

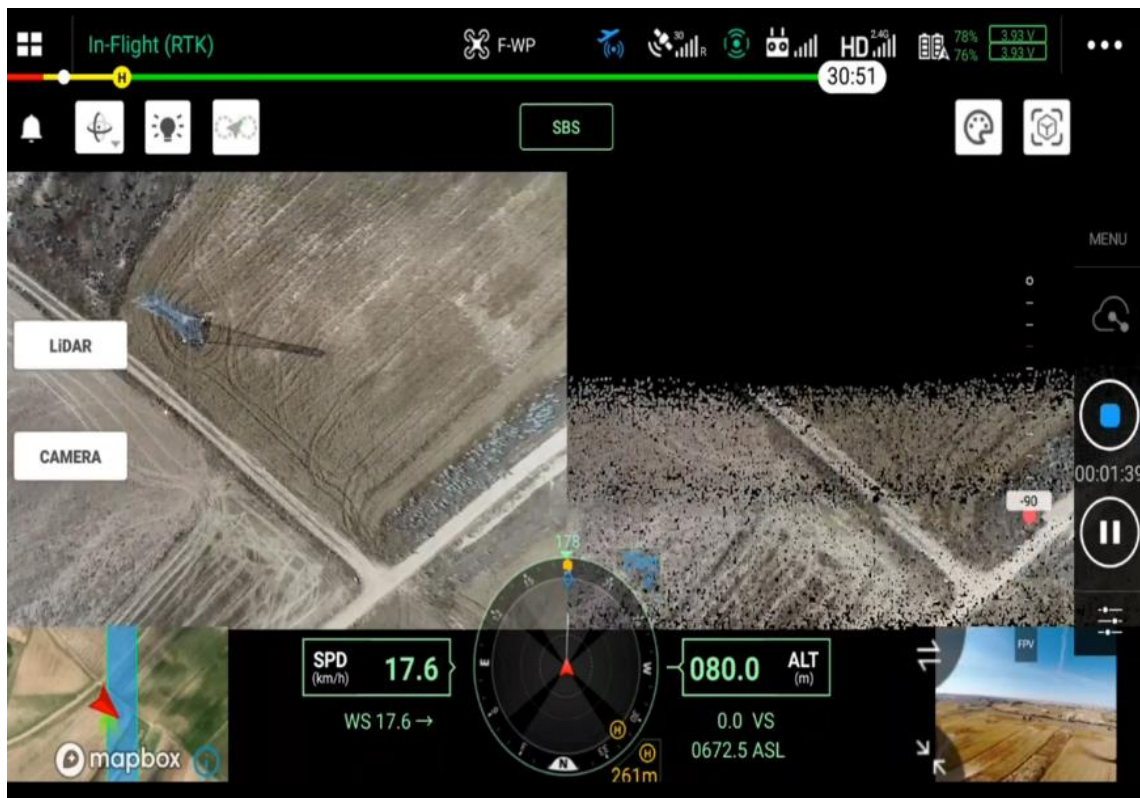


Figura 151. Vista de control de mando durante el vuelo.

Fuente: [YouTube. Acre](#)

8.1.4. Finalización y obtención de la toma de información

Mantenimiento Post-Vuelo:

- **Aterrizaje y recuperación:** Una vez finalizado el vuelo el dron regresa automáticamente o manualmente a su punto de origen para su aterrizaje y recogida.
- **Limpieza:** Limpia las hélices con un paño suave después de cada vuelo.

- **Revisión:** Realiza una inspección visual para verificar el estado de las baterías y del dron después de cada operación.
- **Almacenamiento:** Almacena el dron y sus accesorios en un lugar seguro y adecuado.

8.2. Procesamiento de la información obtenida en campo.

8.2.1. Global Mapper

Global Mapper es un software de Sistema de Información Geográfica (SIG) potente y fácil de usar que permite procesar, visualizar, fusionar, importar y exportar datos geoespaciales ráster, vectoriales y de elevación. Es conocido por su versatilidad, soporta una amplia gama de formatos de archivo y es útil tanto para profesionales como para principiantes que trabajan con mapas y datos espaciales.

Funcionalidades principales

- **Manejo de datos:** Puede abrir, importar y exportar datos de diversos formatos SIG, CAD y de elevación, como datos de drones y nubes de puntos LIDAR.
- **Visualización en 3D:** Permite ver y analizar datos espaciales en 3D, generando vistas en perspectiva, sombreados personalizados y curvas de nivel.

- **Análisis de terreno:** Incluye herramientas para el modelado de cuencas, análisis de cuencas visuales, delineación de cuencas hidrográficas y cálculo de volúmenes.
- **Acceso a datos en línea:** Proporciona acceso directo a mapas, imágenes satelitales y datos de elevación de fuentes en línea.

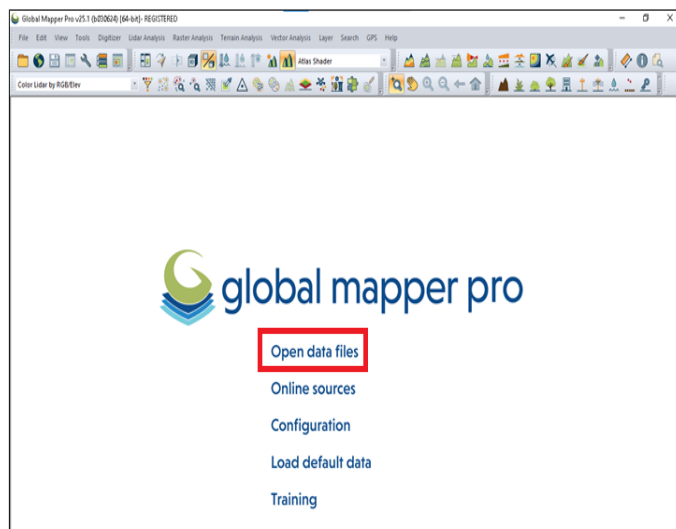
Finalidad y uso:

- **Profesionales:** Geólogos, hidrólogos, ingenieros, topógrafos y otros científicos naturales que necesitan herramientas robustas para análisis espacial y gestión de datos.
- **Principiantes:** Es una herramienta SIG adecuada para usuarios novatos que buscan una solución para la gestión de datos espaciales.

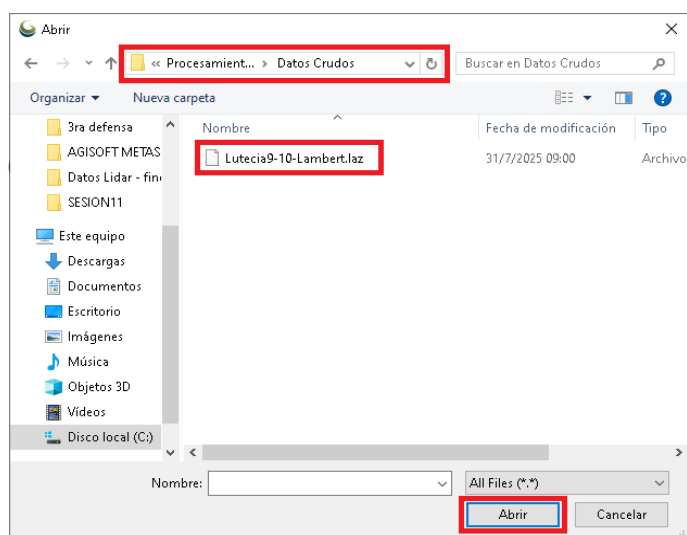
Variante avanzada

Global Mapper Pro: Es una versión más avanzada que incluye las funcionalidades básicas de Global Mapper, además de herramientas especializadas para el procesamiento avanzado de nubes de puntos, la automatización de flujos de trabajo y la vectorización de imágenes.

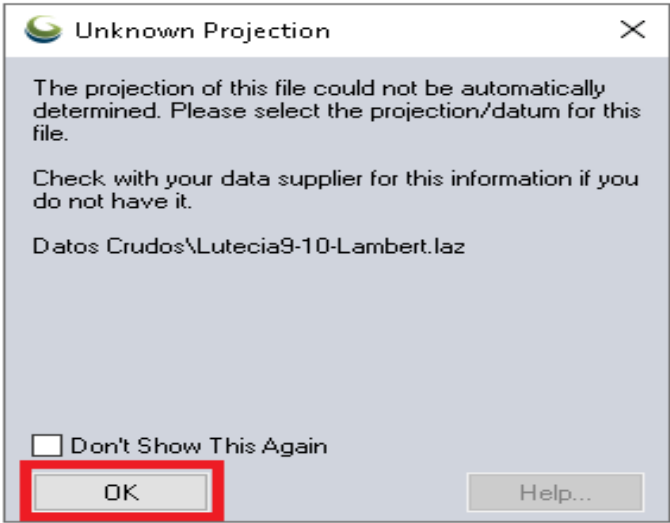
8.2.2. Importación de la información obtenida en campo.



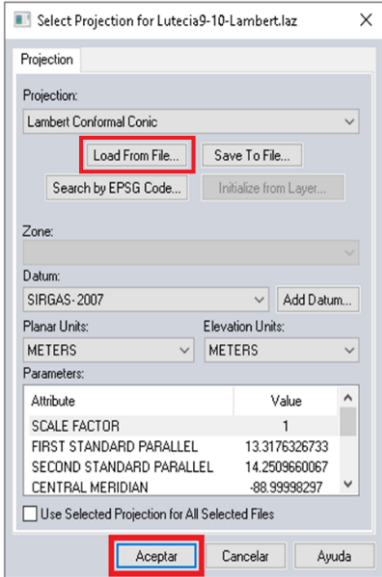
En Global Mapper se selecciona la opción **“Open data files”** para extraer los datos obtenidos durante el vuelo en el campo.



Posteriormente de seleccionar **“Open data file”** se abrirá una ventana de búsqueda para direccionar a donde se encuentra guardados los datos crudos en el ordenador. Una vez

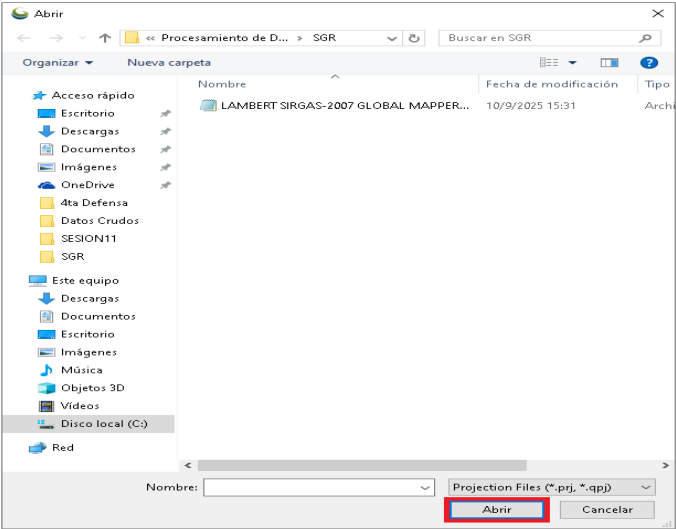
	<p>seleccionado el archivo (“Letecia9-10-Lambert.Laz”) se dará clic en la opción “Abrir”.</p> <p>Nota: Este puede tener una extensión Las o laz.</p>
	<p>Luego, se habilitará una ventana emergente que hace referencia a la proyección en el archivo que no puede ser determinada automáticamente. Por favor seleccionar la Proyección y el Datum para este archivo. Una enterado ante este aviso damos clic en la opción “ok”.</p>

8.2.3. Definir el sistema geodésico



Se habilitará una ventana con la proyección y el Datum necesario para procesar. En este caso se cargará un archivo .prj desde la opción **“Load From File”**.

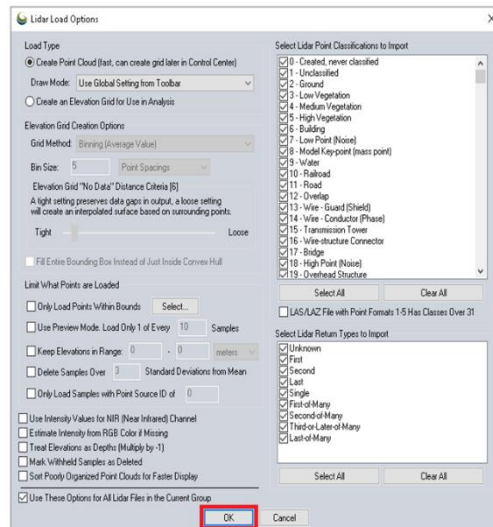
Nota: Una vez cargado el archivo .prj se aprecia la configuración de todos los parámetros asociados al sistema SIRGAS-ES2007. Para completar, clic en la opción **“Aceptar”**.



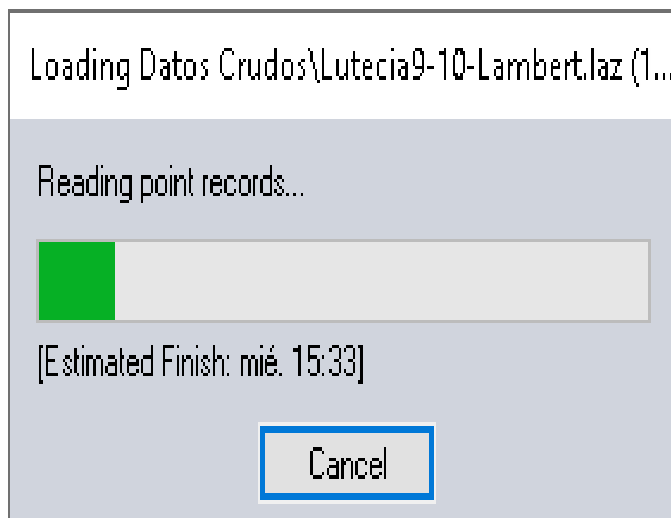
Se abre una ventana de búsqueda para cargar el archivo. En este caso se guardó en las carpetas:

- 1: Disco local "C".
- 2: Procesamiento de Datos.
LIDAR Finca Lutecia.
- 3: SGR.

Una vez seleccionado el archivo .Prj. Con el título **"LAMBERT SIRGAS-2007 MAPPER"**, damos clic en **"Abrir"**.



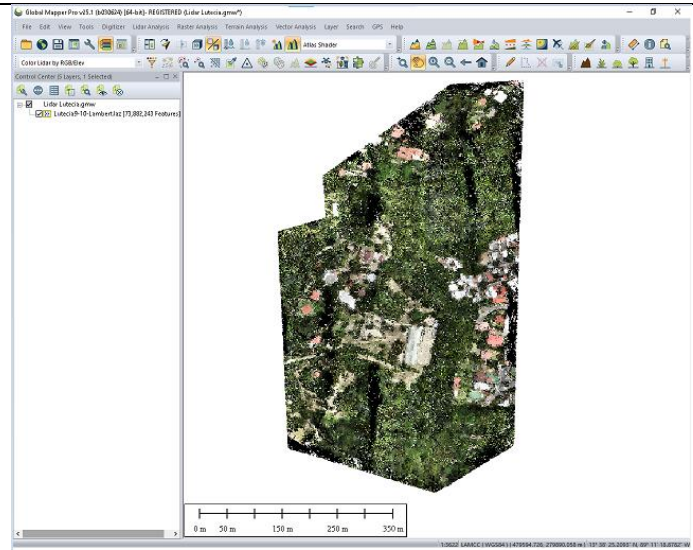
Para finalizar arroja una ventana donde pregunta si se desea cargar una Nube de Puntos o una Grid de elevación. Se selecciona crear la nube de puntos y para concretar, clic en la opción “Ok”.



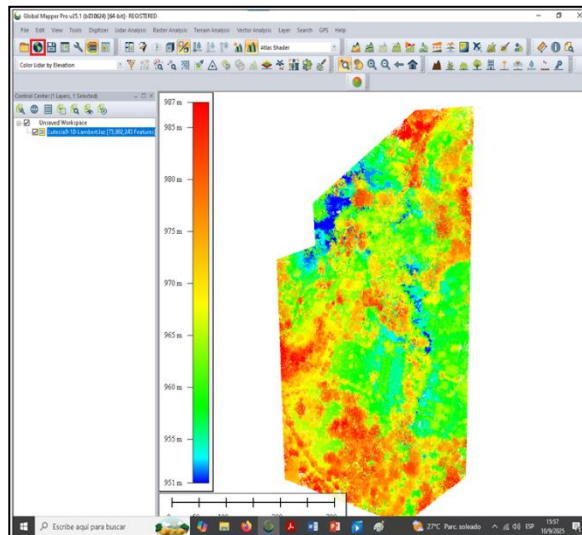
El proceso de carga dura alrededor de unos 15 s, esto puede variar dependiendo de la cantidad de puntos tomados en el levantamiento en campo y de las características del ordenador con el cual se

	<p>estará trabajando. En nuestro caso la computadora con la que se trabajó tiene las especificaciones mínimas necesarias para realizar este tipo de procesamiento.</p>
--	--

8.2.4. Obtención de la nube de puntos

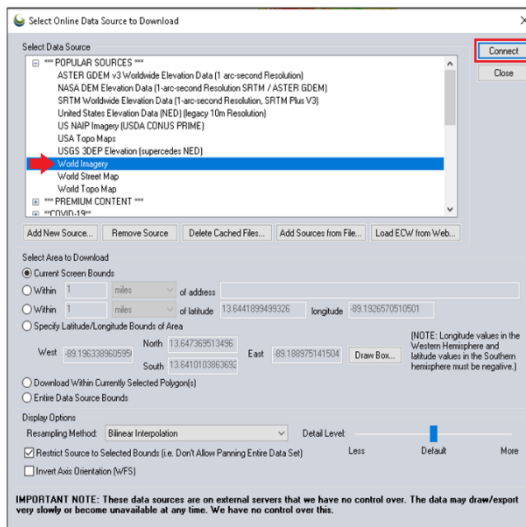
	<p>Como es un levantamiento con sensor LIDAR este nos carga directamente la nube de puntos.</p> <p>Nota: Podemos ver que este archivo ya viene con colores procedente de una cámara RGB.</p>
---	--

8.2.5. Aplicación de colores a la nube de puntos

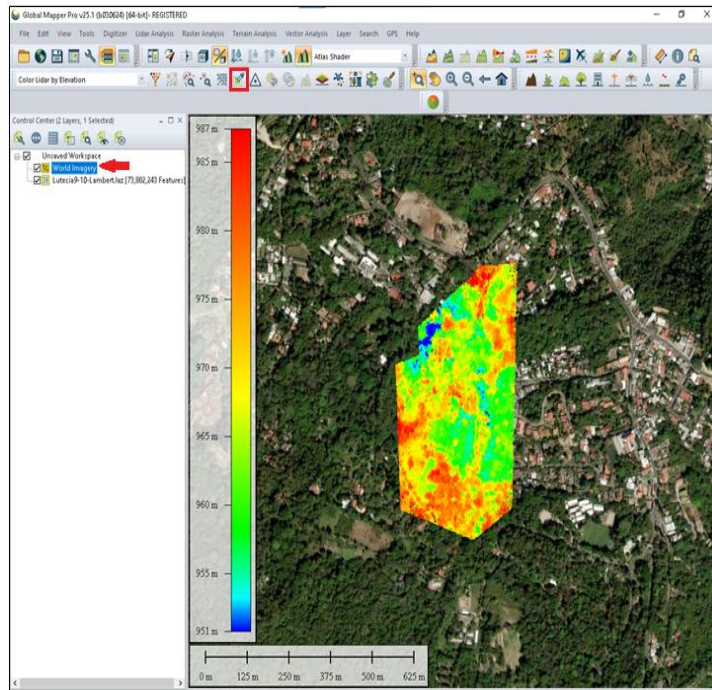


Finalmente, en la ventana de visualización se puede apreciar la nube de puntos georreferenciado con el sistema de referencia geodésico SIRGAS –ES2007. Posteriormente se asigna los colores reales.

Posteriormente clic en el ícono de “**Connect to Online Data**” para poder conectarnos al servidor.



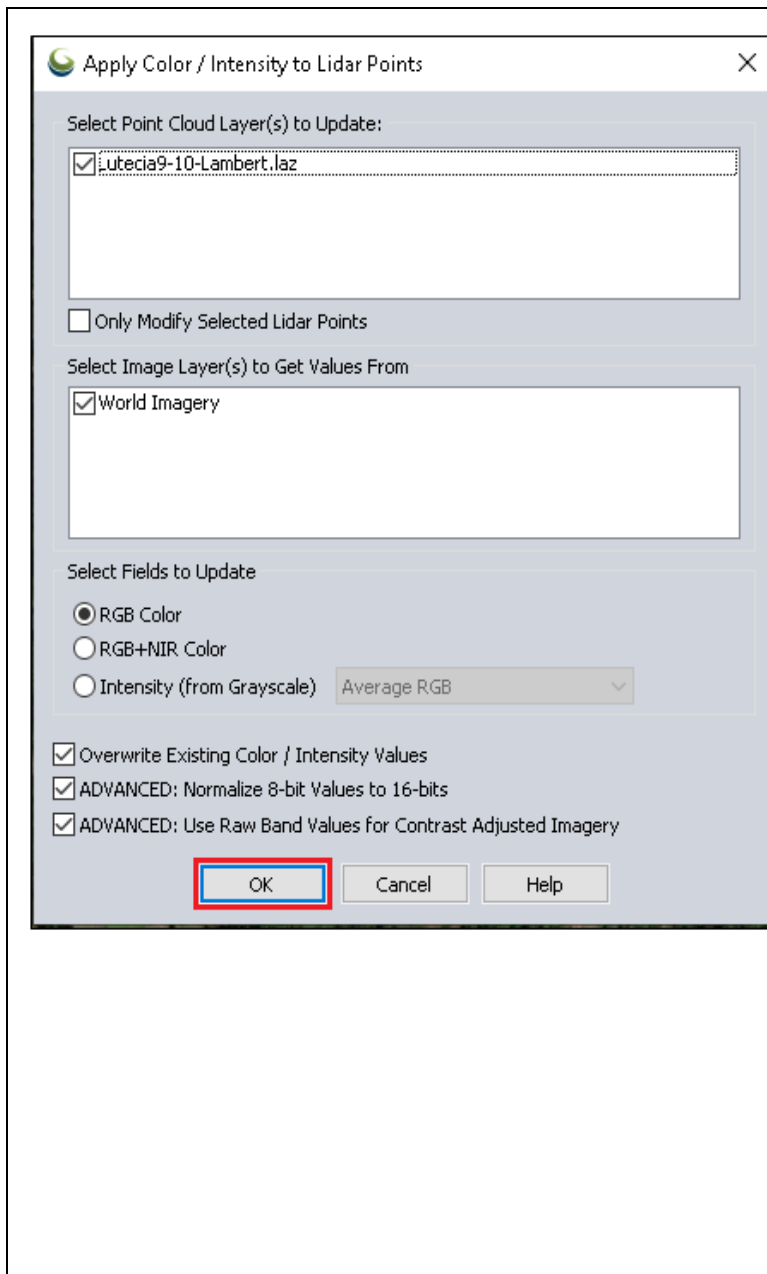
Se habilita la ventana con las diferentes funciones de conexión con el servidor. Seleccionamos la opción de “popular Sources”, “World Imagery” y “Connect”.



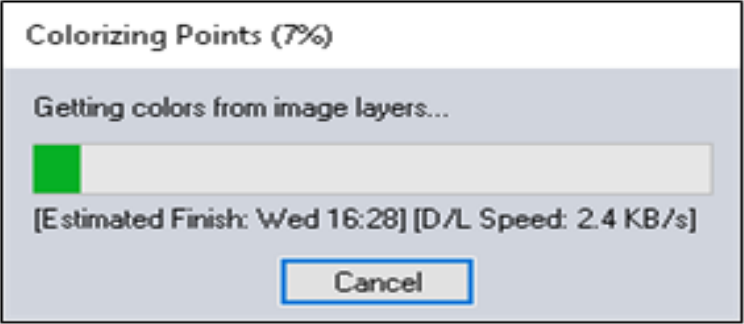
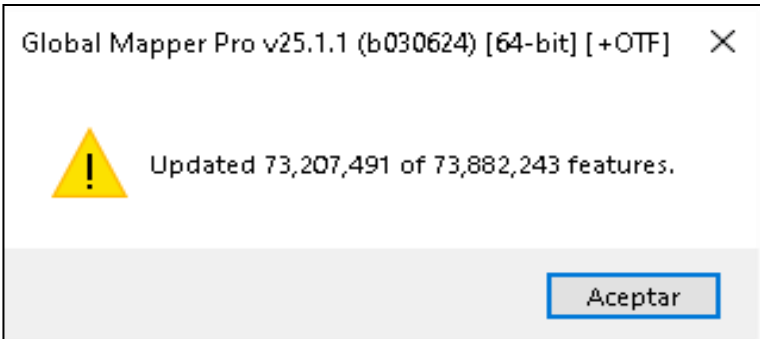
Después de haber dado **“Connect”** en la ventana de conexión con los servidores se descargará la imagen satelital.

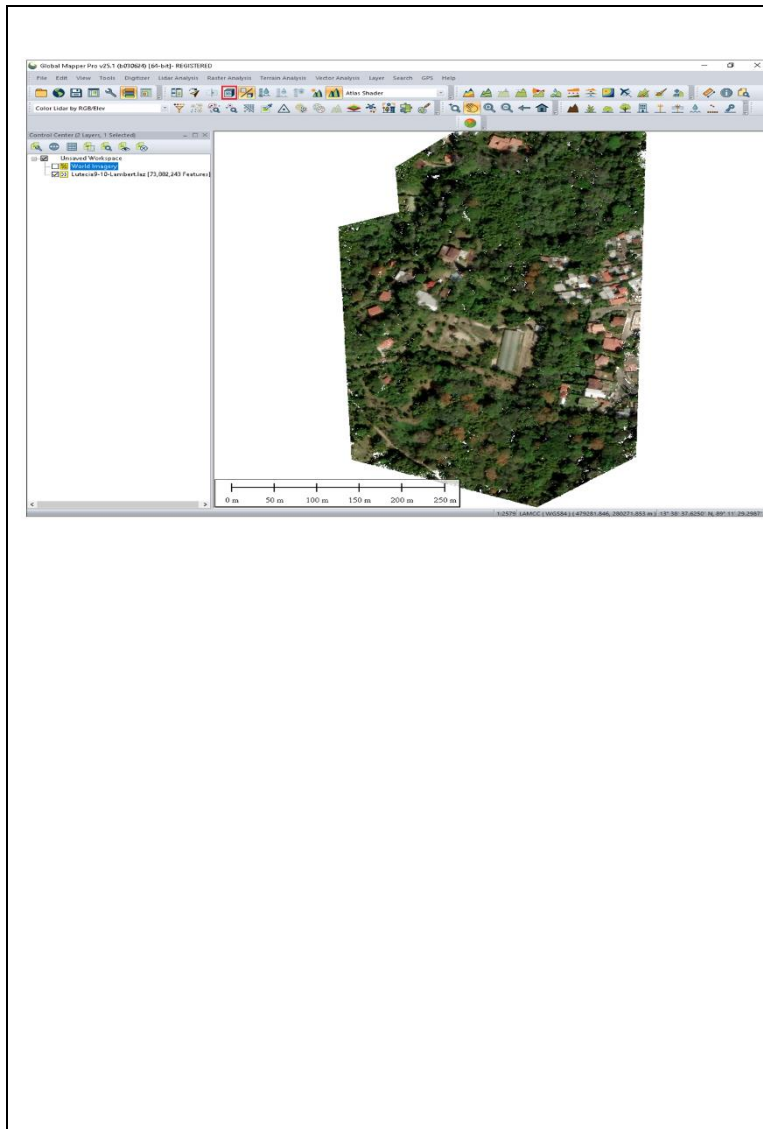
Adicionalmente, podemos comprobar que esté bien georreferenciado.

Se selecciona el ícono **“Apply color to LIDAR Points”** para asignar los colores a la nube de puntos.

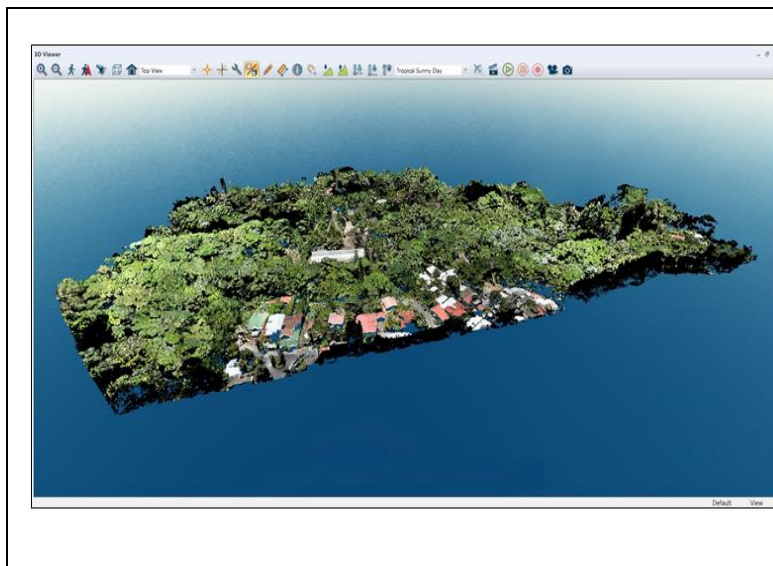


Vemos que en la ventana **“Apply color / Intensity to Lidar Points”**, dice que se aplique los colores RGB de la imagen satelital para los puntos del archivo **“Lutecia9-10 Lambert.Laz”**, se deja los demás parámetros por defecto y consecutivamente clic en **“OK”**.

	<p>Procede a cargar la aplicación de colores. Este proceso tardó alrededor de 30 s a 1 min, dependiendo de las propiedades de la computadora que se esté utilizando.</p>
	<p>En esta última ventana se notifica del total de puntos tratados, clic en “Aceptar”.</p>

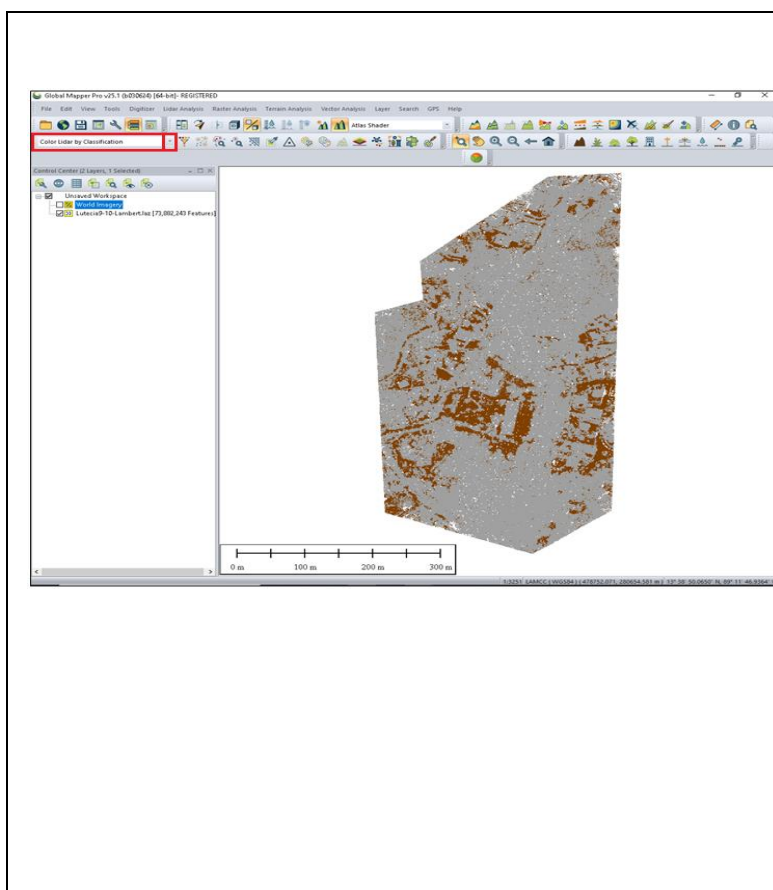


En el área de visualizaciones se puede observar que la nube de puntos tiene una mejor representación, tanto como la visualización en 2 dimensiones y en 3 dimensiones, para eso se selecciona la herramienta se selecciona el ícono **“Show 3D View”**.

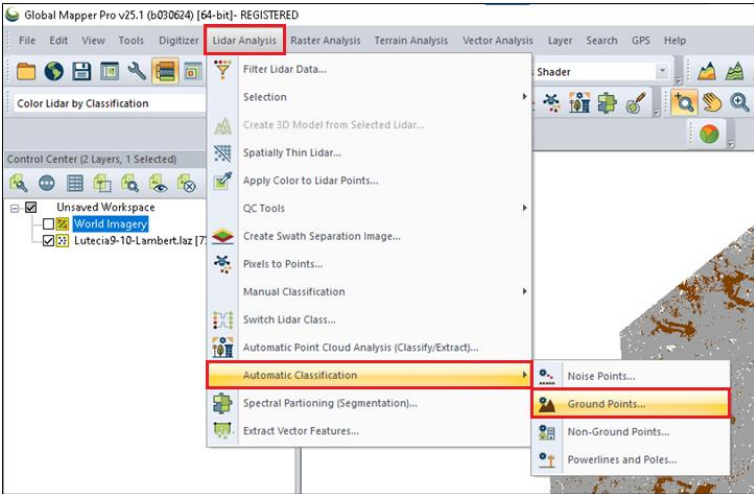


Una vez se selecciona **Show 3D View**, se habilita una nueva ventana con la nube de puntos, pero con una perspectiva en 3 dimensiones.

8.2.6. Clasificación automática de la nube puntos.



En la barra de Herramientas en las opciones de LIDAR, se selecciona la opción **“LIDAR Draw mode”**, la vista **“Color by Classification”**. La visualización cambia y se observa que los puntos en gris están sin clasificación, por lo

	<p>que, se empieza el proceso de clasificación de la nube de puntos.</p>
	<p>En la barra de menú se selecciona las funciones de “LIDAR Analysis”, consecutivamente “Automatic Classification” y finalmente “Ground Points”. Esto con el fin de dar una clasificación automática detallada y clasificar todos esos puntos que aún no están clasificados.</p>

Automatic Point Cloud Analysis

Features to Classify

- Ground
 - Method: Grid MCC
 - Bin Size: 3 meters
 - Max Deviation (m): 11
 - Max Height Delta (m): 50
 - Max Terrain Slope (degrees): 5
 - Max Building Width (m): 100
 - Max Curvature: 1
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start
- Building
 - Method: Max Likelihood
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start
- Power Line
 - Max Distance to Best Fit Line (m): 0.2
 - Bin Size for Linear Points Check (m): 1.5
 - Max Slope: 0.55
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start
- Vegetation
 - Method: Max Likelihood
 - Classify Individual Trees by Height
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start
- Pole
 - Method: Max Likelihood
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start
- Noise
 - Method: Grid
 - Min Standard Deviations: 3
 - Local Area Base Bin Size: 128 meters
 - Mark Noise Outside Elevation Range
 - Min Elevation: 0 meters
 - Max Elevation: 0 meters
 - Mark Noise Outside Height Above Ground Range
 - Min Height Above Ground: -2 meters
 - Max Height Above Ground: 200 meters
 - Mark Noise Points as Withheld/Deleted
 - Identify Likely Noise Points from Points That are Already Classified
 - Reset Existing Points to Unclassified at Start

Advanced Options

Geometric Segmentation

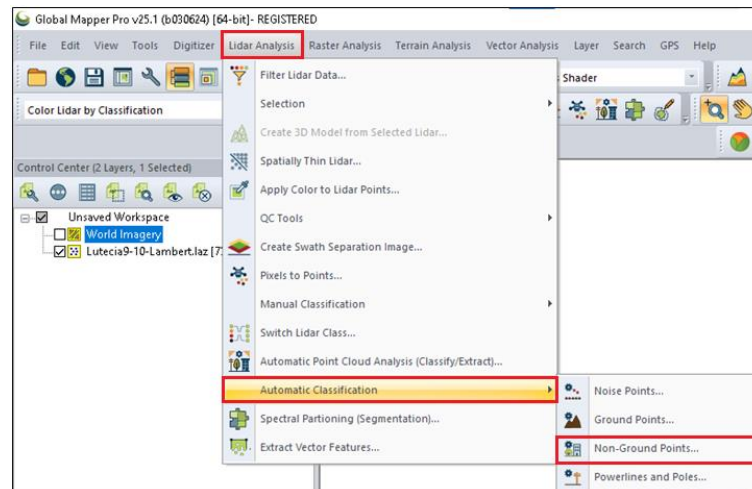
Max Building Width (m)
Specify the maximum expected building width in meters. Larger values are slightly slower

1:6585 | LAMCC (WGS84) (479267.914, 280616.495 m) | 13° 38' 48.8393" N, 89° 11' 29.7714" W

Se habilita en una ventana de cada uno de los parámetros que se requiere clasificar como se muestran en la imagen. Una vez confirmamos que los parámetros estén adecuadamente a lo reconocido en campo se procede a realizar la clasificación automática dándole clic en **“Classify Features”**.

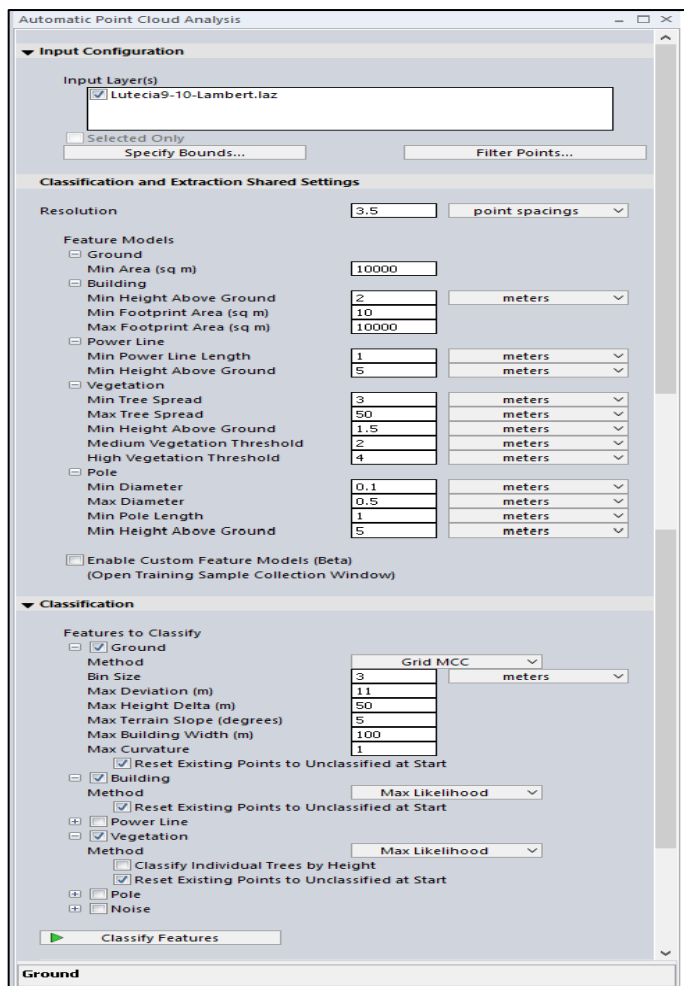
Nota: Esto puede variar dependiendo de las condiciones vegetativas,

topográficas o la ubicación geográfica, pudiendo dejar los parámetros por defecto.

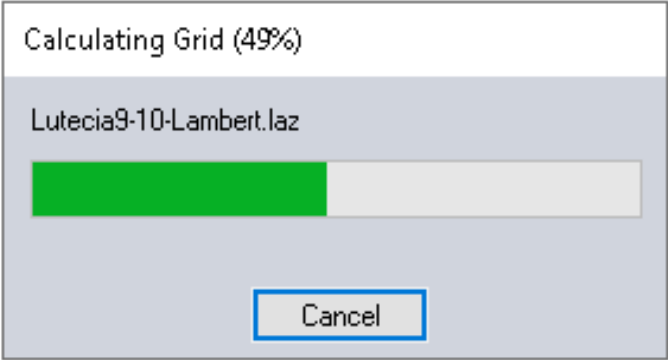


En la barra de menú seleccionamos las funciones de **“LIDAR Analysis”**, consecutivamente **“Automatic Classification”** y finalmente **“Num-Ground Points...”**. Esto con el fin de dar una clasificación más detallada y clasificar todos esos puntos que aún no están clasificados a pesar de

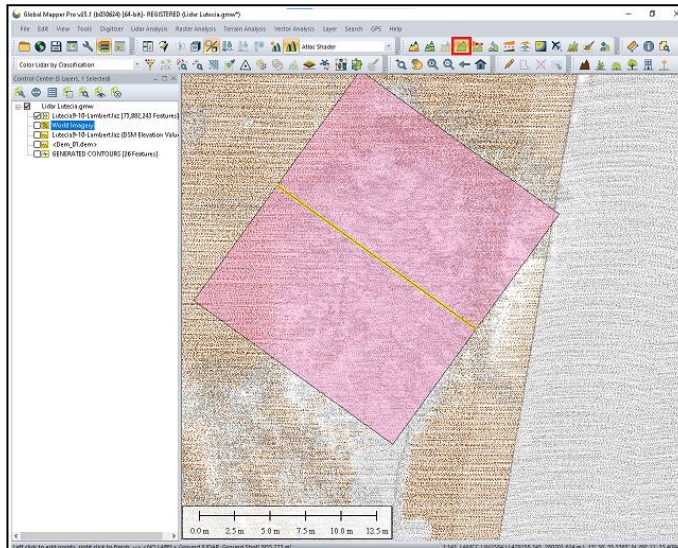
haber realizado una clasificación automática de suelo en el paso anterior.



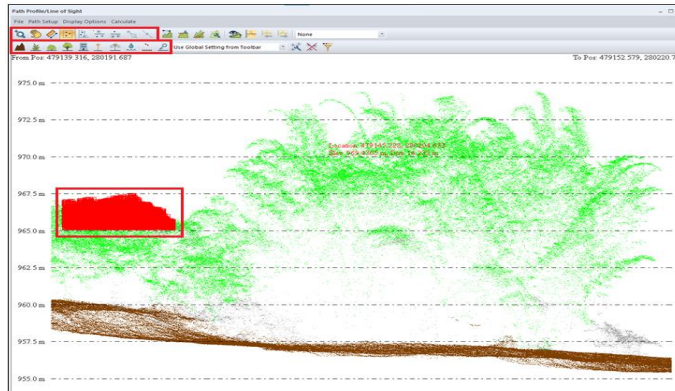
Se habilita cada uno de los parámetros que se requiere dar una segunda auto clasificación como se muestran en la imagen. Una vez confirmamos que los parámetros estén correctos, se procede a realizar la clasificación automática dándole clic en “**Classify Features**”.

	<p>Nota: Esto puede variar dependiendo de las condiciones vegetativas, topográficas o la ubicación geográfica, pudiendo dejar los parámetros por defecto.</p>
	<p>El proceso de clasificación automática puede tardar alrededor de una hora. Esto depende mucho de las especificaciones de la computadora con la que se esté procesando.</p>

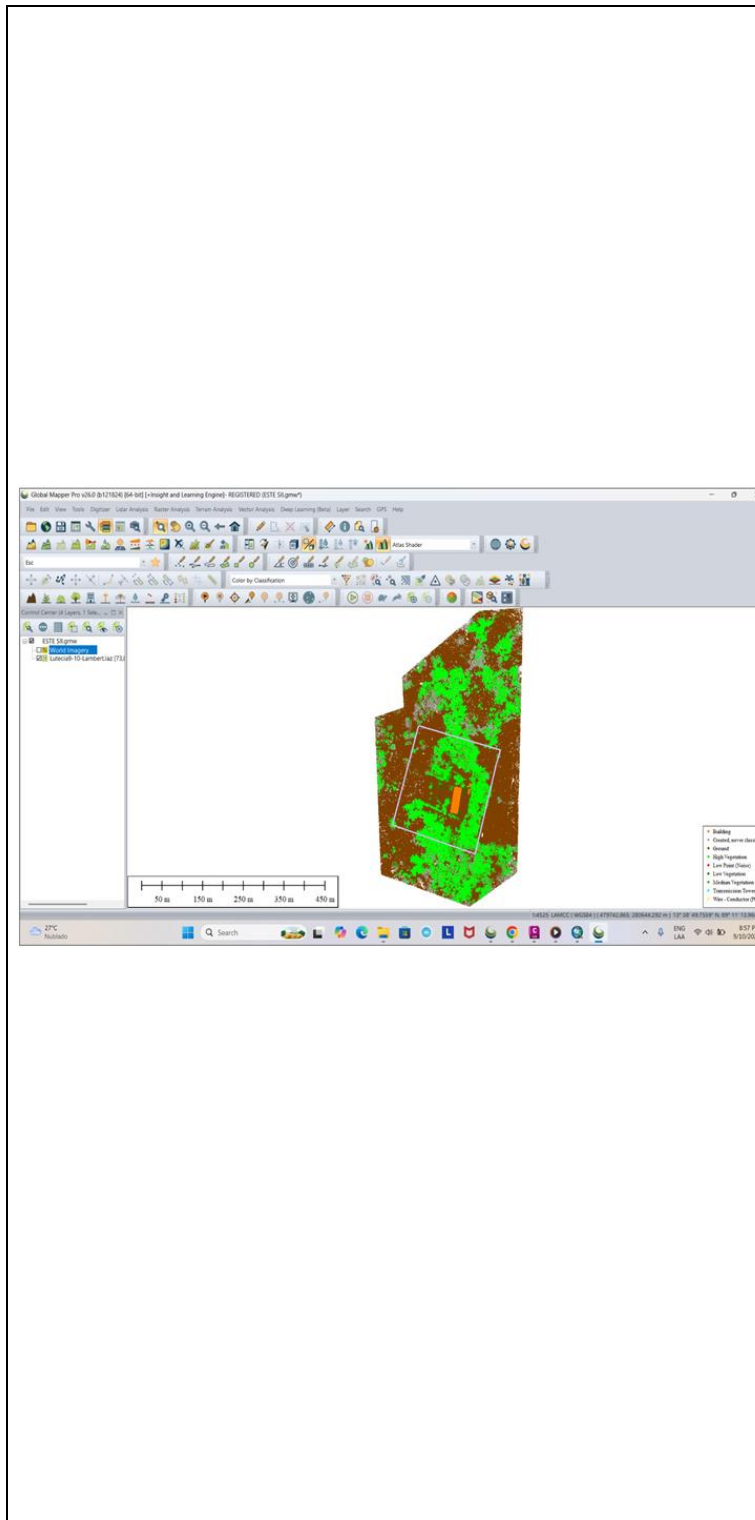
8.2.7. Clasificación manual de la nube puntos.



Al terminar el proceso de auto clasificación de los puntos puede notarse que, aunque es menos, como al inicio, aún quedan puntos sin clasificar. En este caso se puede continuar clasificando manualmente dando clic en la herramienta **“Path Profile”**. Damos clic en los puntos sin clasificar que aún estén de color gris y se generará un perfil.



Se habilita una nueva ventana con el perfil seleccionado y haciendo uso de las funciones de la barra de herramientas. Para clasificar manualmente los puntos dependiendo si es suelo, vegetación o algún tipo de estructura, etc. Con las herramientas de clasificación manual.



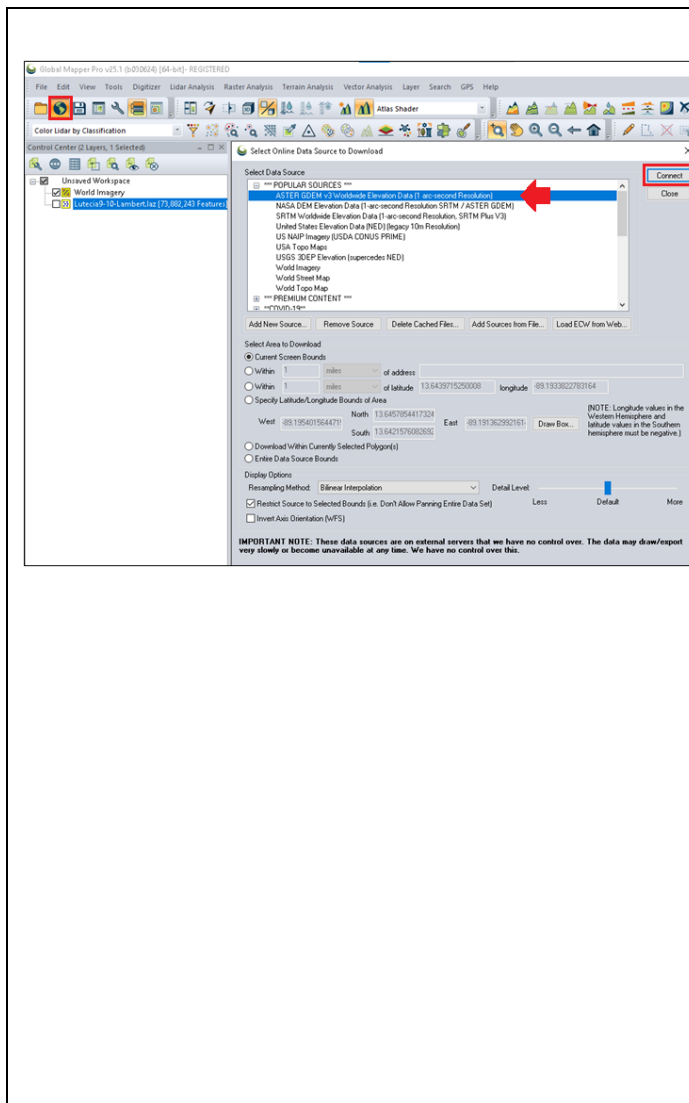
Una vez terminado el proceso de clasificación de puntos, la nube de puntos mostrará un cuadro de leyenda de las diferentes clasificaciones que se tienen.

El proceso automático se tarda alrededor de 45 min y el manual alrededor de 4 horas. En este proyecto depende de las capacidades y práctica del operador y de las especificaciones del ordenador utilizado. Entre mejor capacidad

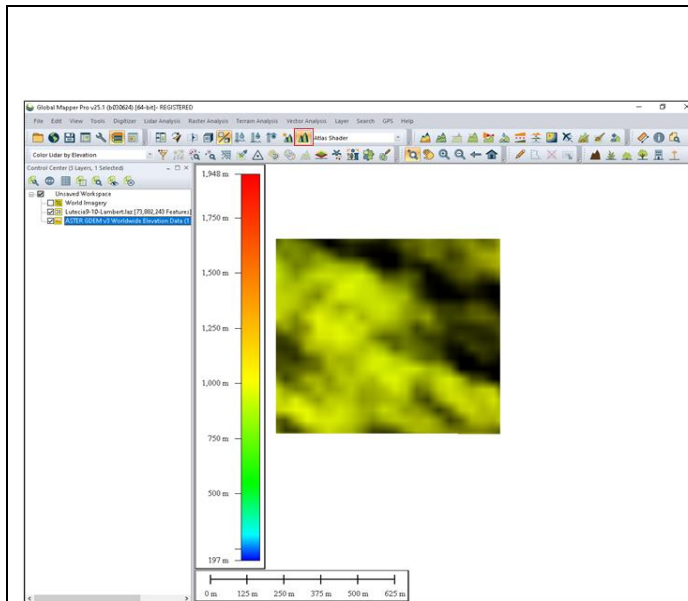


esta tenga más rápido
será el proceso.

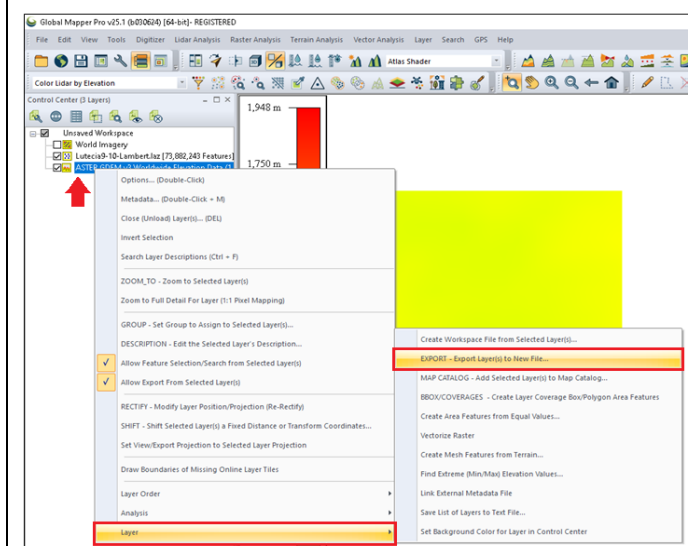
8.2.8. Modelo Digital de Superficie (MDE)



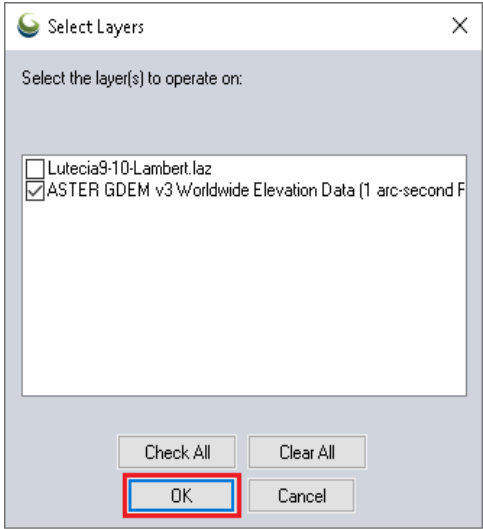
Para generar el modelo digital de superficie primero se dará clic en **“Connect to Online Data”** para poder conectarnos al servidor. En esta ocasión nos dirigimos a las funciones de **“Popular Sources”**, **“Aster GDEM...”** y **“Connect”**. Este archivo nos servirá para generar el MDS.

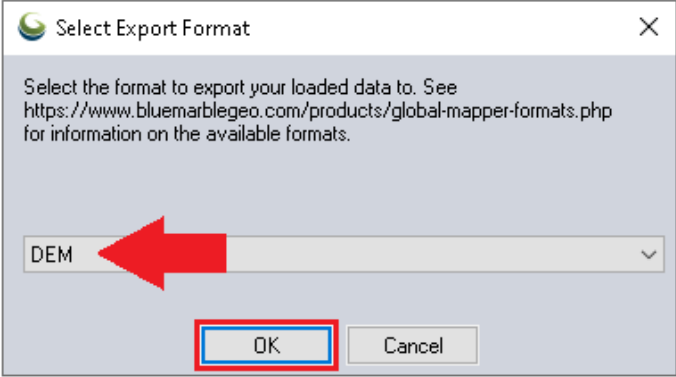
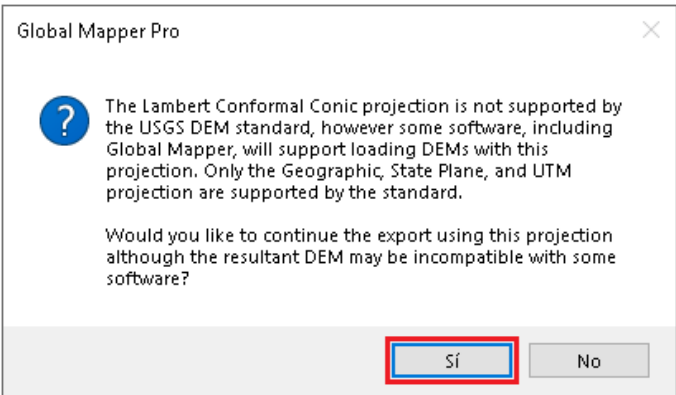


Ya creado el archivo ASTER GDEM, se procede a apagar las sombras en el ícono de “**Hill Shading**”. Esto nos servirá para poder generar el modelo digital de elevación y que este adopte las elevaciones que se encuentran en nuestra nube de punto.

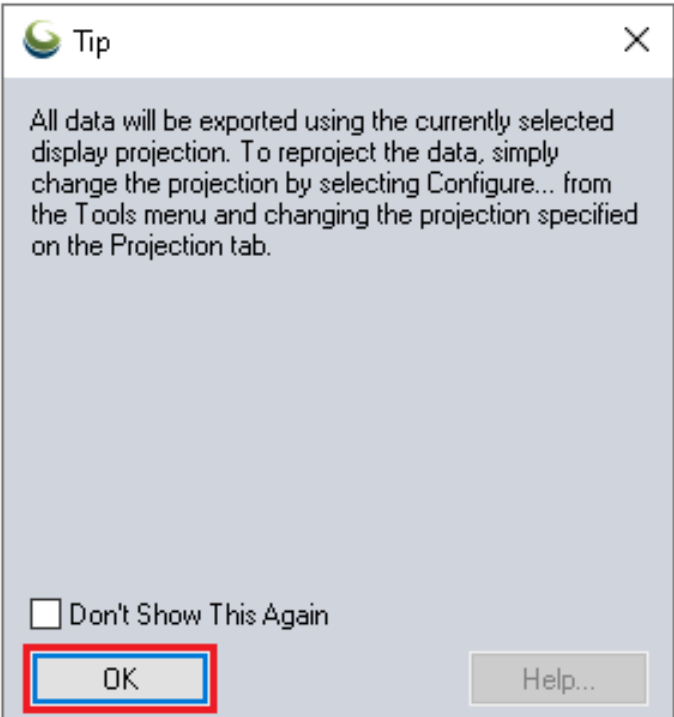


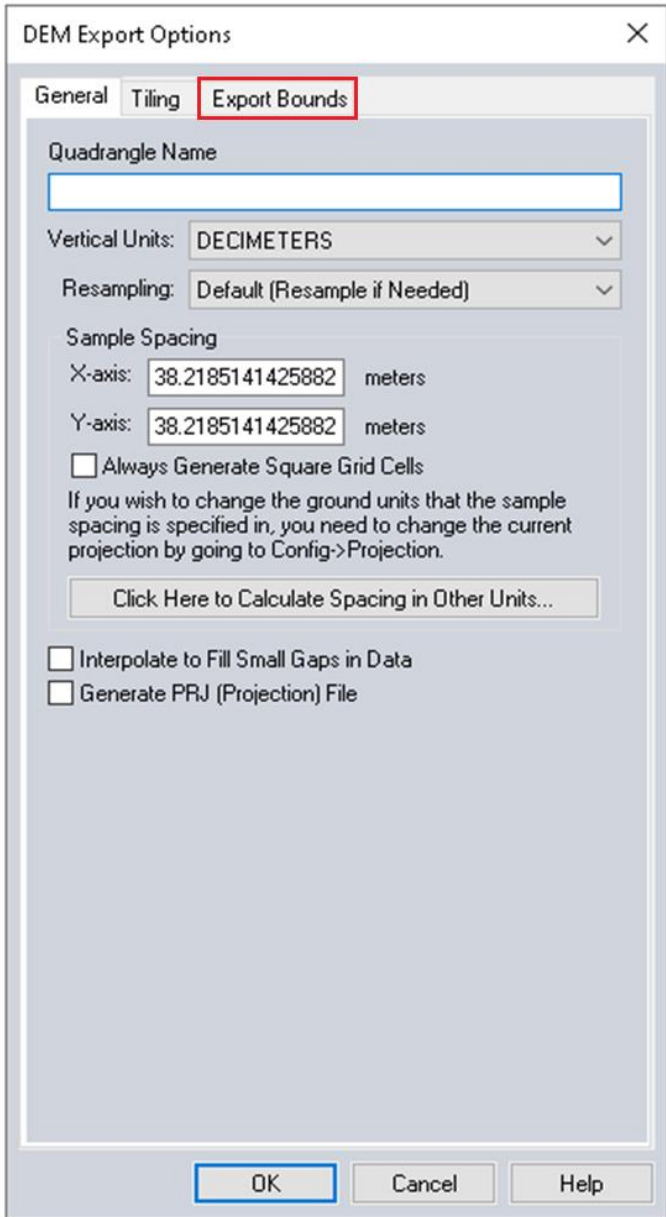
En el centro de control damos clic derecho en el archivo “**Aster GDEM**” generado y se habilita una serie de operaciones para el cual en este caso se

	<p>seleccionará la opción “Layer” y “Export-Export Layer(s) to new file...”. Esto con la finalidad de exportar las capas a un nuevo archivo.</p>
	<p>A continuación, se presenta una ventana emergente del archivo seleccionado, al cual al darle clic derecho al archivo por defecto lo marca como seleccionado. Se le transmite al programa que se está de acuerdo en el archivo:</p> <p>El archivo Aster GDEM..., se dará clic en “OK” afirmando que está correcto.</p>

	<p>En esta ventana pide que se seleccione el formato en el que se desea guardar el nuevo archivo, entre las diferentes variedades que encontraremos se seleccionara la extensión “DEM”.</p>
	<p>En la tercera ventana arroja un mensaje:</p> <p>"La proyección cónica conforme de Lambert no es compatible con el estándar DEM de USGS, sin embargo, algunos programas, incluyendo Global Mapper admiten cargar DEMs con esta proyección. Solo se</p>

	<p>admiten las proyecciones geográficas, estatales y UTM. ¿Desea continuar con la exportación usando esta proyección, aunque el DEM resultante podría ser incompatible con algunos programas?"</p> <p>Ante la advertencia sobre el sistema de proyección cartográfica se colocará que "SI".</p>
--	--

	<p>Una nueva ventana emergente dice que "Todos los datos que se exportarán usando la proyección de visualización seleccionada actualmente. Para volver a proyectar los datos simplemente cambia la proyección seleccionando Configurar... en el menú Herramientas y cambiando las especificaciones de proyección en la pestaña Proyección"</p> <p>Ante la indicación, se dará por enterado dando clic en el botón "OK".</p>
--	--

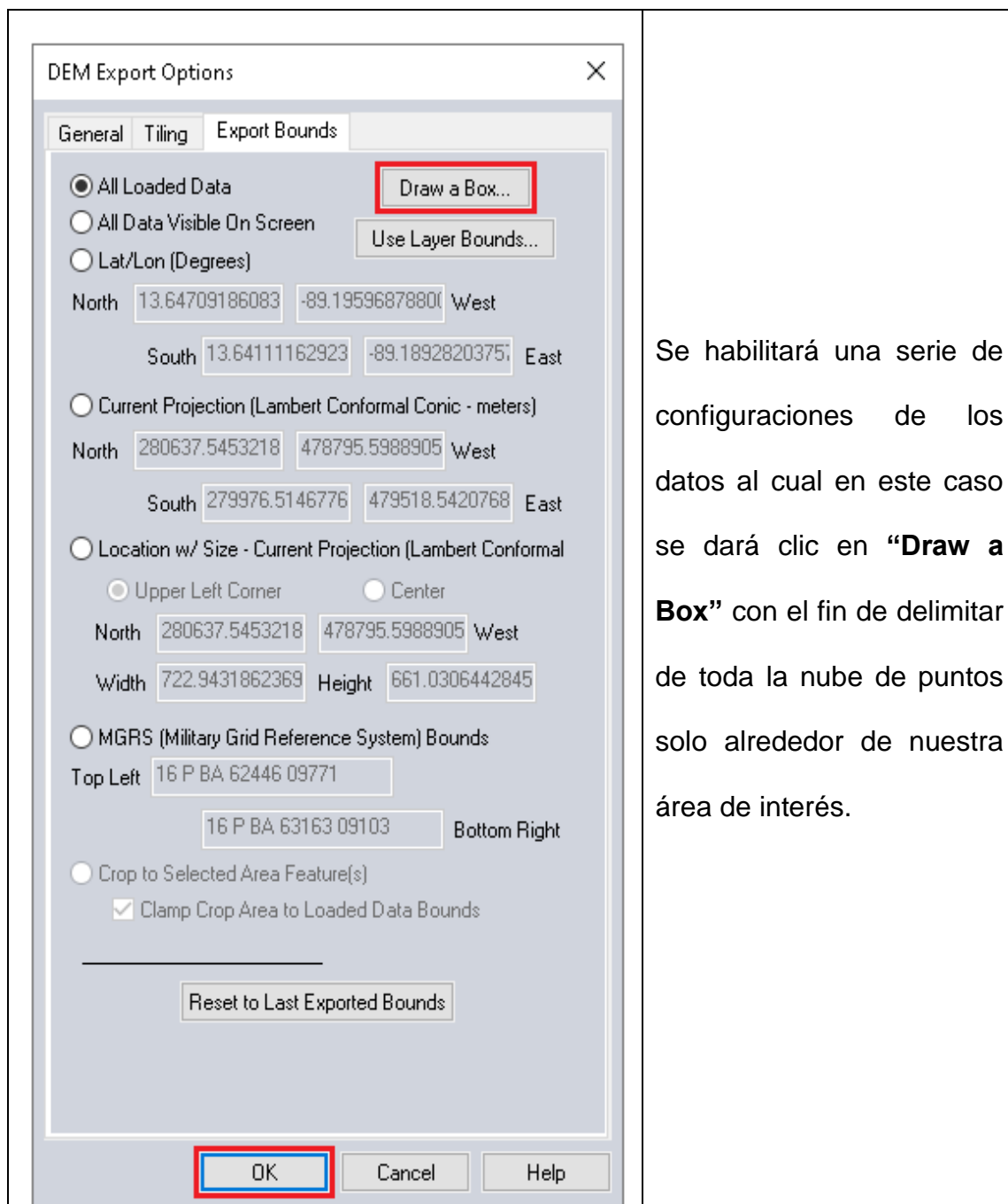


The image shows a screenshot of the "DEM Export Options" dialog box. The "Export Bounds" tab is selected and highlighted with a red border. The dialog contains the following fields and options:

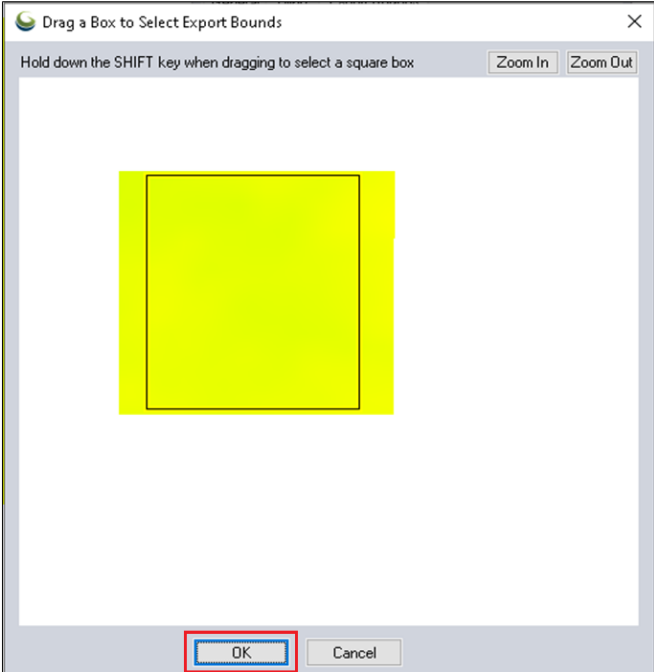
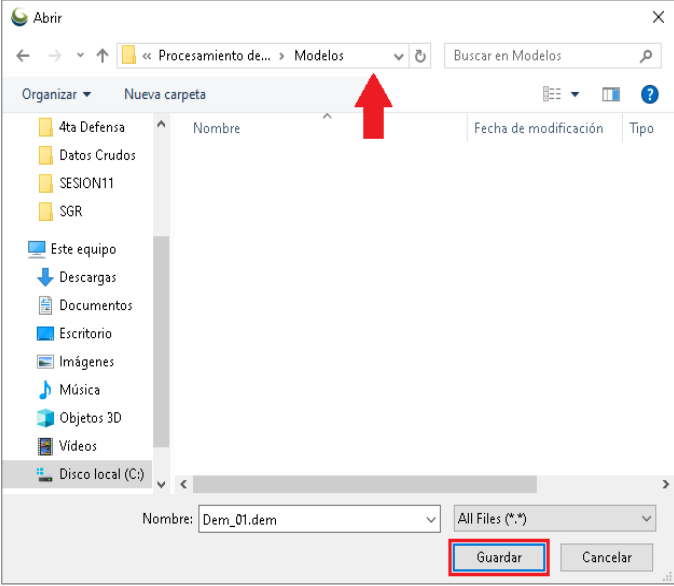
- Quadrangle Name:** An empty text input field.
- Vertical Units:** A dropdown menu set to "DECIMETERS".
- Resampling:** A dropdown menu set to "Default (Resample if Needed)".
- Sample Spacing:**
 - X-axis: 38.2185141425882 meters
 - Y-axis: 38.2185141425882 meters
- Always Generate Square Grid Cells
- If you wish to change the ground units that the sample spacing is specified in, you need to change the current projection by going to Config->Projection.
- [Click Here to Calculate Spacing in Other Units...](#)
- Interpolate to Fill Small Gaps in Data
- Generate PRJ (Projection) File

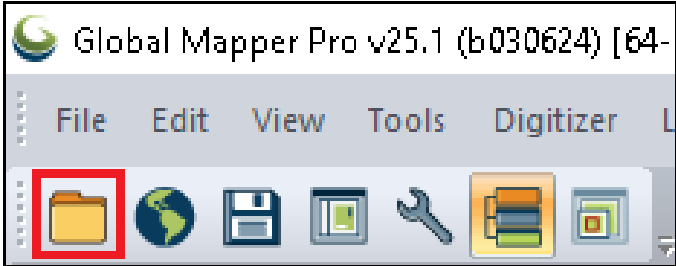
At the bottom of the dialog are three buttons: "OK", "Cancel", and "Help".

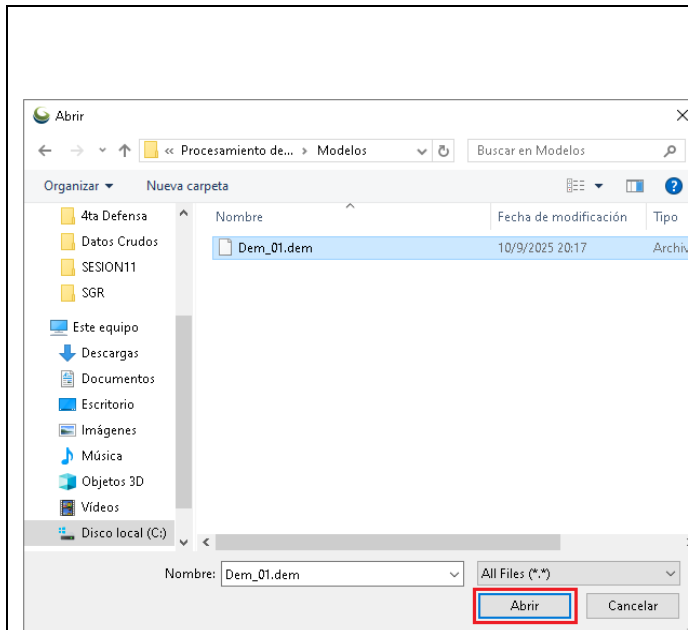
Una vez se acepte todas las ventanas emergentes saldrá los parámetros requeridos para la exportación. En la primera ventana se seleccionará dando clic en el apartado **“Export Bounds”**.



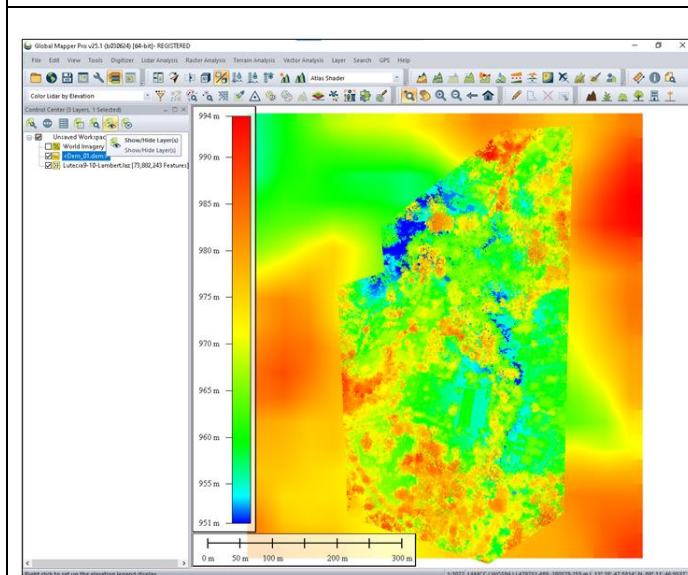
Se habilitará una serie de configuraciones de los datos al cual en este caso se dará clic en “**Draw a Box**” con el fin de delimitar de toda la nube de puntos solo alrededor de nuestra área de interés.

	<p>En este paso se habilitará una ventana donde se colocará el área deseada o nuestra área de interés, una vez seleccionada, se procede a dar clic en “OK”.</p>
	<p>En esta ventana se buscará la dirección donde se guardará el archivo DEM. En este caso se creará una nueva carpeta dentro de la cual lleva el nombre procesamiento de datos LIDAR Finca Lutecia, con el</p>

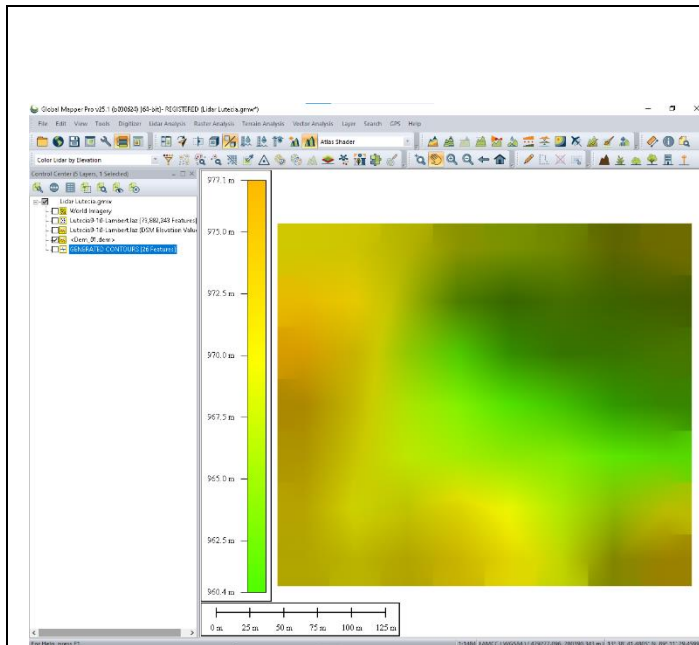
	<p>nombre de “Modelos”, en el disco local “C”.</p> <p>Una vez creada la carpeta se nombrará el archivo, en este caso el archivo DEM se guardó como: “Dem_01”, y para concretar se da clic en “Guardar”.</p>
	<p>El ícono “Open Data File” en la misma dirección donde se guardó. Se abrirá el archivo recién guardado.</p>



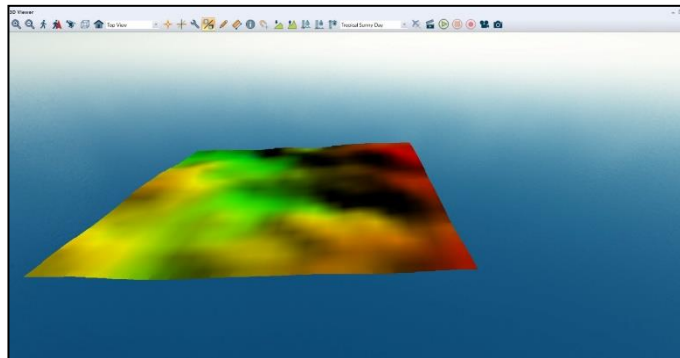
En el disco local “C”, en la carpeta “**Procesamiento de Datos LIDAR Finca Lutecia**” y por último en la carpeta que se nombró “**Modelos**” se abrirá el archivo que se nombró “**Dem_01**”. Una vez se selecciona se procede a dar clic en “**Abrir**”.



En esta presentación se puede apreciar el archivo DEM con la nube de puntos superpuestas. Se puede comparar en vista de elevación los colores solo del suelo a la nube de puntos que tiene las elevaciones de los árboles y estructuras.

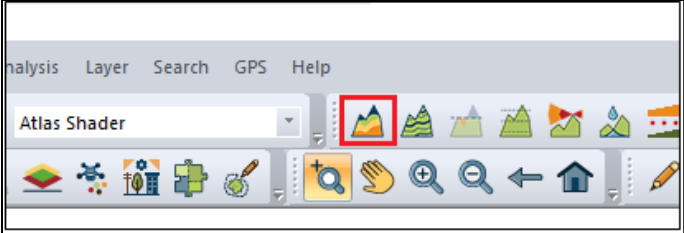
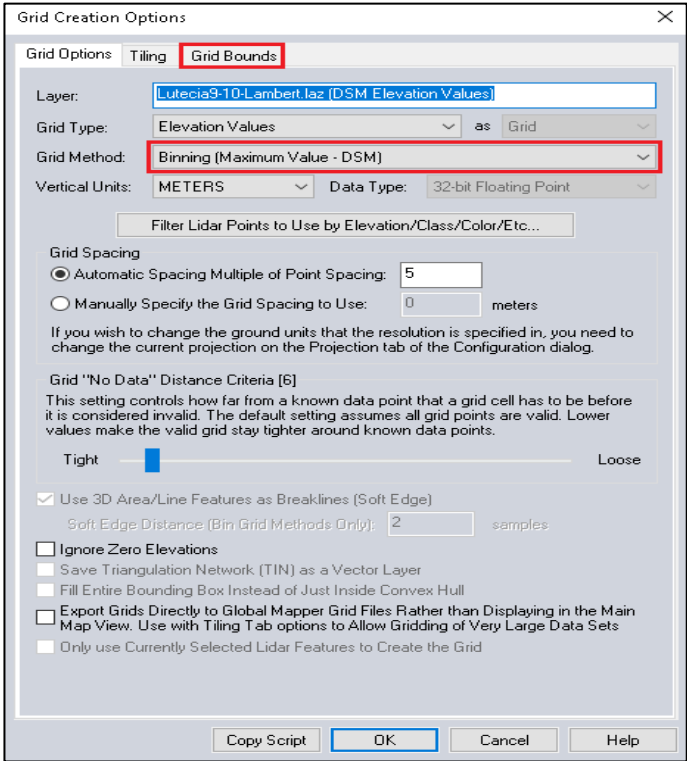


Finalmente, se obtiene el “MDE” de la zona de interés (El área del invernadero de la Finca Lutecia). Vista en 2D



Una vez se selecciona la herramienta “**Show 3D View**”, se habilita una nueva ventana con el “MDE”, vista en 3D.

8.2.9. Modelo Digital de Elevación (MDS)

	<p>Clic en “Create Elevation Grid”. Esto permitirá generar el modelo Digital de superficie.</p>
	<p>Se habilita una ventana de parámetros y funciones requeridas para la Grid donde se seleccionará en “Grid method”, posteriormente “Binning (Maximum Value - DSM)”, se Cambiará a las funciones de “Grid</p>

Bounds” y al finalizar daremos clic en **“OK”**.

Grid Creation Options

Grid Options Tiling Grid Bounds

All Loaded Data **Draw a Box...**
 All Data Visible On Screen Use Layer Bounds...
 Lat/Lon (Degrees)

North 13.64715581407 -89.1943205896 West
South 13.64103610250 -89.1909600527 East

Current Projection (Lambert Conformal Conic - meters)
North 280644.7643382 478973.9291664 West
South 279968.0143382 479336.9801664 East

Location w/ Size - Current Projection (Lambert Conformal)
 Upper Left Corner Center
North 280644.7643382 478973.9291664 West
Width 363.050999999 Height 676.75

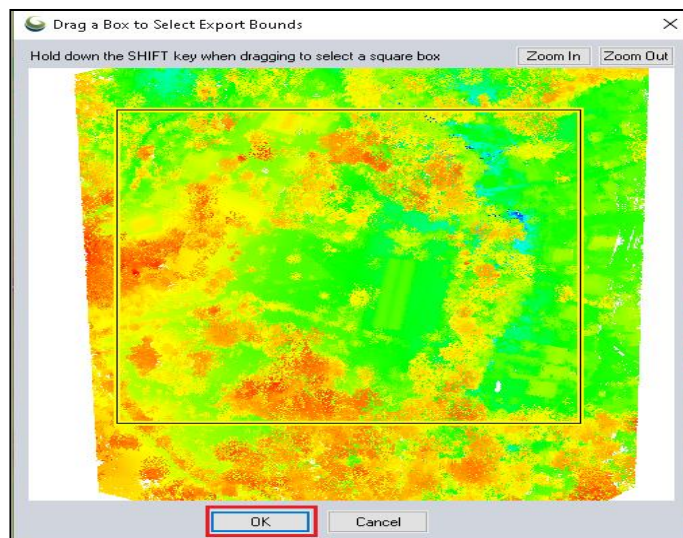
MGRS (Military Grid Reference System) Bounds
Top Left 16 P BA 62624 09776
Bottom Right 16 P BA 62982 09096

Crop to Selected Area Feature(s)
 Clamp Crop Area to Loaded Data Bounds

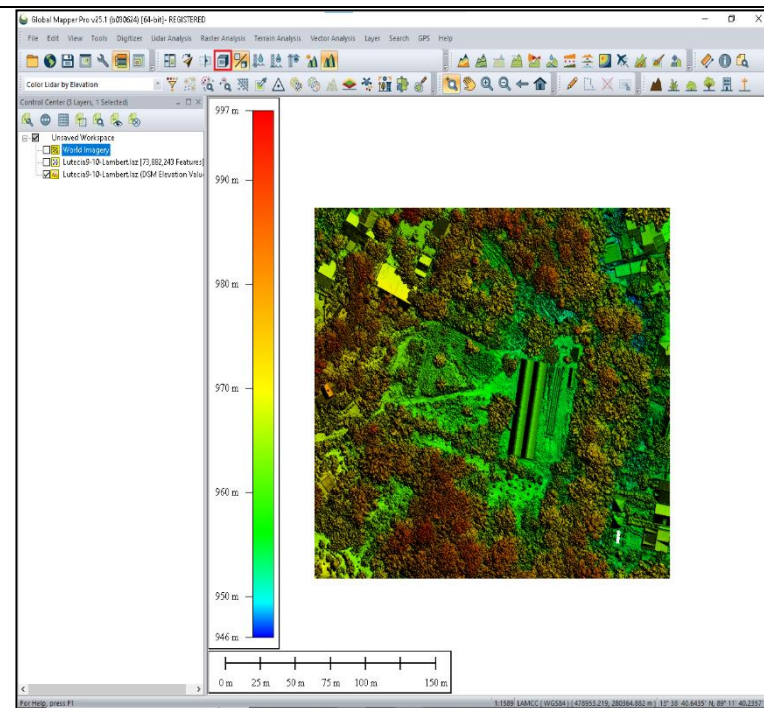
Reset to Last Exported Bounds

Copy Script **OK** Cancel Help

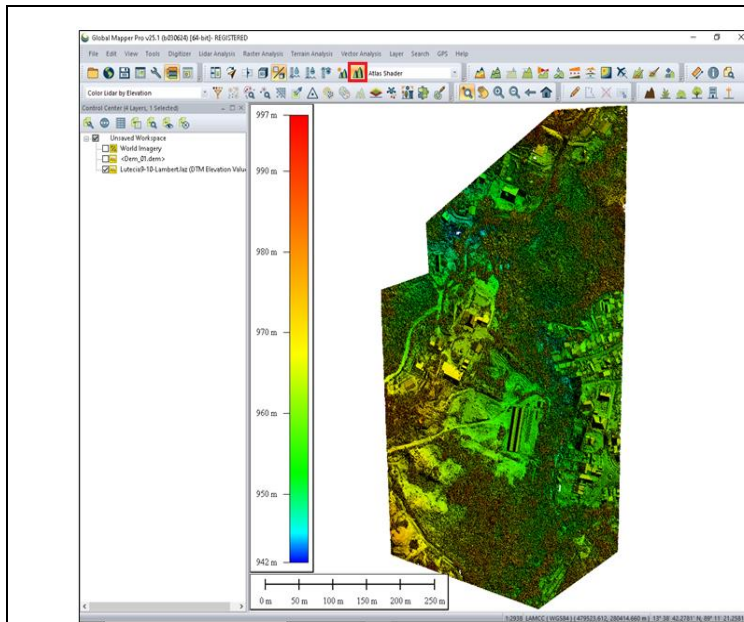
En las funciones de **“Grid Bounds”**, se dará clic en **“Draw a Box”**, para seleccionar el área de interés.



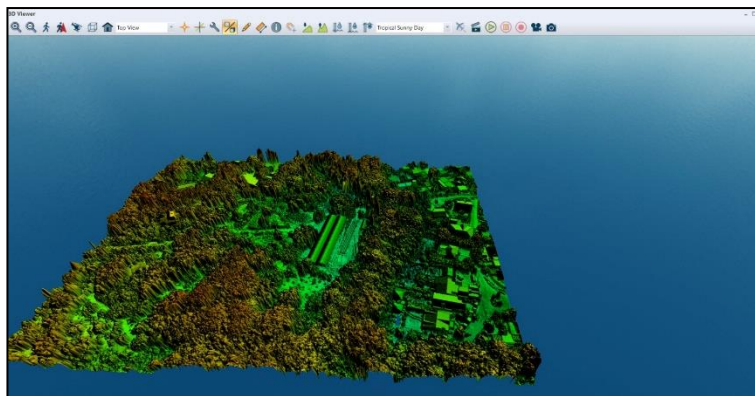
Se habilita una nueva ventana donde aparece la nube de puntos en una vista de elevación para seleccionar el área de interés. Una vez se tenga marcada se dará clic en “OK”.



En la ventana de vistas se podrá apreciar el Modelo Digital de Superficie (MDS). Vista en 2D. Alrededor del área de interés.

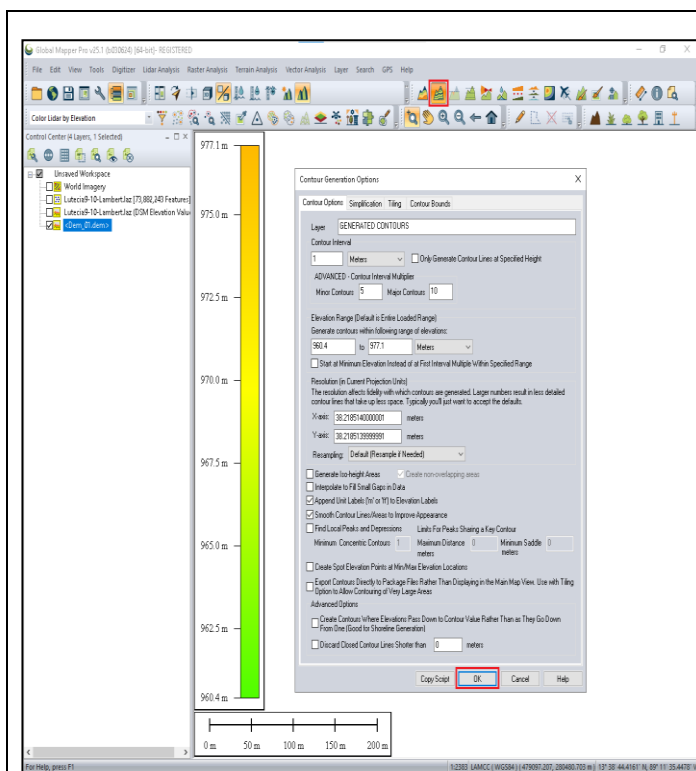


Finalmente, se podrá apreciar el Modelo Digital de Superficie (MDS). Vista en 2D. También para toda la nube de puntos.



Una vez se selecciona la herramienta “**Show 3D View**”, se habilita una nueva ventana con el “**MDS**”. Vista en 3D.

8.2.10. Curvas de nivel.



Para generar las curvas de nivel se ubicará en la ventana de control únicamente en la vista del modelo digital de elevación (**Dem_01**) para generar las curvas de nivel solamente de la forma del suelo. Para esto se da clic en la herramienta **“Create Contours”** y se habilitará un cuadro para verificar y modificar los parámetros de los contornos o curvas de nivel. En este caso en el intervalo de curvas o contorno cambiaremos a 1 m y daremos clic en **“OK”**.

- **Procesamiento de la nube de puntos:** Utilizan el software Global Mapper especializado para procesar estos puntos y crear modelos digitales.

Creación de productos finales

- **Modelos Digitales de Terreno (MDE):** Representando la superficie del terreno, excluyendo el efecto de la vegetación y estructuras, dejando visible solo el suelo por la penetración de los pulsos láser con una precisión y calidad muy satisfactoria.
- **Modelos Digitales de Superficie (MDS):** Representan la superficie del terreno tal como se ve desde una vista en planta, incluyendo objetos como árboles, edificios y otras estructuras, con una excelente precisión, calidad y realismo de la zona.
- **Curvas de nivel:** Una generación de curvas de nivel bastante aceptables según el terreno de la zona a partir del modelo digital de elevación.

CAPÍTULO IX: ANÁLISIS COMPARATIVO DE MODELOS DIGITALES DE TERRENO

9.1. Comparación de levantamiento fotogramétrico vs LIDAR

Tabla N° 3. Comparación de levantamiento fotogramétrico vs LIDAR

Fuente: Propia

Comparación de levantamiento fotogramétrico vs LIDAR

Ítems	Con dron Fotogramétrico	Con dron LIDAR
software	<ul style="list-style-type: none"> • Pix4D Mapper 	<ul style="list-style-type: none"> • Global Mapper • Pix4D Capture
Configuración del control de mando	<ul style="list-style-type: none"> • Pix4D Capture 	<ul style="list-style-type: none"> o • Pilot 2
Preparación y configuración del equipo	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del equipo. • Conexión con los dispositivos y calibración. • Planificación del vuelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Inspección del equipo. • Instalación del Sensor. • Conexión con los dispositivos y calibración.

	<ul style="list-style-type: none"> • Verifica el entorno. • Lanzamiento y vuelo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Planificación del vuelo. • Verifica el entorno. • Lanzamiento y vuelo.
Recolección de información durante el vuelo	<ul style="list-style-type: none"> • Captura de imágenes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Emisión de pulsos láser.
Finalización y obtención de la toma de información	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento. • Carga de fotografías. 	<ul style="list-style-type: none"> • Mantenimiento.
Proceso de datos	<ul style="list-style-type: none"> • Importación de la información. • Definir el sistema geodésico. • Georreferenciar con los puntos de control. 	<ul style="list-style-type: none"> • Importación de la información. • Definir el sistema geodésico. • Obtención de la nube de puntos.

Ventajas

- Obtención de la nube de puntos.
- Creación de puntos de paso.
- Determinar puntos de apoyo.
- Ortomosaico.
- Modelo Digital de Superficie (MDS).
- Modelo Digital de Elevación (MDT).
- Curvas de nivel.
- Económico.
- Generación de Modelos.
- Buena Precisión.
- Seguridad.
- Clasificación de puntos.
- Modelo Digital de Superficie (MDS).
- Modelo Digital de Elevación (MDT).
- Curvas de nivel.
- Alta precisión.
- Penetración de la vegetación.
- No requiere iluminación.

	<ul style="list-style-type: none"> • Generación de Modelos. • Privacidad. • Seguridad.
Desventajas	<ul style="list-style-type: none"> • Dependencia de las condiciones de luz y clima. • Dificultad con vegetación densa. • Requisito de puntos de control.
	<ul style="list-style-type: none"> • Costo. • Mantenimiento y reparaciones. • Conocimiento y comercialización.

9.2. Comparativo De Modelos Digitales De Terreno.

Tabla N° 4. Comparativo de modelos digitales de terreno.

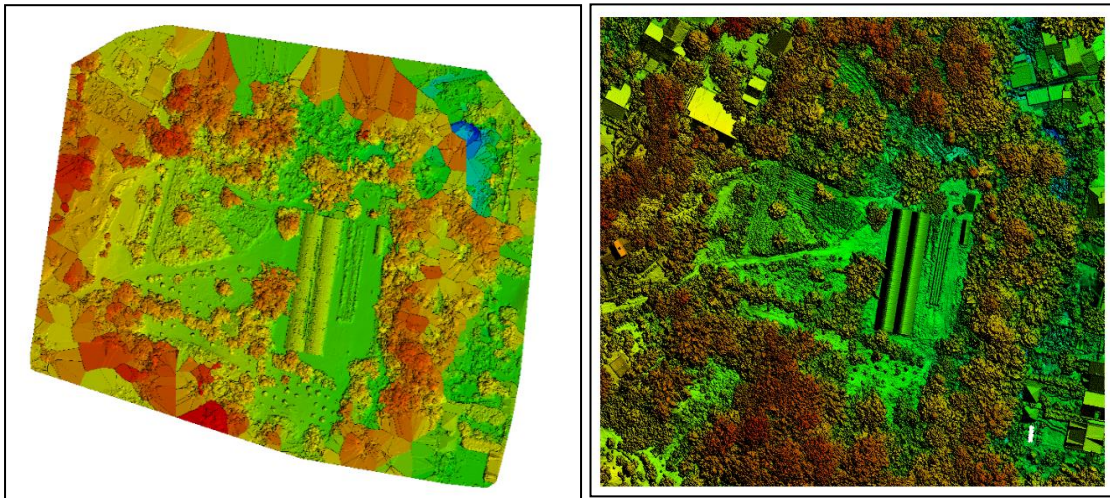
Fuente: Propia

Tabla # 4 Comparativo De Modelos Digitales De Terreno.

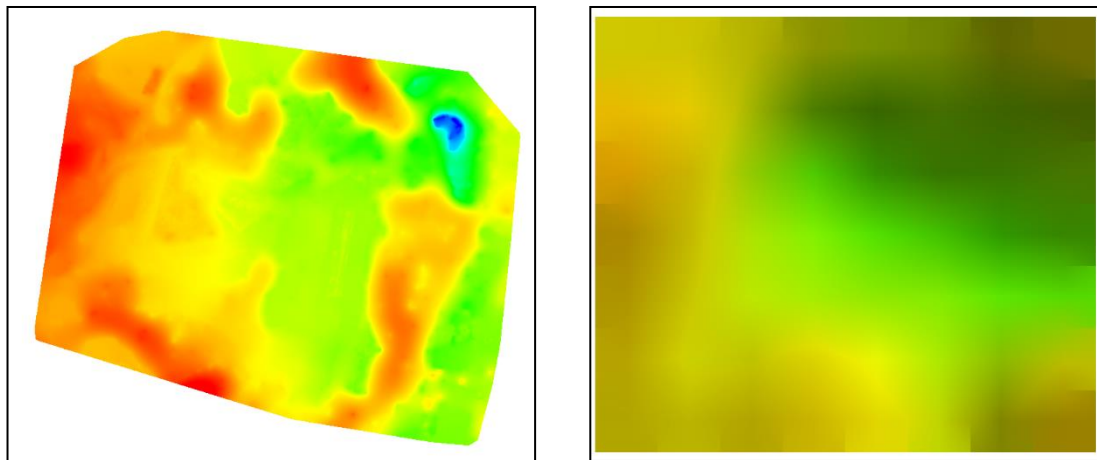
Fotogrametría

Sistema Lidar

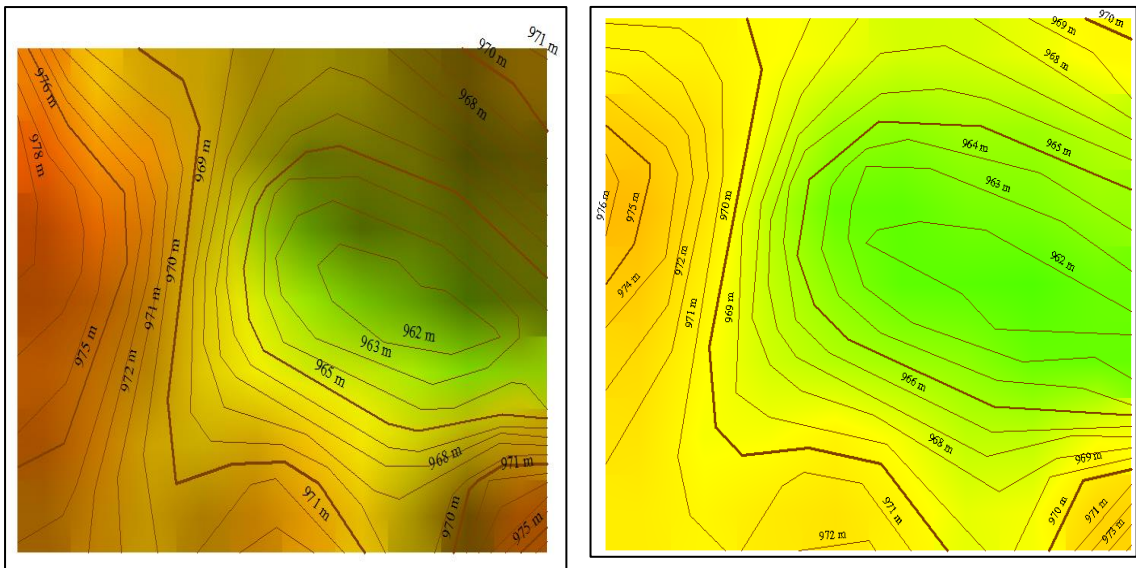
Modelos Digitales de Superficie.



Modelos Digitales de Elevación.



Curvas de Nivel



En resumen, se puede comparar que tanto en fotogrametría como en el sistema Lidar utilizando los softwares Pix4d Mapper y Global Mapper respectivamente se puede generar modelos digitales de terreno y curvas de nivel de alta calidad y precisión. Podemos apreciar que los resultados son muy semejantes a pesar de provenir de métodos, equipo y procesos diferentes. Si nos enfocamos en los detalles más específicos cabe recalcar que el MDS en el sistema Lidar puede verse mucho más realista con detalles más específicos y la clasificación de los puntos muy diferente que en fotogrametría. El MDE en fotogrametría puede tener una mejor apreciación de la forma de la tierra según la leyenda de colores según su elevación que en el sistema Lidar y, por último, las curvas de nivel tienen sus diferencias, pero son mínimas, en general apreciar que a pesar de la falta de práctica en este tipo de procesamiento los resultados son muy satisfactorios.

CAPÍTULO X CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó dos procesos de levantamientos modernos para la obtención de modelos digitales de terreno y poder realizar una comparación entre ambos, el primer levantamiento se utilizó el método de fotogrametría con dron y procesado principalmente con el software PIX4D MAPPER y el segundo para un levantamiento con sistema LIDAR y dron, procesado con el software GLOBAL MAPPER ambos levantamientos georreferenciado con GNNS/RTK, asociado al sistema de referencia geodésico de El Salvador SIRGAR-ES2007 y analizando los resultados se obtienen las siguientes conclusiones:

- Ya que al transcurrir el tiempo la tecnología evoluciona, es importante que el conocimiento de levantamientos con dron se fomente más en El

Salvador ya que en otros países utilizan dron con sistema LIDAR sustituyendo en su totalidad el equipo y métodos tradicionales. En general podemos mencionar que utilizando estos métodos la obtención de la información es considerablemente mucho más rápida, reduce el personal de operadores de los equipos y lo más importante, la seguridad, ya que prescinde acceder a zonas de difícil acceso por tener topografía accidentada.

- Para procesar los datos obtenidos en campo existen una variedad de software que se puede auxiliar , para este caso como se mencionó con anterioridad se utilizó PIX4D MAPER y GLOBAL MAPPER, para fotogrametría y LIDAR respectivamente estos software poseen una amplia variedad de herramientas para procesar la información y obtener los resultados esperados que en este caso son la generación de modelos digitales de terreno (MDT), el proceso es relativamente practico en un ambiente informático muy amigable con el operador. En comparación el proceso de los datos generados por LIDAR fue más rápido, y practico, los resultados de ambos fueron muy similares, pero se puede apreciar una mejor calidad en los resultados con sistema LIDAR, esto debido a la penetración que tiene este sistema en la vegetación densa, ya que este tipo de vegetación representa una pequeña dificultada para el método de fotogrametría.

- Y, por último, pero no menos importante, en la evaluación del factor tiempo y costo, la calidad del LIDAR en general es mayor que los datos fotogramétricos, la obtención de los datos es más rápida y puede cubrir mucha más área el proceso es más práctico, pero en comparación del levantamiento con dron fotogramétrico, el LIDAR está triplicando el costo.
- En resumen, al comparar las dos técnicas de medición de levantamientos de terreno con dron, podemos concluir que al evaluándolo el grado de relevancia que tienen ambos métodos las dos herramientas son eficientes, importantes y los resultados obtenidos son muy satisfactorios. Es por ello que a manera de utilizar una o la otra técnica debemos de evaluar la magnitud, objetivo o la finalidad del proyecto para considerar ahorrar tiempo o costo para el procesamiento de los datos, ya que hacer este tipo de mediciones con levantamientos fotogramétricos, los resultados serán buenos pero con una deficiencia en la obtención de los mismos en factor tiempo; pero si lo que queremos es agilizar mayor calidad en el proceso, la mejor elección podría llegar a ser utilizar sistemas LIDAR ya que esta técnica da resultados más rápidos y con un grado mayor de calidad gráfica.

10.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda hacer un reconocimiento exhaustivo del lugar al que se desea realizar previamente a este tipo de levantamientos fotogramétricos o LIDAR, esto tiene muchas finalidades, de las cuales se puede mencionar

colocar las lonas de referencia para los puntos de control en zonas muy visibles y en fotogrametría que el material de estas no sean reflectivas ya que dependiendo del Angulo en el que se toma la fotografía el reflejo del sol puede dificultar la georreferenciación precisa a la hora de procesar. Además, para colocar los parámetros necesarios para facilitar el proceso de clasificación de los puntos.

- Además de los reconocimientos previos se recomienda indagar sobre el clima de la zona ya que para fotogrametría se necesita tener un cielo despejado para obtener mejor la calidad de las fotografías y una lluvia o nubes inesperadas podrían reducir la calidad de estas o inclusive suspender el levantamiento.
- En muchas ocasiones, la eficiencia que estos mecanismos nos ofrecen, nos puede hacer descuidar la autonomía de las baterías que utilizan los drones, es por eso que se recomienda al menos tener una segunda batería cargada al 100% así como el control de mando o el dispositivo móvil o tableta que se vincula con el equipo para evitar imprevistos de este tipo durante el vuelo.
- Es necesario considerar los riesgos de utilizar equipo de vanguardia, el riesgo de manipular estos artefactos de alto valor económico sin tener previamente una experiencia y/o agilidad para lograr obtener la información deseada; es por ello hacemos una recomendación para garantizar la calidad de los resultados y es comparar ya sea con este

trabajo o en uno nuevo comparar los resultados de Datos LIDAR con equipos comunes y de amplio conocimiento como como estación total, ya que los resultado serán en mayor medida semejantes con el otro, logrando alcanzar una claridad sobre la precisión y la calidad de los resultados con Datos LIDAR y considerar la conveniencia de la sustitución de los métodos tradicionales y a su vez esto influirá en la expansión de los conocimientos de estos métodos modernos que en El Salvador aun no alcanza a nivel educativo universitario como debería.

BIBLIOGRAFÍA

- <https://www.bbc.com/mundo/noticias-41433216>
- https://es.wikipedia.org/wiki/Forma_de_la_Tierra
- <https://acolita.com/sistema-geodesico-mundial-wgs84/>
- <https://www.vox.com/2015/3/5/8151303/gerardus-mercator-maps>
- <https://blogdesecundaria.wordpress.com>
- <https://cards.algoreducation.com/es/content/5lmySLa1>
- <https://www.ubuy.sv/es/product/3STJMKS-dji-mavic-2-pro-drone>
- <https://www.google.com/maps/place/Finca+Lutecia>
- https://www.google.com/search?q=que+es+pix4d+capture&sca_esv=9541cb1f2f7b383d&rlz
- https://es.wikipedia.org/wiki/Coordenadas_geogr%C3%A1ficas
- <https://www.rvslandsurveyors.com/lidar-or-photogrammetry>
- <https://rpas-drones.com/el-primer-dron-de-la-historia-un-hito-en-la-aviacion/#:~:text=El%20primer%20dron%20reconocido%20oficialmente,una%20capacidad%20de%20carga%20explosiva>
- https://www-flyeye-io.translate.goog/drone-technology-history/?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=sge
- <https://idc.apddrones.com/educacion/la-historia-de-los-drones-desde-los-inicios-hasta-la-actualidad/>

<https://javiergomiz.com/fotogrametria-drones/#:~:text=MAVIC%20M:%20El%20Mavic%20M,ver%20en%20el%20siguiente%20v%C3%ADdeo.>

https://www.researchgate.net/figure/Componentes-principales-del-Dron-utilizado-Fuente-Elaboracion-propia_fig1_344158874

<https://umilesgroup.com/partes-de-un-dron/>

<https://uavlatam.com/tipos-de-drones-para-topografia/>

<https://0mas000.com/los-puntos-de-control-la-clave-para-mediciones-precisas-en-topografia/>

<https://mundogeo.com/es/2024/02/26/dji-zenmuse-l2-una-revolucion-en-sistemas-lidar-para-drones/>

Topografía Con Drones Asociado A La Proyección Cartográfica Cónica Conformal De Lambert.

Manual del Curso: Global Mapper- MASTER SIG.


Video Clases del Ing. Wilfredo Amaya tanto de la materia optativa de GPS como del curso de especialización.



Anexos


Quality Report



Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

 Important: Click on the different icons for:











-  Help to analyze the results in the Quality Report
-  Additional information about the sections



 Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary 

Project	Finca Lutecia Fotogrametria
Processed	2025-08-22 16:05:01
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.39 cm / 0.55 in
Area Covered	0.039 km ² / 3.8661 ha / 0.01 sq. mi. / 9.5583 acres

Quality Check 

 Images	median of 74448 keypoints per image	
 Dataset	129 out of 136 images calibrated (94%), all images enabled	
 Camera Optimization	1.8% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 7943.84 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, 4 GCPs (4 3D), mean RMS error = 0.016 m	

 Preview 

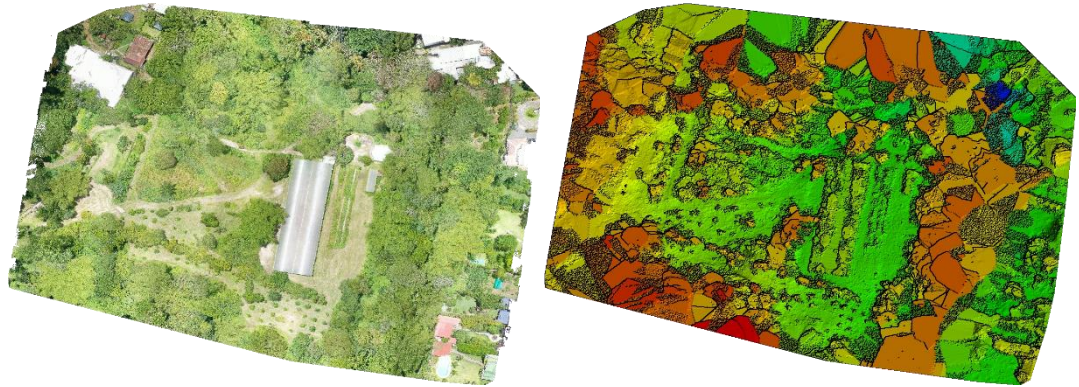


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Number of Calibrated Images	out of 136
Number of Geolocated Images	out of 136

Calibration Details

Initial Image Positions

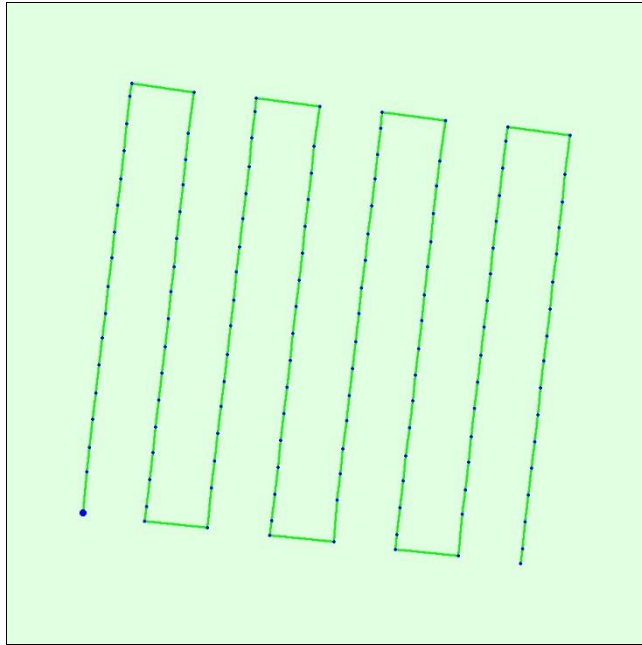
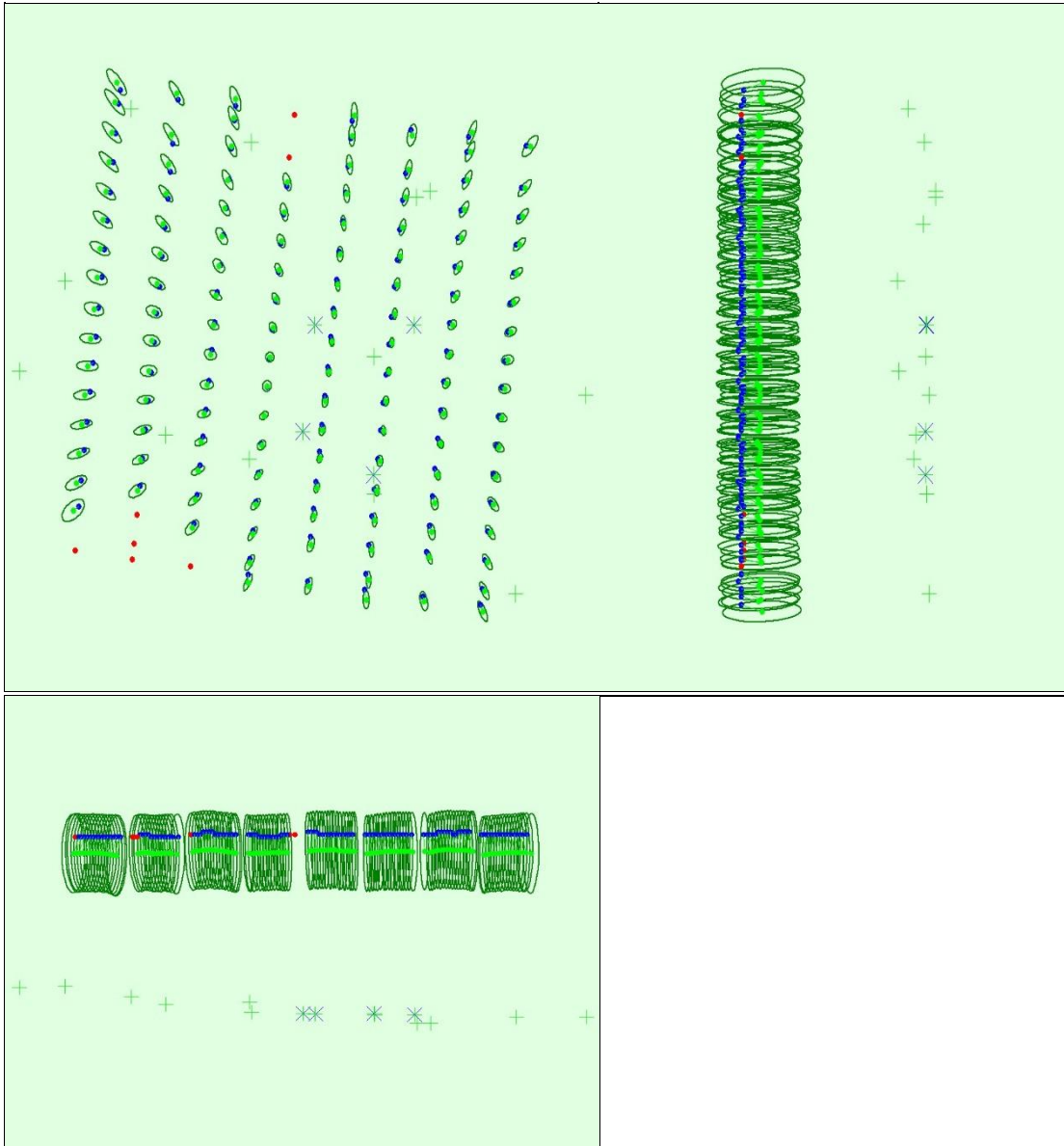


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 100x magnified

Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Red dots indicate disabled or uncalibrated images. Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Absolute camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]	Camera Displacement X [m]	Camera Displacement Y [m]	Camera Displacement Z [m]
Mean	0.022	0.024	0.154	0.022	0.019	0.006	0.003	0.005	0.008
Sigma	0.010	0.008	0.002	0.005	0.009	0.003	0.001	0.003	0.002

? Overlap

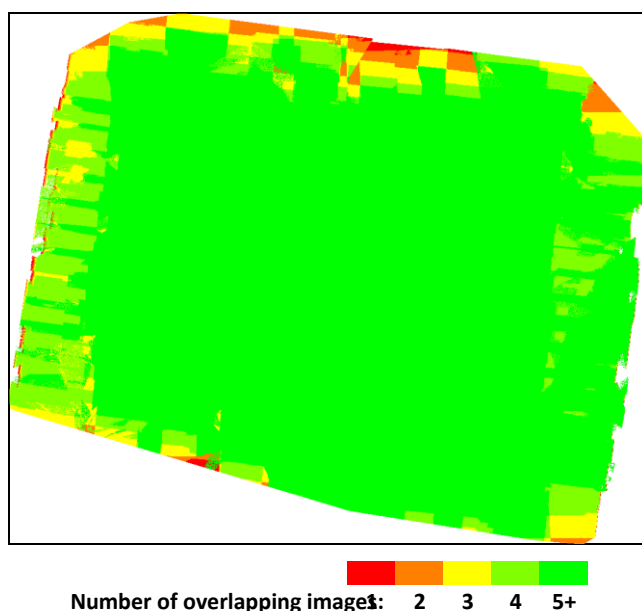



Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

Bundle Block Adjustment Details

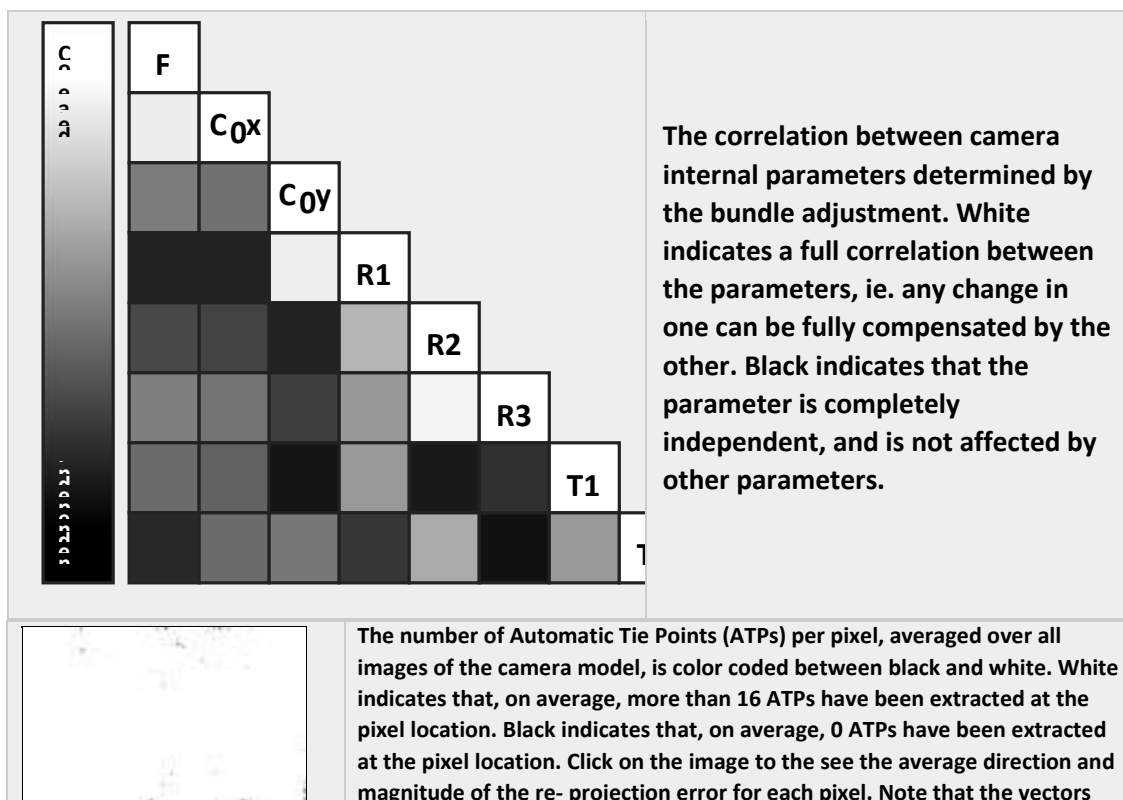


Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	1061836
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	445039
Mean Reprojection Error [pixels]	0.185

Internal Camera Parameters L1D-20c_10.3_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm] 

EXIF ID: L1D-20c_10.3_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4470.830 [pixel] 10.479 [mm]	2770.870 [pixel] 6.494 [mm]	1698.700 [pixel] 3.981 [mm]	0.009	0.040	-0.050	-0.003	0.002
Optimized Values	4551.564 [pixel] 10.668 [mm]	2710.793 [pixel] 6.353 [mm]	1751.941 [pixel] 4.106 [mm]	0.001	0.026	-0.045	-0.003	-0.002
Uncertainties (Sigma)	10.786 [pixel] 0.025 [mm]	0.573 [pixel] 0.001 [mm]	0.617 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000



2D Keypoints Table

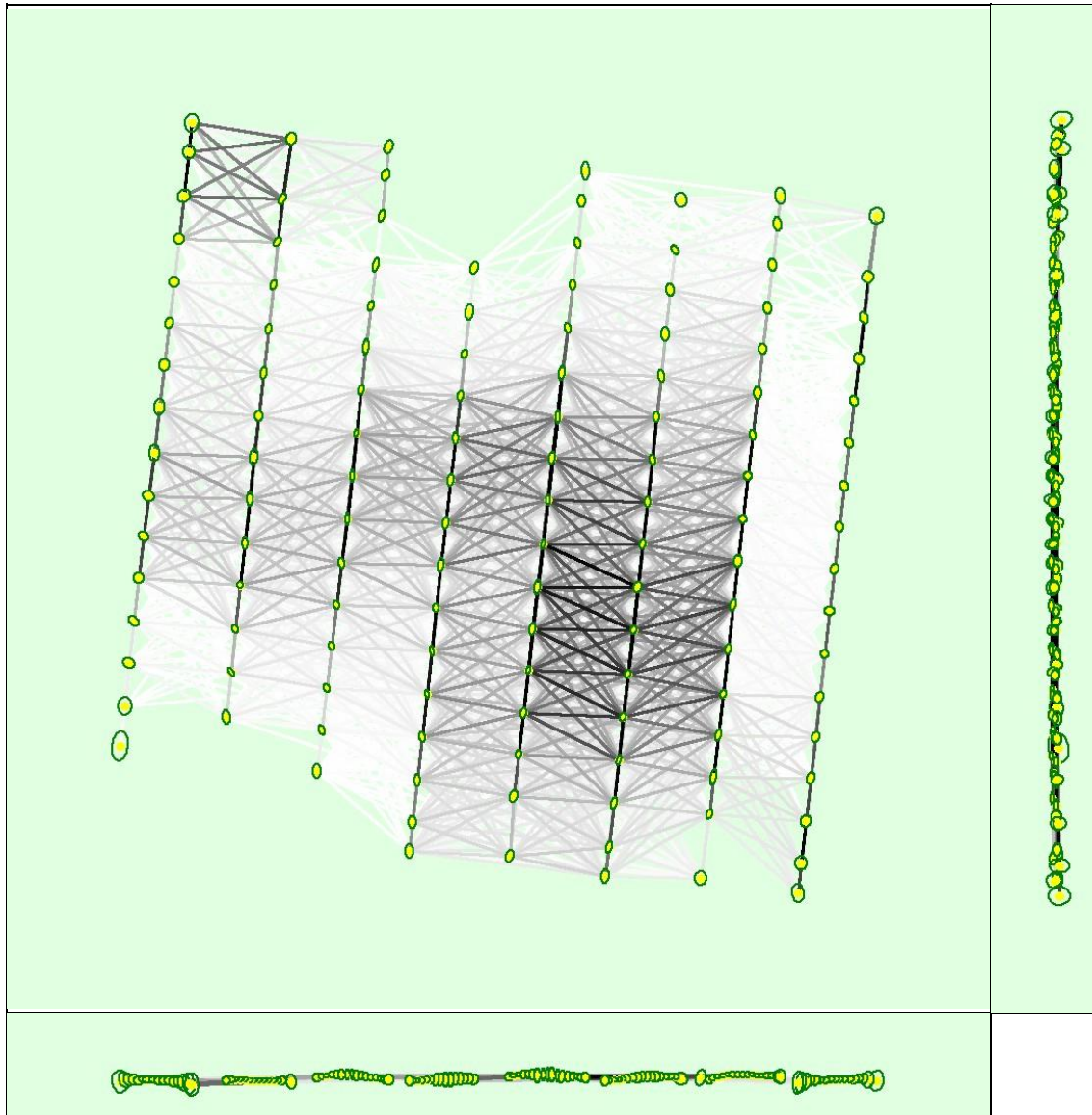
	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	74448	7944
Min	54416	429
Max	81697	16703
Mean	72826	8231

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	363107
In 3 Images	47116

In 4 Images	15996
In 5 Images	7783
In 6 Images	3621
In 7 Images	2263
In 8 Images	1418
In 9 Images	1068
In 10 Images	733
In 11 Images	497
In 12 Images	414
In 13 Images	320
In 14 Images	223
In 15 Images	205
In 16 Images	130
In 17 Images	63
In 18 Images	34
In 19 Images	14
In 20 Images	17
In 21 Images	13
In 22 Images	4

2D Keypoint Matches



Uncertainty ellipses 100x magnified

Number of matches

25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

? Relative camera position and orientation uncertainties i

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]	Camera Displacement X [m]	Camera Displacement Y [m]	Camera Displacement Z [m]
Mean	0.009	0.014	0.010	0.021	0.018	0.006	0.003	0.006	0.007
Sigma	0.003	0.003	0.005	0.006	0.008	0.003	0.001	0.002	0.002

? Manual Tie Points i

MTP Name	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
mtp1	0.714	7 / 7
mtp2	1.087	4 / 4
mtp3	0.392	4 / 4
mtp4	0.386	7 / 7
mtp5	0.878	10 / 10
mtp6	0.667	11 / 11
mtp7	1.052	4 / 4
mtp8	0.264	5 / 5
mtp9	0.568	4 / 4
mtp10	0.358	2 / 2
mtp11	0.800	9 / 9
mtp12	0.571	4 / 4
mtp13	1.091	15 / 15

Projection errors for manual tie points. The last column counts the number of images where the manual tie point has been automatically verified vs. manually marked.

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
1 (3D)	0.020/ 0.020	0.022	-0.009	-0.018	1.286	17 / 17
2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.016	-0.022	0.018	0.843	21 / 21
3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.010	0.017	-0.021	1.951	15 / 15
4 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	0.016	0.011	1.120	18 / 18
Mean [m]		- 0.000023	0.000361	- 0.002296		
Sigma [m]		0.014752	0.016521	0.017383		
RMS Error [m]		0.014752	0.016525	0.017534		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

Absolute Geolocation Variance

Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00

-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.78	0.00
-3.00	0.00	57.36	51.16	51.16
0.00	3.00	42.64	47.29	48.84
3.00	6.00	0.00	0.78	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		-0.173710	0.407310	6.914138
Sigma [m]		1.012043	1.178487	0.474051
RMS Error [m]		1.026843	1.246889	6.930370

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-0.173710	0.407310	6.914138

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

Relative Geolocation Variance

Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
----------------------------	--------------	--------------	--------------

[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	1.255
Phi	1.624
Kappa	11.573

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Rolling Shutter Statistics

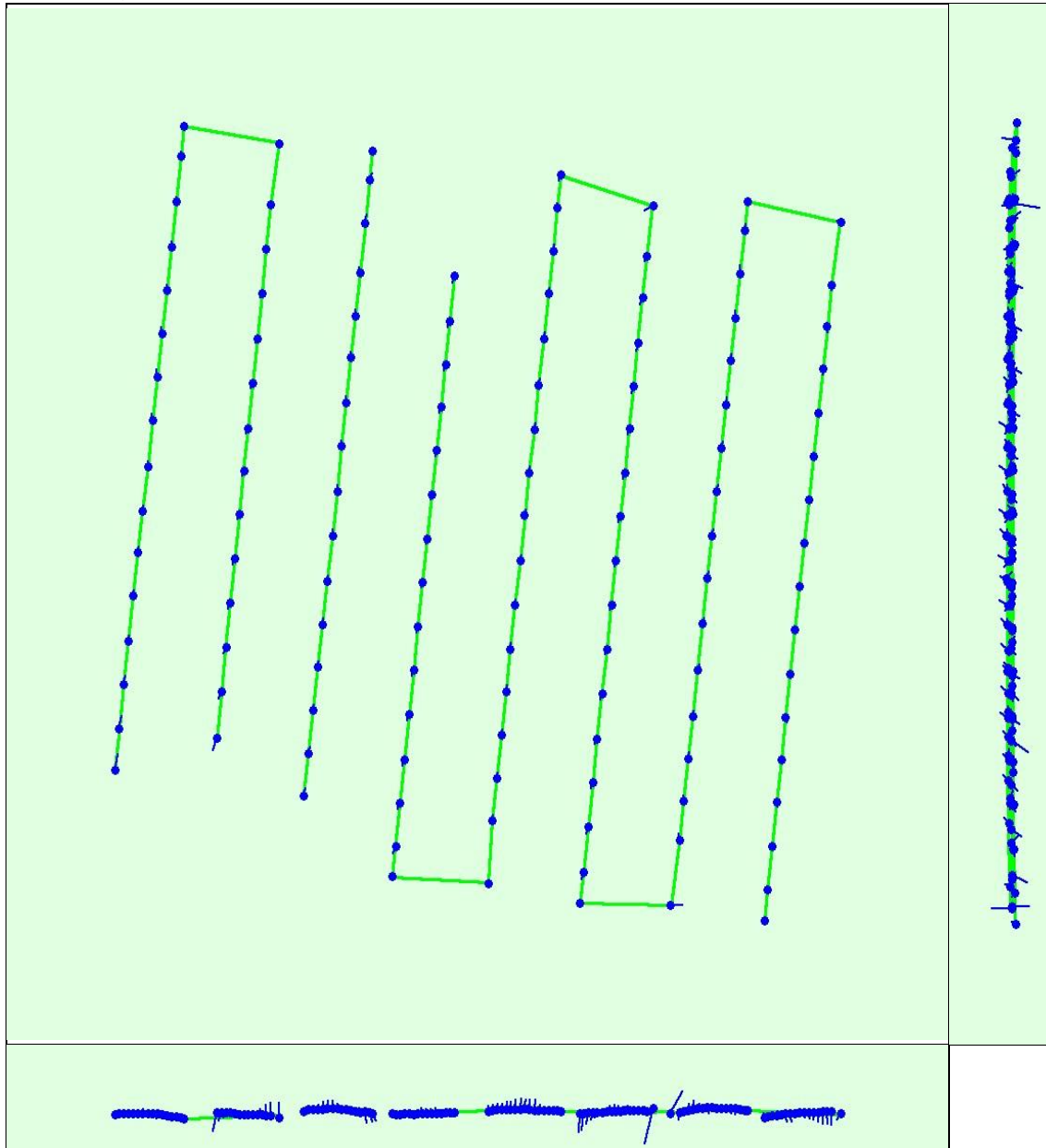


Figure 6: Camera movement estimated by the rolling shutter camera model. The green line follows the computed image positions. The blue dots represent the camera position at the start of the exposure. The blue lines represent the camera motion during the rolling shutter readout, re-scaled by a project dependant scaling factor for better visibility.

Median Camera Speed	4.8736 [m/s]
Median Camera Displacement During Sensor Readout)	0.34 [m]
Median Rolling Shutter Readout Time	70.4368 [ms]

Initial Processing Details


System Information

Hardware	CPU: AMD Ryzen 7 7730U with Radeon Graphics RAM: 14GB GPU: AMD Radeon (TM) Graphics (Driver: 31.0.21914.16002)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM 96 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	Lambert_Conformal_Conic (EGM 2008 Geoid)
Output Coordinate System	Lambert_Conformal_Conic (EGM 2008 Geoid)

Processing Options

Detected Template	 3D Maps
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor

Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes


Point Cloud Densification details

Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: yes
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	32m:45s
Time for Point Cloud Classification	01m:33s
Time for 3D Textured Mesh Generation	12m:11s

Results 

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	14436316
Average Density (per m³)	850.63

DSM, Orthomosaic and Index Details Processing Options 

DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (1.39 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Grid DSM	Generated: yes, Spacing [cm]: 100
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes

DTM Resolution	5 x GSD (1.39 [cm/pixel])
Contour Lines Generation	Generated: yes Contour Base [m]: 0 Elevation Interval [m]: 10 Resolution [cm]: 100 Minimum Line Size [vertices]: 20
Time for DSM Generation	08m:03s
Time for Orthomosaic Generation	17m:41s
Time for DTM Generation	05m:02s
Time for Contour Lines Generation	02s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s