

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



**Precisión de topografía: Uso de vehículos aéreos no tripulados  
como herramienta para creación de fotogrametría  
georreferenciada**

Trabajo de graduación presentado por Helmut Estuardo Flores  
Grotewold para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil

Guatemala,

2019

Precisión de topografía: Uso de vehículos aéreos no tripulados  
como herramienta para creación de fotogrametría  
georreferenciada

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA  
Facultad de Ingeniería



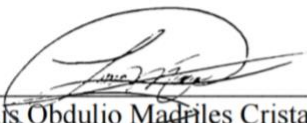
**Precisión de topografía: Uso de vehículos aéreos no tripulados  
como herramienta para creación de fotogrametría  
georreferenciada**

Trabajo de graduación presentado por Helmut Estuardo Flores  
Grotewold para optar al grado académico de Licenciado en Ingeniería  
Civil


Guatemala,


2019

Vo. Bo. :

(f)   
Ing. Luis Obdulio Madriles Cristales

Tribunal Examinador:

(f)   
Ing. Luis Obdulio Madriles Cristales

(f)   
Arq. Al Moshe Asturias Romero

(f)   
Ing. Rodrigo Andrés Morales Ortega

Fecha de aprobación: Guatemala, 9 de enero del 2020

El presente trabajo se realizó con el objetivo de determinar la precisión de levantamientos topográficos con el uso de vehículos aéreos no tripulados georreferenciados y compararlo con los levantamientos topográficos tradicionales. Lo cual fue propuesto ya que hoy en día ha evolucionado la tecnología en el área de los drones y la necesidad de innovar y de ser cada vez más eficientes y la reducción de costos.

Por lo que, primero quisiera agradecerle a Dios por permitirme realizar este estudio y por todas las bendiciones que he tenido durante toda mi vida y darme fuerzas cuando más las necesitaba. Agradezco a mis padres Mauricio Flores e Inge Grotewold por siempre apoyarme en toda mi vida, y por mostrarme lo que es el trabajo duro y honesto. A mis hermanos Fernando Flores y Sebastián Flores por ser los ejemplos de vida que tengo que seguir y por toda la ayuda incondicional que me brindaron.

Por otra parte, agradezco al Ing. Ramón Morales por abrirme las puertas de la urbanización la Dignidad y darme la confianza para poder hacer mi estudio dentro de sus instalaciones y áreas de trabajo. Así mismo, agradezco al personal de la urbanización por el apoyo y por el transporte brindado. Además, agradecimientos especiales a Ramón Morales por todo el apoyo brindado dentro del trabajo de campo, para el presente trabajo.

Agradezco a mi asesor Ing. Luis Madriles por guiarme y por las correcciones dentro del presente trabajo. Así mismo, a mi catedrático el Arq. Al Moshe por brindarme apoyo con el equipo utilizado por la universidad y por el procesamiento de datos de los GPS. A mi compañero de universidad Romeo Mont por ayudarme durante el transcurso de la carrera. Y agradecerle a mi director de carrera, al Ing. Roberto Godo por brindarme su apoyo en todo el tiempo que estuve en la universidad, donde siempre fue muy atento con los estudiantes y un excelente catedrático.

Por último, agradezco a mi novia Karla Marchena por su gran ayuda por sus comentarios, sus correcciones y por todo apoyo que me brindo durante todo el transcurso de mi carrera. Así mismo a mis compañeros de clase: Anttony Gálvez por el apoyo incondicional en todo el proceso educativo y en el presente trabajo, Juan Pablo Mayen por todos los trabajos en grupo logrados, Juan Pablo Fuentes por tener tanta paciencia y disponibilidad de tiempo para explicarme y el gran apoyo que me brindó en el presente trabajo.

<b>Prefacio</b>	<b>v</b>
<b>Lista de figuras</b>	<b>XIII</b>
<b>Lista de cuadros</b>	<b>XVI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XVII</b>
<b>Abstract</b>	<b>XIX</b>
<b>I. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>II. Justificación</b>	<b>3</b>
<b>III. Objetivos</b>	<b>5</b>
A. Objetivo general . . . . .	5
B. Objetivos específicos . . . . .	5
<b>IV. Marco teórico</b>	<b>7</b>
A. Levantamientos topográficos . . . . .	7
1. Topografía . . . . .	7
2. Historia de la topografía . . . . .	8
3. Historia de la topografía en Guatemala . . . . .	8
4. Importancia de la topografía . . . . .	9
B. Divisiones de la topografía . . . . .	10
1. Planimetría . . . . .	10
2. Altimetría . . . . .	11
C. Levantamientos . . . . .	11
1. Tipos de levantamientos . . . . .	11
2. Equipo moderno de topografía . . . . .	13
3. Mantenimiento del equipo . . . . .	13
D. Productos generados por la topografía . . . . .	13
1. Mapas base o mapas topográficos . . . . .	13

2.	Planos topográficos . . . . .	17
E.	Ciencias y términos relacionados con la topografía . . . . .	22
1.	Agrimensura . . . . .	22
2.	Geofísica . . . . .	22
3.	Geodesia . . . . .	26
4.	Cartografía . . . . .	29
F.	Sistema de coordenadas geográficas . . . . .	38
G.	Proyecciones cartográficas . . . . .	39
1.	Universal transversa mercator (U.T.M) . . . . .	39
2.	Transversal de Lambert . . . . .	40
3.	Proyecciones GTM . . . . .	40
H.	Introducción a vehículos aéreos no tripulados y fotogrametría . . . . .	41
1.	Definición de fotogrametría . . . . .	41
2.	Elementos fundamentales en fotogrametría . . . . .	41
3.	Levantamiento fotogramétrico . . . . .	43
I.	Clasificación de la fotogrametría . . . . .	44
1.	Fotogrametría analógica . . . . .	44
2.	Fotogrametría analítica . . . . .	45
3.	Fotogrametría digital . . . . .	46
4.	Fotogrametría aérea . . . . .	47
5.	Fotogrametría terrestre . . . . .	61
J.	Evolución histórica de la fotogrametría . . . . .	64
1.	La fotogrametría en Guatemala . . . . .	66
K.	Integración de tecnologías . . . . .	67
1.	Cámara . . . . .	67
2.	Drones . . . . .	71
3.	Limitaciones de drones . . . . .	72
L.	Métodos de navegación fotográfica . . . . .	74
1.	Navegación a simple vista con cartografía disponible . . . . .	74
2.	Navegación a simple vista sin cartografía previa . . . . .	74
3.	Sistemas de navegación avanzados . . . . .	76
M.	Software . . . . .	77
1.	Agisoft photoscan . . . . .	77
2.	Pix4D . . . . .	78
3.	Drone deploy . . . . .	78
4.	Autodesk recap pro . . . . .	79
<b>V.</b>	<b>Metodología</b> . . . . .	<b>81</b>
A.	Fase preliminar . . . . .	81
1.	Ubicación del terreno . . . . .	81
2.	Planicie del terreno . . . . .	82
3.	Dimensiones del terreno . . . . .	82
4.	Colindancias . . . . .	82
5.	Restricciones . . . . .	83
6.	Seguridad . . . . .	84
7.	Puntos de control . . . . .	84
8.	Clima . . . . .	84
9.	UAV . . . . .	85

10.	GPS . . . . .	85
11.	Cinta métrica, bastones y monitores . . . . .	86
12.	Campamento . . . . .	86
B.	Plan de vuelo . . . . .	86
1.	Ground sampling distance (GSD) . . . . .	87
2.	Altura de vuelo . . . . .	87
3.	Traslape horizontal . . . . .	88
4.	Traslape vertical . . . . .	88
5.	Velocidad de vuelo . . . . .	88
6.	Tipo de rejilla . . . . .	88
7.	Tamaño de puntos de control . . . . .	90
C.	Fase de campo . . . . .	90
D.	Fase final . . . . .	91
1.	Extracción de imágenes . . . . .	92
2.	Software . . . . .	92
3.	Visión de mapa . . . . .	92
4.	Orientación de fotos . . . . .	92
5.	Puntos de referencia . . . . .	93
6.	Nube de puntos densa . . . . .	93
7.	Clasificación de puntos . . . . .	94
8.	Limpieza de ruido . . . . .	94
9.	Creación de malla texturizada . . . . .	94
10.	Generación de DSM y DTM . . . . .	94
11.	Ortomosaico . . . . .	95
12.	Informe . . . . .	95
E.	Construcción, urbanización y vivienda La Dignidad Escuintla, Escuintla . . . . .	95
1.	Fase preliminar . . . . .	95
2.	Plan de vuelo . . . . .	100
3.	Fase de campo . . . . .	105
4.	Fase final . . . . .	112
<b>VI.Resultados</b>		<b>123</b>
A.	Primer levantamiento fotogramétrico . . . . .	123
1.	Características de vuelo . . . . .	123
2.	Resultados de levantamiento con agisoft photoscan . . . . .	124
3.	Resultados de levantamiento con PIX4D . . . . .	125
B.	Segundo levantamiento fotogramétrico . . . . .	125
1.	Características de vuelo . . . . .	125
2.	Resultados de levantamiento con agisoft photoscan . . . . .	126
3.	Resultados de levantamiento con PIX4D . . . . .	127
4.	Puntos geodésicos . . . . .	131
C.	Levantamiento topográfico con estación total . . . . .	131
D.	Resultados generales . . . . .	133
<b>VII. Discusión</b>		<b>135</b>
<b>VIII. Conclusiones</b>		<b>143</b>



<b>IX. Recomendaciones</b>	<b>145</b>
<b>X. Bibliografía</b>	<b>147</b>
<b>XI. Anexos</b>	<b>149</b>
A. Informes levantamiento topográfico sin puntos GPS . . . . .	149
1. Agisoft photoscan . . . . .	149
2. PIX4D . . . . .	156
B. Informes levantamiento topográfico con puntos GPS . . . . .	165
1. Agisoft photoscan . . . . .	165
2. PIX4D . . . . .	173
C. Informe de puntos geodesicos . . . . .	181
<b>XII. Glosario</b>	<b>183</b>

---

## Lista de figuras

---

1.	Representación de superficie en mapa topográfico[7] . . . . .	14
2.	Mapa temático[7] . . . . .	14
3.	Mapa de pequeña escala[7] . . . . .	15
4.	Mapa de gran escala[7] . . . . .	15
5.	Nombre oficial de la serie [7] . . . . .	16
6.	Gráfico de hojas colindantes [7] . . . . .	16
9.	Toponimia [7] . . . . .	16
7.	Escala numérica y gráfica del mapa. [7] . . . . .	17
8.	Marco de referencia[7] . . . . .	17
10.	Lista de elementos lineales como carreteras[7] . . . . .	17
11.	Símbolos para los núcleos de población y contrucciones aisladas [6] . . . . .	18
12.	Signos convencionales hidrográficos [6] . . . . .	19
13.	Símbolos convencionales [6] . . . . .	20
14.	Símbolos para la vegetación presente en el área.[6] . . . . .	21
15.	Trazos usados para marcaje de diferentes tipos de límites administrativos.[6] . . . . .	22
16.	Escala de tiempos geológicos[9] . . . . .	23
17.	Sistema de fallas normales en sedimentos muy finos.[9] . . . . .	25
18.	Pliegues anticlinales[9] . . . . .	26
19.	Sistema de fallas normales en sedimentos muy finos.[10] . . . . .	27
20.	Definición de WGS84[10] . . . . .	29
21.	Proyección conforme[7] . . . . .	31
22.	Proyección equivalente[7] . . . . .	31
23.	Proyección afiláctica[7] . . . . .	32
24.	Proyección equidistante[7] . . . . .	32
25.	Perspectiva o plana[7] . . . . .	32
26.	Proyección gnomónica[7] . . . . .	33
27.	Proyección estereográfica[7] . . . . .	34
28.	Proyección ortográfica[7] . . . . .	34
29.	Proyecciones escenográficas[7] . . . . .	35
30.	Proyección polar o ecuatorial[7] . . . . .	35
31.	Proyección meridiana o transversa[7] . . . . .	36
32.	Proyección oblicua u horizontale [7] . . . . .	36
33.	Proyecciones cónicas [7] . . . . .	37

34.	Proyección cilíndrica [7]	37
35.	Relación entre la escala de la fotografía y la de la cartografía [14]	42
36.	Altitud de vuelo sobre el nivel del mar [14]	42
37.	Evolución informática en la fotogrametría [16]	46
38.	La fotografía aérea es una proyección central[17]	48
39.	Muestra el negativo inclinado en el ángulo $\theta$ con la horizontal[17]	50
40.	Muestra el negativo inclinado en el ángulo $\theta$ con la horizontal[17]	52
41.	Ilustración de tres fotografías sucesivas desde sus respectivas aéreas [17]	55
42.	Muestra de toma aérea con cuatro puntos de control [17]	59
43.	La intersección de las líneas salientes de una imagen [17]	60
44.	Tomas aéreas en movimiento [17]	61
45.	Muestra que la cámara fue posicionada en cada estación [17]	63
46.	Posición de estaciones de cámara en A y B [17]	64
47.	Esquema de cámara fotogramétrica aérea [19]	68
48.	Diagrama de obturador de una cámara aérea [19]	69
49.	Vuelo de franjas entrelazadas [22]	75
50.	Entrada principal proyecto Escuintla	95
51.	Vuelo de inspección de obra La Dignidad	96
52.	Vista aérea del terreno Escuintla	97
53.	Área determinada para levantamiento fotogramétrico	104
54.	Colocación de doble rejilla	104
55.	Cantidad de baterías necesarias y tiempo de vuelo	105
56.	Planificación de puntos de control dentro de campamento base y preparación de equipo	106
57.	Puntos de control utilizados para el levantamiento topográfico	106
58.	Estación de despegue y aterrizaje de vuelos UAV	107
59.	Interferencia magnética. Elaborado por Computemano App	107
60.	Segundo vuelo de inspección de área	108
61.	Inspección de visibilidad de puntos de control	108
62.	Configuración de plan de vuelo y despegue de UAV	109
63.	Plan de vuelo ejecutándose en desarrollo	109
64.	Calibración de punto base central	110
65.	Toma de altura de GPS	110
66.	Configuración y toma de puntos de control Trimble DL app	111
67.	Transporte para equipo geodésico, Polaris	111
68.	Mapa de trayectoria de levantamiento topográfico Agisoft photoscan	113
69.	Mapa de trayectoria de levantamiento topográfico PIX4D	114
70.	Análisis de solapamiento de cámaras Agisoft photoscan	114
71.	Conversión de imágenes Agisoft photoscan	115
72.	Conversión de imágenes Pix4d	115
73.	Nube de puntos inicial Agisoft photoscan	116
74.	Nube de puntos inicial Pix4d	116
75.	Modelo con puntos de referencia	117
76.	Rectificación de puntos de control Agisoft photoscan	117
77.	Rectificación de puntos de control Pix4d	118
78.	Creación de nube de puntos densa	118
79.	Clasificación de nube de puntos densa	119

80.	Creación de malla texturizada . . . . .	120
81.	Generación de modelo de elevación detallada . . . . .	120
82.	Generación de modelo de elevación del terreno . . . . .	121
83.	Creación de ortomosaico pix4d . . . . .	121
84.	Reporte final Agisoft photoscan . . . . .	122
85.	Reporte final Pix4d . . . . .	122
86.	Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes . . . . .	124
87.	Posiciones de cámaras y estimadores de error . . . . .	124
88.	Número de imágenes sobrepuestas . . . . .	125
89.	Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes . . . . .	126
90.	Posiciones de cámaras y estimadores de error . . . . .	127
91.	Número de imágenes sobrepuestas . . . . .	128
92.	Nube de puntos densa del levantamiento fotogramétrico No.2 . . . . .	129
93.	Nube de puntos densa clasificada . . . . .	129
94.	Malla tridimensional texturizada . . . . .	129
95.	Modelo de elevación de superficie terrestre . . . . .	130
96.	Modelo de elevación del perfil del terreno . . . . .	130
97.	Curvas de nivel . . . . .	130
98.	Ortomosaico del levantamiento topográfico con GPS . . . . .	131
99.	Nube de puntos tomados con la estación total . . . . .	132
100.	Ubicación de nube de puntos en civil cad . . . . .	132
101.	Curvas de nivel generado en civil cad . . . . .	133



---

## Lista de cuadros

---

1.	Tamaño mínimo . . . . .	42
2.	Hitos en el desarrollo de la fotogrametría[16] . . . . .	66
3.	GSD necesarios dependiendo el tipo de escala . . . . .	87
4.	Especificaciones de cámara . . . . .	101
5.	GSD por altura . . . . .	101
6.	Traslape horizontal . . . . .	102
7.	Traslape vertical . . . . .	103
8.	Características del primer levantamiento fotogramétrico sin puntos georreferenciados . . . . .	123
9.	Características experimentales del levantamiento No. 1 . . . . .	124
10.	Errores medios de las posiciones de cámaras . . . . .	124
11.	Chequeo general . . . . .	125
12.	Cantidad de puntos claves dentro del levantamiento . . . . .	125
13.	Diferencia de la geolocalización de cámara . . . . .	125
14.	Características del segundo levantamiento fotogramétrico con puntos georreferenciado . . . . .	126
15.	Características experimentales del levantamiento No. 2 . . . . .	126
16.	ECM de puntos de apoyo . . . . .	127
17.	Puntos de apoyo georreferenciados . . . . .	127
18.	Chequeo general del segundo levantamiento fotogramétrico . . . . .	127
19.	Cantidad de puntos claves dentro del levantamiento . . . . .	128
20.	Diferencia de la geolocalización de cámara . . . . .	128
21.	Sistema de coordenadas utilizado . . . . .	131
22.	Listado de puntos marcados durante el levantamiento . . . . .	131
23.	Características de levantamiento topográfico con estación total . . . . .	132
24.	Comparación de resultados del levantamiento fotogramétrico sin puntos geodésicos . . . . .	133
25.	Comparación de resultados del levantamiento fotogramétrico con puntos geodésicos . . . . .	133
26.	Porcentajes de variación del levantamiento fotogramétrico con GPS respecto a sin GPS . . . . .	134

27. Porcentajes de variación de la topografía moderna respecto a topografía antigua134

La topografía es una herramienta muy importante en nuestro país como en el mundo ya que es la ciencia que ayuda a la determinación de el contorno y las dimensiones de la superficie de la Tierra, esto a través de la medición de direcciones, elevaciones y distancias.

La metodología para realizar levantamientos topográficos en el país ha ido cada vez mejorando en el pasar de los años. Causando que se tenga un mejor análisis de las superficies. En la mayoría de levantamientos se utiliza equipo topográficos como lo es la estación total que es un herramienta muy eficiente y precisa a comparación de teodolitos. Sin embargo, hoy en día se han estado sumando nuevas técnicas más avanzadas para la realización de un levantamiento topográfico, cosa que en nuestro país todavía es algo poco común.

Estas nuevas técnicas generan mediciones directas o indirectas de la superficie terrestre, de una manera que vuelve un levantamiento topográfico que sea más rápido y con resultados más precisos y confiables, lo cual ayuda y respalda a un ingeniero civil para realizar estudios preliminares, trazado de caminos, cálculos volumétricos, definición de curvas de nivel en zonas con difícil acceso, además de crear una base de datos. Una de las nuevas técnicas creadas es el uso de vehículos aéreos no tripulados o también llamados drones, por medio de la técnica de fotogrametría georreferenciada.

Esto ha funcionado gracias a los sistemas de posicionamiento por satélite. Que ha ido evolucionando día a día. Todos estos nuevos hallazgos tienen el objetivo de reducir riesgos del operario, minimizar costos a un largo plazo y optimizar tiempos en el trabajo de campo. Ya que se sabe que en Guatemala el tema riesgo humano es muy importante por toda la inseguridad que existe y que ha ido aumentando durante el pasar de los años.





The topography is a very important tool in our country as in the world since it is the science that helps determine the contour and dimensions of the Earth's surface, this through the measurement of directions, elevations and distances.

The methodology for surveying in the country has been improving every time over the years. Causing a better analysis of the surfaces. In most surveys, topographic equipment is used, such as the total station, which is a very efficient and precise tool compared to theodolites. However, today more advanced new techniques have been added for the generation of a topographic survey, which in our country is still something uncommon.

These new techniques generate direct or indirect measurements of the earth's surface, in a way that causes a topographic survey to be more efficient and with more accurate and reliable results, which helps and supports a civil engineer to conduct preliminary studies, plotting roads, volumetric calculations, definition of contours in areas with difficult access, in addition to creating a database. One of the new techniques created is the use of unmanned aerial vehicles or also called drones, by means of the georeferenced photogrammetry technique.

This has worked thanks to satellite positioning systems. That has evolved day by day. All these new findings are aimed at reducing operator risks, minimizing long-term costs and optimizing time in fieldwork. Since, in Guatemala it is known that the issue of human risk is very important because of all the insecurity that exists in the country and that has been increasing over the years.



Hoy en día, sabemos que en cuanto al avance tecnológico ha ido revolucionando el mundo, y desde luego la modernización de las técnicas dentro de la ingeniería civil no son la excepción. Todo avance tecnológico tiene el fin de reducir los riesgos del operario o del equipo utilizado, optimizar procesos y minimizar costos a largo plazo.

Dichos avances han permitido el desarrollo y la adaptación de nuevos equipos y métodos de medición, que en este trabajo se enfocará en las técnicas topográficas, y el uso de sistemas geodésicos. Cada técnica tiene sus limitantes en el campo y su uso determinado por las condiciones físicas del terreno y las necesidades del proyecto. Tales necesidades están con el tiempo disponible para realizar el estudio, los recursos económicos y de personal disponibles, el alcance del proyecto y el nivel de precisión exigido.

Por lo cual, el uso de vehículos aéreos no tripulados permite la captura de imágenes aéreas georreferenciadas que sirven para la generación de modelos digitales y la representación cartográfica de terrenos. Este método se conoce como fotogrametría, método que ha sido utilizado desde varias épocas, la diferencia es que antes se realizaban con helicópteros o avionetas que causaban que este método fuera muy costoso. Por lo tanto, el progreso de la forma de obtener las fotografías aéreas, además el desarrollo de nuevos softwares para el procesamiento de datos, permite que este método se adapte a la nueva era digital, que compita con los métodos tradicionales y que facilite el trabajo en el aérea de la construcción.

Por lo que, en este trabajo de graduación se estudia la aplicación de la fotogrametría aérea digital utilizando vehículos aéreos no tripulados en levantamientos topográficos para la determinación de la precisión y la producción de modelos de elevación, curvas de nivel y ortofotos.

Por eso, al principio se tiene toda la fundamentación teórica necesaria para la comprensión de la técnica, luego de la descripción detallada de cada proceso previo, durante y después de la aplicación fotogramétrica. Para luego ser comparados por diferentes softwares y con los resultados obtenidos por el método tradicional. Además, de las restricciones que existen dentro de nuestro país.

Esta técnica se llevará a cabo en una urbanización llamada La Dignidad Escuintla, situada en Guatemala en el departamento de Escuintla. En dicho proyecto se realizarán los siguientes levantamientos topográficos: Con drones sin puntos georreferenciados, con drones con puntos georreferenciados y el uso de estación total. Y así, poder determinar precisión de los tres levantamientos.

Una de las etapas de construcción de proyectos en la ingeniería civil es definitivamente la topografía, porque es necesario para la planificación de la obra, y para conocer características de la altimetría y la planimetría del terreno donde se vaya a realizar la construcción prevista. Para reducir tiempo y costos es importante que se estudien nuevas técnicas y procedimientos de estas etapas.

La técnica de fotogrametría georreferenciada permite analizar la forma y dimensiones de un objeto, y así le da lugar a ser una aplicación, muy utilizada por otros países desarrollados, de la topografía. Al realizar estos modelos digitales con el uso de vehículos aéreos no tripulados lo vuelve un tema innovador en nuestra Guatemala.

Esta investigación permitirá que el arquitecto o ingeniero civil que se dedique al campo o la medición y representación de terrenos, conozca de las ventajas y limitaciones que esta nueva técnica pueda tener, y así, tener una visión más amplia de las facilidades de adquirir información primordial con el uso de una técnica indirecta e innovadora para la obtención de resultados y con tiempos mucho menores que los métodos normalmente utilizados.

Por lo cual, dentro del área de la construcción de vías de nuestro país es necesario la creación de un levantamiento topográfico previo y final de la construcción para poder determinar las características geométricas necesarias. Por otro lado, esta investigación ayudará a demostrar el uso de software que será el encargado de la etapa de procesamiento de imágenes y para la etapa de la elaboración de un producto catastral, en el que se ayudará todos los pasos que se utilizaron para que el lector pueda planificar un levantamiento topográfico, utilizando como herramienta la técnica de la fotogrametría georreferenciada.



### A. Objetivo general

Evaluar la precisión de la topografía con el uso de la técnica de fotogrametría georreferenciada, a través del uso de vehículos aéreos no tripulados.

### B. Objetivos específicos

- Investigar los lineamientos y normas que existan dentro del país para poder planificar un plan de vuelo fotogramétrico con el uso de vehículos aéreos no tripulados.
- Integrar tecnología satelital en la toma de puntos que permitirá mejorar la precisión de la georreferenciación del modelo de la superficie y la definición de los límites existentes dentro del terreno determinado.
- Crear un modelo fotogramétrico digitalizado tridimensional, con sus respectivas curvas de nivel, ortomosaicos, y mallas tridimensionales texturizadas.
- Comparar los datos tomados con un levantamiento topográfico antiguo.





### A. Levantamientos topográficos

#### 1. Topografía

Se define la topografía (del griego: topos, lugar y graphein, describir) como la ciencia que trata de los principios y métodos empleados para determinar las posiciones relativas de los puntos de la superficie terrestre, por medio de medidas, y usando los tres elementos del espacio. Estos elementos pueden ser: dos distancias y una elevación, o una distancia, una dirección y una elevación.

Esta ciencia es una aplicación de la geometría mediante la cual se define la posición y las formas circunstanciales del suelo; en otras palabras, estudia en detalle la superficie terrestre y los procedimientos por los cuales se pueden representar todos los accidentes que en ella existen, sean naturales o debidos a las acciones del ser humano. El medio por el que todo esto se representa es el del dibujo.

Asimismo, la topografía está directamente relacionada con la Tierra. El estudio de la Tierra como cuerpo en el espacio le corresponde a la Astronomía; y como globo terrestre en lo que concierne a su configuración precisa y a su medida le corresponde a la Geodesia; sin embargo el hombre tiene necesidad de algo más, de un estudio detallado de un territorio determinado de la tierra, en el cual orientará su existencia diaria.

Y es aquí donde tiene cabida la topografía, puesto que es esta la que le ayuda al ser humano a determinar los límites de su derecho de propiedad, es decir, lo asiste en establecer no solo los linderos de su propiedad con sus divisiones interiores y diversos cultivos, sino también los de las viviendas, los caminos, los ríos, los puentes, ferrocarriles, entre otros. Además, todas aquellas particularidades del terreno que puedan interesar en las cuestiones que se presentan en las necesidades de la vida práctica. [1]

## 2. Historia de la topografía

Varios doctrinarios establecen que la topografía comenzó en Egipto alrededor del año 1400 a.C., puesto que era necesario dividir las parcelas de los terratenientes por motivos de recaudación fiscal y pago de tributos. Asimismo, cuando el caudal del potente Río Nilo aumentaba tras las lluvias, este arrasaba con grandes porciones de parcelas, de esta cuenta se comisionaban a los estiradores de cuerdas para que volvieran a marcar los linderos originales entre parcelas. Estos antiguos estiradores de cuerdas fueron los primeros "topógrafos" de aquella época. Para estas primeras civilizaciones la superficie del planeta Tierra era totalmente plana, creencia la cual fue modificándose con el paso del tiempo.

Tiempo después, Herón de Alejandría, uno de los ingenieros más ingeniosos de la historia antigua, es una figura prominente en la aplicación de la ciencia, ya que escribió un libro titulado, La Dioptra, el cual explicaba los métodos y cálculos para tomar mediciones de un área específica y las formas para el trazo del plano respectivo.

Más tarde, el Codex Acerianus, uno de los manuscritos latinos más famosos escrito en el siglo VI, narra un relato sobre como el majestuoso Imperio Romano practicaba la topografía. Luego, ya en el siglo XIX, la ciencia de la topografía avanzó más rápidamente. La necesidad de mapas y la fijación de linderos nacionales e internacionales hizo que Inglaterra y Francia llevarán a cabo múltiples y extensos levantamientos, puesto que lo principal para ellos era resguardar sus fronteras. Es de esta manera como se empezaron a hacer los primeros levantamientos geodésicos.

En noviembre de 1877 nace en Suiza Heinrich Wild, un gran inventor y creador de modernos instrumentos topográficos y geodésicos. De modo que fue en esta época cuando se fabricaron los primeros teodolitos Carl Zeiss y los modelos Wild T. Finalmente, en 1979 aparece en el mercado el primer teodolito electrónico, el cual fue presentado y comercializado por la casa Kern.[2]

## 3. Historia de la topografía en Guatemala

Jorge Vélez y Claudio Urrutia fueron los encargados de la mira de tipo horizontal, luego las mediciones eran realizadas por individuos que sin conocimiento y al ojo daban por determinada el área de una lengua cuadrada. Luego se crearon los peritos en aritmética los geómetras, que ya definían a la caballería de tierra por un rectángulo de 22 cuerdas y  $36 \frac{1}{2}$  varas de largo por 11 cuerdas y  $18 \frac{1}{4}$  varas de ancho.

En 1829, el Dr. Mariano Gálvez fundó una academia de topografía, en 1873 Miguel García Granados dentro de la escuela militar ingresó el título de ingeniería topográfica. Luego, en 1882 Justo Rufino Barrios construyó la Escuela de Ingeniería con la carrera de Topografía. En la actualidad, se imparte el curso profesional agrimensor en la Escuela de Formación y Capacitación para el Desarrollo Territorial y Catastral (ESCAT). [2]

## 4. Importancia de la topografía

La topografía es muy importante dentro de varias ramas de la ingeniería, desde el área arquitectónica hasta la ingeniería eléctrica. Esto, no solo por los conocimientos y habilidades que se puedan obtener, sino también por la influencia didáctica de su estudio. Esto, por ejemplo, en la aplicación de diseños que la Ingeniería requiere, siendo la topografía la base de un diseño o futuro proyecto que se llevará a cabo.

Los proyectos de levantamiento topográfico consisten en realizar una topografía de un lugar, en otras palabras, en generar la descripción de un determinado terreno. Un levantamiento topográfico da como resultados el trazar mapas o planos, y también la descripción de las diferencias de altura de los relieves o de los elementos que se encuentran en el lugar donde se realiza el estudio. Dentro del tema de infraestructura, la topografía es vital ya que esta ha ido evolucionando con el paso del tiempo y con los avances que se han producido ayudan a las nuevas tecnologías llevar a cabo mediciones y descripciones más precisas y exactas de los terrenos. Por lo tanto, una medida mal tomada o un plano mal realizado representa graves consecuencias. [3]

Dentro de la ingeniería agrícola, la topografía tiene las siguientes aplicaciones:

- Levantamientos como trazos
- Deslindes
- Divisiones de tierra
- Determinación de área
- Levantamientos catastrales hechos con el propósito de localizar límites de propiedad y valorar los inmuebles.

Dentro de la ingeniería eléctrica se tiene como aplicaciones las siguientes:

- Levantamientos previos y los trazos de líneas de transmisión.
- Instalación de equipos para plantas nucleoelectricas.
- Construcción de plantas hidroeléctricas

En la ingeniería industrial:

- Instalación precisa de máquinas y equipos industriales
- Configuración de piezas metálicas de gran precisión

En la ingeniería mecánica:

- Para el alineamiento óptico

En la ingeniería minera:

- Cuantificaciones de volúmenes extraídos
- Levantamiento y trazo de túneles, galerías y lumbreras

En la ingeniería geológica:

- Relación de las formaciones geológicas.
- Determinación de configuraciones de cuencas hidrológicas.
- Apoyo fundamental de la fotogeología [3]

## B. Divisiones de la topografía

La ciencia de la topografía para su estudio se divide en tres partes, siendo estas: La topometría, La topología, y La planografía.

La topometría es el conjunto de operaciones efectuadas sobre el terreno o el plano para la determinación métrica de sus elementos topográficos. Estas aplicaciones han estado tomando mayor importancia, gracias a la aparición de los planos numéricos y las bases de datos topográficos.

La topología es la forma lógica de conexión de objetos en una red en un determinado espacio, es decir, estudian las leyes que rigen las formas del terreno.

La planografía por su parte es la parte de la topografía que se encarga de la representación gráfica de los resultados, lo cual constituye el dibujo topográfico.

Al llevar a cabo cada parte de las anteriormente descritas se obtiene el estudio topográfico de un terreno, sin embargo para completar el dicho estudio es necesario tener la forma general del terreno, en otras palabras, su perímetro y los detalles que el terreno contenga en su interior. La superficie del terreno completo, y la diferencia que existe en él. De esta cuenta, para poder determinar la forma completa del terreno las operaciones fundamentales que se deben ejecutar son: La planimetría, la altimetría y la agrimensura. [2]

### 1. Planimetría

Según la Real Academia Española (1987) la planimetría es la representación y medida sobre un plano de una porción de la superficie terrestre. Esta se encarga del estudio de los procedimientos y los métodos que se ponen en marcha para lograr representar a escala los detalles de un terreno sobre una superficie plana. Sin embargo, la planimetría omite del relieve y la altitud para lograr una representación en dirección horizontal. [4] Por otro lado, es bueno mencionar que la planimetría contiene un error en precisión cuando se trata de largas distancias sobre el terreno. Esto se da porque el planeta tierra no es una superficie

plana, sino que tiene una curvatura, por lo que al hacer un arco de 18.5 kilómetros de longitud sobre la superficie de la tierra se tiene 1.5 centímetros más largo que la distancia plana o la cuerda entre sus extremos. [5]

## 2. Altimetría

La altimetría o generalmente conocida como “nivelación” es un proceso muy importante para la topografía, ya que siempre es necesario obtener las elevaciones del proyecto que se esté llevando a cabo. Dentro de la altimetría existen conceptos que son necesarios conocer, entre ellos el más importante es la línea vertical. (los cuales son: la línea vertical, la superficie de nivel, las líneas de nivel y las horizontales.) La línea vertical es una línea paralela a lo que es la línea de la gravedad. Esta línea se logra ver al momento de utilizar una plomada, la línea que genera la plomada al momento de dejar de moverse es la cual se considera como línea vertical.

Por otra parte, la superficie de nivel es una superficie con elevación constante y que dentro de todos sus puntos es perpendicular a una línea a plomo. La elevación es un punto específico que tiene una determinada distancia vertical que existe arriba de este o debajo, generalmente se mide hasta una superficie de nivel que es la del nivel del mar.

Igual importancia tienen las líneas de nivel y las horizontales. La línea de nivel consiste en una línea curva sobre una superficie de nivel con todos los puntos a la misma elevación, en cambio la línea horizontal es una línea recta que es tangente a una línea de nivel en un punto dado. [5]

## C. Levantamientos

Dentro de los levantamientos existen los levantamientos geodésicos, y los levantamientos topográficos. El levantamiento geodésico es el proceso por el cual se toman puntos que se van ajustando a la curvatura de la superficie terrestre. Gracias a que se toma en cuenta la curvatura del planeta Tierra, este levantamiento se puede utilizar para áreas pequeñas o para aéreas muy grandes. La metodología para la obtención de puntos es parecida a la de la planimetría, para la elevación se expresa en distancias verticales por debajo o por encima de una superficie curva de referencia, que esto se mide respecto a el nivel medio del mar.

### 1. Tipos de levantamientos

Dentro de los levantamientos existen diferentes tipos que en este caso trabajan más por la metodología planimétrica que la geodésica. El primero es el levantamiento de terrenos, es el método más antiguo y trabaja con datos de control horizontal de los cuales se utilizan para la localización de linderos, subdivisiones de terrenos en partes pequeñas, para determinar superficies de terrenos. Esto para evitar cualquier conflicto de terrenos entre propietarios. También conocidos como levantamientos catastrales, levantamientos de propiedad, o levantamientos limítrofes.

Los levantamientos topográficos sirven para proporcionar información detallada sobre las elevaciones y la ubicación de los elementos naturales y artificiales de un terreno. Este tipo de información es requerida en los accidentes del terreno o las variaciones tridimensionales de la superficie terrestre, además de ser usado para medir relieves o para localizar objetos. Los productos finales del levantamiento topográficos son conocidos como los planos topográficos.

Por otra parte, para la construcción de vías de carreteras, vías de tren, vías de electricidad, entre otros. Es necesario un levantamiento de vías de comunicación que lo que determina es el relieve y la localización de objetos naturales y artificiales que se encuentran dentro del área donde va transitar la vía de comunicación. Además, se le puede incluir dentro del estudio la colocación de estacas, la ubicación y el cálculo de volúmenes de movimiento de tierra.

Cuando se realizan levantamientos topográficos dentro de la ciudad a estos se les llama levantamientos municipales o urbanos, los cuales describen el trazo de las calles, sistema de drenajes, entre otros. El levantamiento municipal tiene como objetivo principal el desarrollo urbano.

Los levantamientos de construcción son muy importantes para la elaboración de una estructura, ya que tiene como objetivo el establecimiento de puntos de elevación y la localización de estructuras vecinas. Este tipo de levantamiento es generalmente el más utilizado de todos los demás.

Los levantamientos hidrográficos son los que se llevan a cabo en los cuerpos de agua que se encuentran dentro del planeta Tierra, como lo son los lagos, ríos, cuencas, entre otros. Este sirve para determinar las formas de las áreas bajo las superficies de agua, así como también para establecer los costos de corriente, de uso para la navegación, control de avenidas y para el desarrollo de los recursos acuáticos. Generalmente este tipo de levantamientos los realizan las entidades gubernamentales.

Los levantamientos marítimos son los que se llevan a cabo dentro del mar. Estos son diseñados para cubrir áreas muy grandes, y en su mayoría se utilizan para la construcción de plataformas dentro del mar, donde se necesita tener los planos hidrográficos, la teoría del oleaje y elaboración de cartas.

Cuando se trata de la obtención de posiciones y elevaciones relativas de túneles subterráneos, formaciones geológicas, tiros y galerías, entre otros; se refiere a los levantamientos de minas. Estos tienen como objetivo realizar cuantificaciones y establecer líneas y pendientes de los trabajos a ejecutar. Los levantamientos forestales y geológicos son los más comunes. Estos se utilizan para determinar la madera en pie, establecimientos de límites y son una herramienta muy útil para la elaboración de mapas geológicos.

Los levantamientos fotogramétricos son aquellos que se realizan por medio de fotografías aéreas, con el uso de avionetas, helicópteros o lo que se utiliza hoy en día, los vehículos aéreos no tripulados conocidos como “drones”. Estas fotos se toman junto con los levantamientos limitados del terreno, también llamados como puntos de control. La ventaja de este tipo de levantamiento es la rapidez con la que se puede llevar a cabo, además de otros beneficios, entre ellos la facilidad de hacer un levantamiento en terrenos poco accesibles. Por otra parte, existen los levantamientos de obra terminada que se realizan al concluir un proyecto de construcción, teniendo como objetivo determinar las posiciones y dimensiones finales de

los elementos del proyecto, ya que además de brindar las características geométricas también ayudan para comprobar que el trabajo se efectuó de acuerdo con el diseño. [5]

## **2. Equipo moderno de topografía**

Conforme pasan los años los equipos de topografía han ido cambiando, y cada vez se convierten en herramientas más precisas y más eficaces. El primer avance se dio en 1960 cuando se generalizó la utilización de instrumentos de medición electrónica de distancias. Luego, el siguiente avance se alcanzó cuando se combinaron los dispositivos para medición angular con instrumentos electrónicos, creando así las estaciones totales.

Por otro lado, también se desarrollaron los colectores automáticos de datos para las estaciones totales. Estos podían utilizarse para almacenar mediciones, hacer cálculos y transferir o descargar los valores de las mediciones en computadora o graficadores. Por lo que entonces ya se podían llevar estas mediciones al campo donde se iban a utilizar.

Gracias a estos desarrollos vinieron otras increíbles herramientas como lo son los famosos Sistemas de Posicionamiento Global, también conocidos como “GPS” (Global Positioning System, por sus siglas en Inglés), ya que son sistemas que obtienen posicionamientos horizontales y verticales de puntos sobre la superficie terrestre a partir de señales de radio transmitidas desde satélites en órbita. [5]

## **3. Mantenimiento del equipo**

Es de suma importancia el mantenimiento de los equipos topográficos ya que se pueden ir descalibrando conforme se van utilizando en el campo. De modo que, a pesar que estos equipos son fabricados con mucho cuidado y precisión, siempre es bueno realizar una calibración previa al uso del equipo y revisar el estado del mismo con cierta frecuencia. [5]

## **D. Productos generados por la topografía**

Como resultados de la topografía de una determinada área se obtienen lo que son datos, generalmente gráficos del terreno. Estos son conocidos como: Mapas topográficos y planos topográficos.

### **1. Mapas base o mapas topográficos**

Se le llama mapa a una superficie terrestre o de una parte de ella en una superficie plana. Las características principales de un mapa son tres. a) Los mapas son una representación reducida, con una determinada escala del territorio; b) Dentro de un mapa no se encuentran todos los detalles, en este solamente aparecerán los que se consideren importantes por el contratado; y c) Un mapa es una representación esquemática, de manera que utiliza signos convencionales para indicar todos los detalles representados. [6]



Dentro de la ingeniería civil, generalmente se utilizan los mapas topográficos estos mapas son un tipo de gráfico que se caracteriza por representar el relieve con un nivel de detalle a gran escala, donde se grafican las curvas de nivel. Las curvas de nivel son líneas que se encuentran dentro del mapa que contienen información que permite conocer la topografía de la zona por la que se realice el mapa. Por otro lado, los mapas topográficos también vienen acompañados del sistema de coordenadas para saber ubicar de manera precisa cualquier punto en el mismo. En Guatemala, existen diferentes entidades públicas y privadas que realizan este tipo de mapas, sin embargo uno de las más conocidas es el Instituto Geográfico Nacional (IGN).

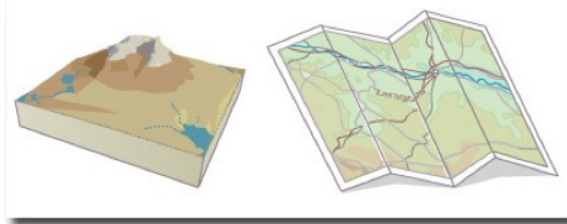


Figura 1: Representación de superficie en mapa topográfico[7]

De forma general, los mapas se pueden clasificar desde dos puntos de vista: a) Según la escala de trabajo o según el propósito general; y b) Topográfico y particular o temático para el que ha sido creado. Los mapas temáticos o también conocido como de propósitos particulares son aquellos que tienen como objetivo localizar características o fenómenos particulares de un terreno. El contenido puede abarcar diversos aspectos: desde información histórica, política o económica, hasta fenómenos naturales como el clima, la vegetación o la geología. El mapa base utilizado en la elaboración de los mapas temáticos es el topográfico o de propósito simplificado. [7]

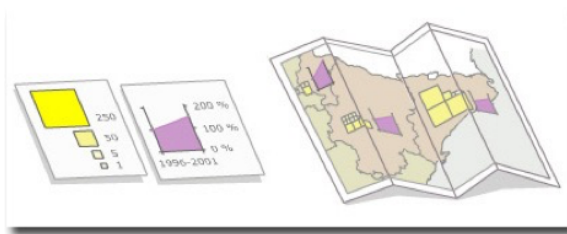


Figura 2: Mapa temático[7]

A partir del siglo XVIII, los cartógrafos, que antes solo se habían centrado en el estudio del conocimiento geográfico del mundo, comenzaron a plasmar en los mapas datos sociales y científicos, dando lugar al nacimiento de la cartografía temática.

Los elementos imprescindibles que deben aparecer en todos los mapas son dos: la escala utilizada y la leyenda. [7]

### Según la escala de trabajo

- Mapas de pequeña escala: Son los mapas que representan amplias zonas de la superficie terrestre, por lo que es imprescindible tener en cuenta la esfericidad de la Tierra. En

estos mapas el nivel de detalle es pequeño.

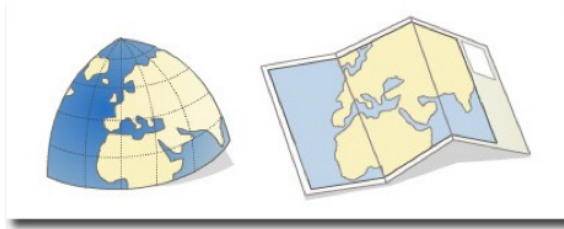


Figura 3: Mapa de pequeña escala[7]

Se denominan mapas de pequeña escala a los que tienen una escala menor de 1:100.000. Algunos ejemplos de este tipo de mapas son los que representan países, continentes, hemisferios, etc. [7]

- Mapa de gran escala: Son los que representan pequeñas zonas de la Tierra. En estos mapas el detalle de los elementos cartografiados es mayor.

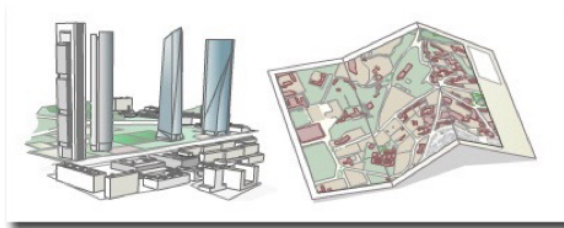


Figura 4: Mapa de gran escala[7]

Se suelen llamar mapas de gran escala aquellos de escala mayor de 1:10.000. Se denominan planos a partir de 1:2.000 al no considerar la esfericidad de la Tierra.

Los elementos imprescindibles que deben aparecer en cualquier tipo de mapas son dos: la escala utilizada y la leyenda. Con la escala se consigue aclarar la relación métrica entre el mapa y la realidad que representa, mientras que con la leyenda se facilita al usuario la interpretación correcta de los símbolos que aparecen en el mapa. Sin embargo, se pueden añadir otros elementos y otros datos en los márgenes del mapa. En las normas cartográficas específicas se establecen y fijan su posición y características, que se mantendrán en los mapas de una misma serie. [7]

Portada del mapa: En el MTN50, el color y los elementos específicos de la portada son los que identifican la serie.

Situación, divisiones administrativas y términos municipales: Una vez plegado el mapa, en la contraportada aparecen una serie de elementos como el gráfico de hojas colindantes, gráfico de divisiones administrativas y lista de términos municipales.

Escala, proyección y elipsoide: En el margen inferior de la hoja aparecen, entre otros, los datos de escala, la proyección, el sistema de coordenadas, el elipsoide de referencia y el sistema de altitudes.

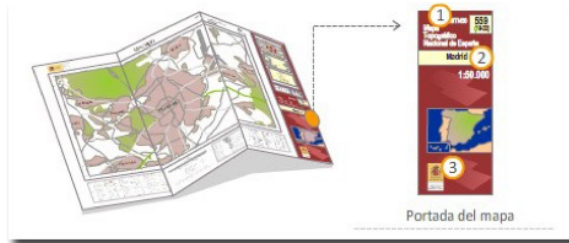


Figura 5: Nombre oficial de la serie [7]

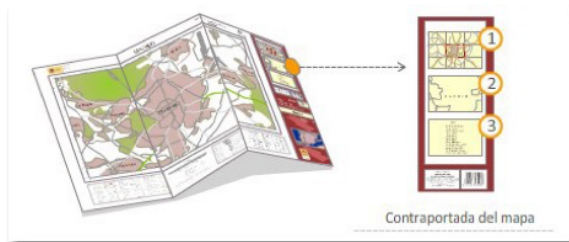


Figura 6: Gráfico de hojas colindantes [7]

Portada del mapa: Alrededor del mapa se sitúa un marco de coordenadas, y sobre el mapa aparece dibujada una cuadrícula.

Toponimia y vértices geodésicos: En el margen inferior derecho aparece un cuadro con la toponimia, así como una lista de los vértices geodésicos que aparecen en la hoja.



Figura 9: Toponimia [7]

Leyenda:

En el margen inferior izquierdo se sitúa la lista explicativa que define con detalle y sin lugar a equívoco todos los signos convencionales utilizados en el mapa.

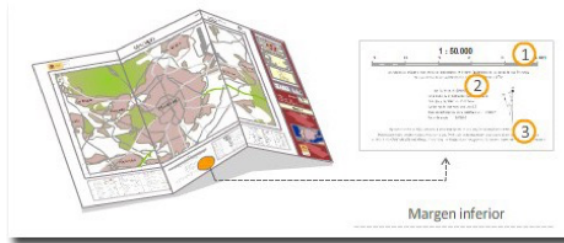


Figura 7: Escala numérica y gráfica del mapa. [7]

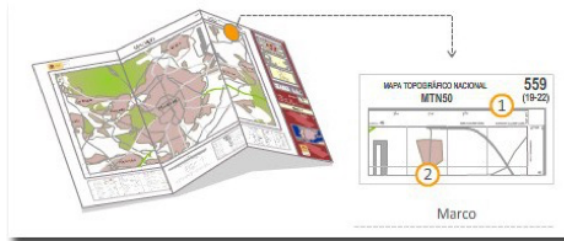


Figura 8: Marco de referencia[7]



Figura 10: Lista de elementos lineales como carreteras[7]

## 2. Planos topográficos

Los planos topográficos contienen dentro de ellos una gran cantidad de información. Dentro de la información que se puede obtener del mapa está la siguiente:

- Núcleos de población y construcción aisladas.
- Hidrografía (costas, ríos, arroyos, entre otros)
- Vías de comunicación (caminos, carreteras, y ferrocarriles)
- Vegetación
- Límites administrativos
- Toponimia
- Coordenadas

Para la representación de todos estos datos se utiliza una representación simplificada de los mismos, los cuales son conocidos como “símbolos convencionales.” Estos signos generalmente son los mismos en todos los mapas aunque puede existir variación en las figuras. Sin embargo, se intenta que su interpretación sea simple, de manera que el lector del mapa pueda comprender la información contenida en el con un simple vistazo que le haga. Luego, para informar al lector de los símbolos convencionales que se han usado en el mapa se hace un esquema de los mismos al margen del mismo. Este esquema o resumen de los logos usados se llama “leyenda” o información marginal. Esta leyenda sirve para comenzar el análisis del mapa, ya que con esta información el lector sabrá qué información es la que va a encontrar en el mapa. [6]

### Núcleos de población y construcciones aisladas

Dentro de los mapas se indican los núcleos de población como ciudades, pueblos, o pequeñas aldeas, así como construcciones que suelen parecer aisladas, como lo son cortijos, cabañas, ermitas, castillos, entre otros.

Las localidades con mayor número de habitantes suelen ser representadas mediante un vago esquema llamado “casco urbano”. Los pueblos más pequeños se indican mediante un conjunto de “edificaciones aisladas”, entre las que suelen destacar algunas particulares como iglesias o el de cementerios.

En la siguiente figura se muestran algunos símbolos que se utilizan generalmente para los núcleos de población y construcciones aisladas en los mapas topográficos.



Figura 11: Símbolos para los núcleos de población y contrucciones aisladas [6]

Además, algunas poblaciones se indican mediante unas cifras la altitud sobre el nivel a la que se sitúan. Para determinar la altitud se suele tomar algún edificio de referencia relevante, normalmente la iglesia. En este caso particular se representa la iglesia en el interior de un triángulo. Este triángulo hace referencia a lo que se llama vértice geodésico. Por lo tanto, junto a la población se indica el nombre del establecimiento. Esta se rotula con una tipografía en relación al número de habitantes que posee, ya que esto define en menor o mayor medida su importancia. [6]

## Hidrografía

Dentro de los mapas hidrográficos se encuentran datos importantes en la zona. Donde se encuentren los cursos de aguas superficiales de carácter natural como los son los ríos, arroyos, pozas, así como también los de carácter artificial como los canales o las acequias.

Por otro lado, cabe hacer énfasis que en este tipo de mapas se tiene una variante significativa, puesto que los caudales que contienen los fluidos de agua tienen a disminuir por efectos naturales como lo son las condiciones estacionales. En otras palabras, en época estival o calurosa podremos no encontrar un arroyo donde el mapa parece señalarlo. Por lo que, para graficar este tipo de fluido de agua se utiliza un trazo discontinuo que deja claro que no siempre está.

Las láminas de agua también se reflejan sobre el mapa, estas se dividen en dos tipos: las masas de agua naturales y las masas de agua artificiales. Dentro de las masas de agua natural se encuentran los lagos o lagunas, a diferencia de las artificiales donde se encuentran los embalses o presas. Para los embalses aparecerá indicado la posición de su presa mediante una línea negra, como también, su altitud sobre el nivel del mar a la que se sitúa la lámina de agua estando el embalse en su nivel medio. Además, en los mapas se encuentran graficadas las construcciones. Por ejemplo, los puentes que cruzan los ríos anchos, graficar esta construcción es de mucha importancia ya que es el único acceso para pasar estos ríos. [6]



Figura 12: Signos convencionales hidrográficos [6]

## Carreteras, caminos y ferrocarriles

Las carreteras, caminos y ferrocarriles permiten comunicar los núcleos de población, así como también en otros casos permiten dar acceso a determinados lugares como fincas, la presa de un embalse, un refugio forestal en el bosque o la cumbre de una montaña. Las carreteras se pueden clasificar según la importancia, lo que permite catalogar distintas categorías. Autopista, autovías, carreteras nacionales, carreteras comarcales, carreteras locales y caminos vecinales. Sobre estas carreteras pueden aparecer ciertos elementos constructivos como los puentes o las gasolineras, los que también suelen señalizarse.

Para los caminos se suele usar una línea fina continua y una fina discontinua. En el primer caso se suele hacer referencia a un camino carretil como una parcelaria, una pista

de grava o incluso revestida de hormigón. La línea discontinua evidencia, en principio, un camino forestal en peores condiciones que el anterior. Suelen ser caminos usados para las labores de explotación del bosque. En muchas ocasiones estos caminos se cierran y acaban convertidos en estrechas sendas que invadidas por la vegetación tienden a desaparecer de no ser usadas por montañeros y cazadores.

La apertura de nuevas pistas forestales en las montañas es, por desgracia, una realidad. Por ello, no podemos esperar que todas ellas se plasmen en un plano no actualizado. Además, estas nuevas pistas, que suelen tener mejores trazados, sustituyen a otras antiguas, en peor estado, que quedan en desuso. Esto significa que la red de caminos en una montaña sometida a una explotación forestal puede ser bastante extensa y muy confusa para el caminante que la recorre, que no podrá encontrar en el mapa la salida a su particular laberinto.



Figura 13: Símbolos convencionales [6]

La categoría de la carretera se establece mediante un símbolo en cuyo interior figura la denominación numérica de la vía. También es interesante fijarse en la anchura del carril. Como puede comprobarse, la información acerca de las carreteras que contiene un mapa topográfico es superior a la de un mapa de carreteras convencional.

Por otro lado, en los mapas se puede indicar de una forma muy precisa el trazado de los ferrocarriles, ya que se puede indicar en el mismo sus diversos elementos como estaciones, apeaderos o túneles. También aparecen los mojones que marcan los kilómetros de la vía.

## Vegetación

Existen mapas que su fin es describir de forma precisa la vegetación de una zona. Los mapas topográficos solo pretenden mostrar, en el mejor de los casos, el uso general del suelo o simplemente, una simple idea de la situación de las principales masas forestales. Para ello se emplean símbolos gráficos de color verde, con la forma de un árbol característico.

La vegetación que se instala de forma natural sobre las vertientes septentrionales y me-

ridionales de una montaña suelen ser en muchos casos bastante distinta, y puede ser fundamental para llevar a cabo una travesía con éxito por la montaña. Pongamos el ejemplo que en el Norte peninsular los bosques que sufren una mayor influencia atlántica, sobre las vertientes septentrionales, suelen ser más fáciles de recorrer que los bosques y laderas de influencia más mediterránea, instalados sobre las vertientes meridionales, con más sotobosque.

Finalmente, se puede indicar que en tono verde también se suelen representar los cortafuegos, estas son cicatrices sobre las montañas, que a menudo pueden constituir una vía rápida para desplazarse de un lugar a otro en una montaña.



Figura 14: Símbolos para la vegetación presente en el área.[6]

## Límites administrativos y datos estadísticos

Los diferentes tipos de límites administrativos aparecen representados con trazos formados por líneas y cruces. De mayor a menor entidad estos límites son:

- Fronteras internacionales
- Límites provinciales
- Límites municipales

Normalmente en el enclave físico de estos límites se encuentra una señal característica como mojones de piedra y alambradas, los cuales indican al caminante de manera irrefutable que se sitúa sobre uno de estos límites. Lo cierto es que asociar un límite municipal con una alambrada de tipo ganadera es de lo más común. [6]

## Toponimia

Los núcleos de población, los montes, los valles o los ríos, tienen un nombre propio conocido como “topónimo.” Cuando estos nombres se aplican a extensiones grandes o accidentes relevantes se puede hablar de un “macrotopónimo.” Además, existe lo que se denomina “microtoponimia”, la cual se aplica a parajes o lugares de mucha menor entidad. Tal es el caso





Figura 15: Trazos usados para marcaje de diferentes tipos de límites administrativos.[6]

de una casería aislada, una cima en una sierra, arroyo, paraje, un barranco o una finca. En general, al lugar donde se aplica un topónimo menor se suele llamar “término.”

En el caso de los nombres de núcleos de población hay que indicar que se sigue la costumbre de rotular con letras de mayor tamaño las localidades con mayor número de habitantes. Algunos mapas muestran esta correspondencia entre tipografía y habitantes. [6]

## E. Ciencias y términos relacionados con la topografía

### 1. Agrimensura

La agrimensura, o también conocida como geomántica, es una subdivisión de la geodesia, la cual es la ciencia que ayuda a determinar la forma y el tamaño de nuestro planeta Tierra. Además, busca determinar la forma, el tamaño y la posición de porciones de terreno más pequeños como solares de propiedad. Esta ciencia requiere una amplia preparación en el área de matemáticas y una especialización en ciencias.

En otras palabras, la agrimensura es la aplicación práctica de la geometría del espacio y el plano. Lo cual, para esta subdivisión se ejecutan trabajos de localización de propiedades y de construcción, mapas, fotografías aéreas, planificación de desarrollo y reconstrucción. Para todas estas tareas el uso de la tecnología, como las computadoras, son vitales.

Además, dentro de la agrimensura se tienen como herramienta los Sistemas de Información Geográfica, también conocidos como “GIS” (Geographical Information System, por sus siglas en Inglés) y Sistemas de Posicionamiento Global, también conocidos como “GPS”, (Global Positioning System, por sus siglas en Inglés), dos sistemas muy importantes para la ejecución de la agrimensura. [8]

### 2. Geofísica

La geofísica es la ciencia que estudia la composición, estructura interna y los procesos de la evolución de la Tierra. La edad aproximada de la Tierra es de 4.650 millones de años, este dato fue calculado gracias a modernos métodos de datación radiométrica. Puede asumirse que esta edad corresponde al enfriamiento más antiguo, y en este sentido, se ha podido

establecer que la Tierra conforma un conjunto de cuerpos celestes con el resto del Sistema Solar.

Se denominan “Eras” a grandes lapsos de tiempo caracterizados por cambios geológicos y por la aparición y evolución del tipo de vida orgánica que existía en el planeta Tierra. La primera era que se establece es el Criptozoico o Precámbrico, que se divide a su vez en Proterozoico y Arqueozoico. La aparición de la vida, hace 2.500 millones de años, da origen al Fanerozoico o Cámbrico que se divide en Paleozoico, Mesozoico y Cenozoico.

Las “eras” se dividen en períodos que corresponden en general a importantes perturbaciones de la corteza terrestre, y a su vez se subdividen en unidades menores llamadas “épocas.” La primera gran clasificación dividía al Cámbrico en las eras Primaria, Secundaria, Terciaria y Cuaternaria. Las últimas dos se engloban hoy en la era Cenozoica y sus tiempos han pasado a considerarse períodos. El resto de períodos se denominan con el nombre de la región donde fueron reconocidas las rocas de esa edad: Jurásico, Pérmico, Devónico, Cámbrico, Silúrico y Ordovícico. En otros casos el nombre se debe a la roca más típica de ese periodo en una región determinada.

ERA	PERIODO	EPOCA	AÑOS	FORMAS DE VIDA	
CENOZOICO	Cuaternario	Reciente	10,000	Humanóides	
		Pleistoceno	2,500,000		
	Terciario	Plioceno	12,000,000	Mamíferos, plantas superiores	
		Mioceno	26,000,000		
		Oligoceno	38,000,000		
		Eoceno	54,000,000		
	Paleoceno	65,000,000			
MESOZOICO	Cretácico		135,000,000		
	Jurásico		195,000,000	Dinosaurios y Aves	
	Triásico		225,000,000	Dinosaurios y Mamíferos	
PALEOZOICO	Pérmico		280,000,000	Reptiles Helechos	
		Carbonifero			320,000,000
			Misisipi	345,000,000	
	Devónico		395,000,000	Anfibios e Insectos	
	Silúrico		430,000,000	Plantas	
	Ordovícico		500,000,000	Peces	
PRECAMBRICO	Cámbrico		570,000,000	Bivalvos	
			700,000,000	Algas, cuerpos blandos	
			700,000,000	Organismos Unicelulares	
			2,500,000,000	Aparece la vida	
			4,650,000,000+	Formación de la Tierra	

Figura 16: Escala de tiempos geológicos[9]

Dentro de la geofísica se encuentra el estudio de minerales y rocas, que es un detalle importante en el momento de una construcción ya que se tiene que conocer el material que va a sustentar toda la obra. Por lo tanto, “roca” se le llama a una asociación de minerales o partículas de otras rocas de la corteza terrestre, ensambladas entre sí. Por su origen, pueden quedar condicionadas a la resistencia en superficie: Las hay duras, frágiles, compactas. La Petrología trata de las rocas y sus génesis. Las rocas estas constituidas por minerales que son el resultado de la combinación de átomos e iones de distintos elementos. Estos minerales pueden estar presentados en dos estados: a) Estado Cristalino: es el estado en donde la materia se encuentra organizada formando una red. Solo existe en los sólidos. Los cristales tienen forma y propiedades físicas y ópticas propias características; y b) Estado amorfo: es el estado en donde la materia se encuentra sin ordenamiento. Existe en sólidos, líquidos y vidrios.

Las rocas pueden estar formadas tanto por varios minerales como por uno solo, en estado cristalino o amorfo, y en su forma original o en fragmentos. Lo que caracteriza a la roca es la disposición de sus minerales, pues de ello dependen sus propiedades. La división de las

rocas respecto a su origen general es la siguiente: [9]

- Rocas ígneas: Estas rocas fueron formadas por el enfriamiento y posterior solidificación de masas de rocas fundidas conocidas como magma. Estas todavía se están produciendo por todos los volcanes activos que existen. Las rocas plutónicas de grano grande como el granito y la sienita fueron formadas desde un magma muy profundo en la corteza de la Tierra, y se enfriaron muy lentamente permitiendo la formación de minerales con cristales bien desarrollados. Las rocas volcánicas como el basalto y la riolita.
- Rocas sedimentarias: Son los restos de otros tipos de rocas que tuvieron lentos procesos de erosión y fueron luego transportados por el agua, el viento o el hielo a lugares más bajos, lagos o mares, donde se depositaron. Cuando las partículas de la erosión son transportadas, los granos se desgastan, redondean y agrupan de acuerdo a su tamaño según la energía que los afecte. En el mar se asientan en el fondo en la forma de un barro arenoso. Después se endurecen y se forman las rocas sedimentarias. Durante este proceso es que quedan atrapados materiales orgánicos que luego dan lugar a la formación de petróleo o gas. También se les llama rocas exógenas y endógenas, según sean formadas en la superficie terrestre o en el interior de la corteza. Cuando se depositan en el lecho marino contienen abundante carbonato de calcio por las algas, corales y conchas que forman luego las calizas, rocas compuestas principalmente de calcita. Una variedad importante de estas son las dolomitas, donde el mineral básico es el carbonato de calcio y magnesio. La evaporación intensa del agua da lugar a las rocas conocidas como evaporitas que pueden alcanzar espesores considerables e incluyen la anhidrita, el yeso, las rocas de sal, y eventualmente las rocas de potasio. Las cuencas sedimentarias son depresiones de la superficie terrestre que hace cientos de millones de años fueron rellenadas por material erosionado.
- Rocas metamórficas: Son aquellas cuya composición y textura han sido modificadas a profundidades de la corteza de la Tierra. Los factores físicos que controlan los procesos metamórficos son la presión y la temperatura. El metamorfismo termodinámico, o regional, se refiere a aquellas rocas donde tanto el calor como la presión le han producido cambios. Cuando estos cambios son solo provocados por el calor se le llama metamorfismo térmico o de contacto, y se supone que es producido por una intrusión magmática. El metamorfismo ocurre para todo tipo de rocas, incluso las mismas metamórficas. Por ejemplo, la lutita es metamorfoseada como una pizarra en un ambiente de baja temperatura, pero si hay altas temperaturas, las arcillas se recristalizan como mica y las lutitas como filitas. A más altas temperaturas y presiones, las lutitas se recristalizan formando esquitos o gneis, rocas en las cuales el alineamiento de las escamas de mica producen una textura laminada llamada foliación. Entre las rocas metamórficas no foliadas, las cuarcitas y el mármol son las más comunes. La cuarcita es una roca dura y de color suave, en el cual los granos de arena de una roca sedimentaria han sido recristalizados formando granos de cuarzo. El mármol es una roca más blanda, frágil y colorida, en el cual la dolomita y la calcita han sido totalmente recristalizadas. [9]

### Estructuras tectónicas

La actividad dinámica de la Tierra formó diferentes tipos de estructuras geológicas. Las más frecuentes son las fallas, pliegues, y las diaclasas.

- Fallas: Son fracturas que se presentan en las rocas, a lo largo de las cuales ha tenido lugar un movimiento o desplazamiento. Este movimiento produce un plazo o zona de falla, que puede alcanzar un ancho que va desde milímetros hasta unos cientos de metros, y producen algunas estructuras o rocas llamadas estrías, brechas de falla y diaclasas plumosas. Según la dirección del desplazamiento se pueden distinguir dos grandes grupos de fallas. Este tipo de ruptura de la corteza es frágil y tiene lugar en niveles superficiales hay otras deformaciones en profundidades entre los 8 y 12 km que las rocas deforman sin cortarse.



Figura 17: Sistema de fallas normales en sedimentos muy finos.[9]

- Pliegues: Los pliegues son ondulaciones o inflexiones que presentan las capas sedimentarias cuando son sacadas de su posición natural, la horizontal, por los agentes orogénicos o fuerzas que generan deformaciones plásticas en las rocas. También ocurren en las rocas metamórficas y generan deformaciones plásticas en las rocas. También ocurren en las rocas metamórficas y en rocas ígneas. Los pliegues constan de los siguientes elementos:
  - Charnela: Es la línea que une los puntos de máxima o mínima altura en cada capa, es decir, representa la máxima curvatura del pliegue, donde los estratos cambian el buzamiento. Un pliegue puede tener más de una charnela o ninguna.
  - Plano axial: Es aquel que une las charnelas de todas las capas de un pliegue, es decir, el que divide el pliegue tan simétricamente como sea posible.
  - Eje axial: Es la línea que forma la intersección del plano axial con la charnela.
  - Flanco: Corresponde a los planos inclinados que forman las capas, o sea, los laterales del pliegue, situados a uno y otro lado de la charnela.
  - Cresta: Es la línea que une los puntos más altos de un pliegue.
  - Valle: Es la línea que une los puntos más bajos de un pliegue.
  - Núcleo: Es la parte más interna de un pliegue.
  - Dirección: Es el ángulo que forma la línea de intersección del estrato con el plano horizontal, tomado con respecto del polo norte magnético.

- Buzamiento o inclinación: Es el ángulo que forma el plano del estrato con la horizontal. Existen diferentes tipos de pliegues según la edad de los estratos envolventes.
- Pliegues anticlinales: Se forman cuando los estratos más nuevos envuelven a los más antiguos. Presentan la parte convexa hacia arriba y tienen el aspecto de una bóveda. Los flancos se inclinan en sentido divergente y los estratos más antiguos están en el núcleo.
- Pliegues sinclinales: Se forman cuando los estratos más antiguos envuelven a los más jóvenes. Sus flancos forman una U característica y tienen la convexidad hacia el interior de la Tierra, tomando una forma de cuenca o cubeta. Los flancos se inclinan en sentido convergente y los estratos más jóvenes están en el núcleo. [9]

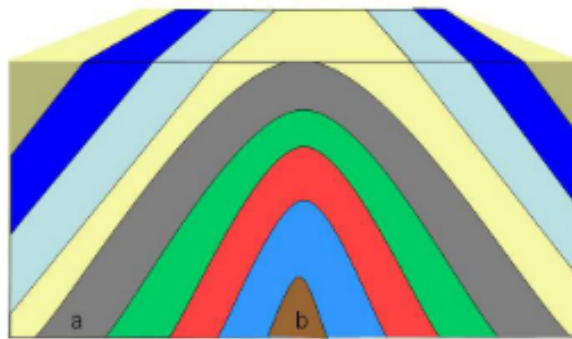


Figura 18: Pliegues anticlinales[9]

### 3. Geodesia

La geodesia es la ciencia que estudia la forma y dimensiones de la Tierra. Esto incluye la determinación del campo gravitatorio externo de la tierra y la superficie del fondo oceánico, así como también la orientación y posición de la tierra en el espacio.

Una parte fundamental de la geodesia es la determinación de la posición de puntos sobre la superficie terrestre mediante las siguientes coordenadas: latitud, longitud, y altura. La materialización de estos puntos sobre el terreno constituyen las redes geodésicas, conformadas por una serie de puntos (vértices geodésicos o también señales de nivelación), con coordenadas que configuran la base de la cartografía de un país, por lo que también se dice que es “la infraestructura de las infraestructuras”.

Los fundamentos físicos y matemáticos necesarios para su obtención, sitúan a la geodesia como una ciencia básica para otras disciplinas, como la topografía, fotogrametría, cartografía, ingeniería civil, navegación, sistemas de información geográfica, sin olvidar otros tipos de fines como los militares.

Desde el punto de vista del objetivo de estudio, se puede establecer una división de la geodesia en diferentes especialidades, aunque cualquier trabajo geodésico requiere la intervención de varias de estas subdivisiones: Geodesia geométrica, geodesia física, astronomía geodésica, geodesia espacial, y microgeodesia. [10]

- Geodesia física: Ciencia que estudia el campo gravitatorio de la Tierra y sus variaciones, mareas y su relación con el concepto de altitud.
- Geodesia geométrica: Ciencia que estudia la determinación de la forma y dimensiones de la Tierra en su aspecto geométrico, lo cual incluye fundamentalmente la determinación de coordenadas de puntos en su superficie.
- Astronomía geodésica: Ciencia que estudia la determinación de coordenadas en la superficie terrestre a partir de mediciones a los astros.
- Geodesia espacial: Ciencia que estudia la determinación de coordenadas a partir de mediciones efectuadas a satélites artificiales u otros objetos naturales o artificiales exteriores a la Tierra (GNSS, VLBI, SLR, DORIS) y la relación con la definición de sistemas de referencia.
- Microgeodesia: Ciencia que estudia medición de las deformaciones en estructuras de obra civil o pequeñas extensiones de terreno mediante técnicas geodésicas de alta precisión.

La figura “natural” de la Tierra, excluyendo la topografía o forma externa, se asemeja a la definición de geoide, definida como una superficie de nivel equipotencial del campo gravitatorio terrestre.

Esta superficie equipotencial o de nivel materializado por los océanos cuando se prescinde del efecto perturbador de las mareas (casi la superficie del nivel medio de los mares) es la superficie de referencia para la altitud. Por la complejidad matemática del geoide, así como su definición, la superficie de la Tierra puede representarse con mucha aproximación mediante un elipsoide de revolución, definiéndose este sistema con: [10]

- Superficie de referencia: Estableciendo sus dimensiones
- Ejes o líneas de referencia en la superficie
- Sentidos de medida

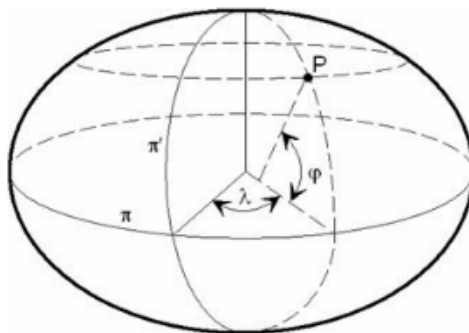


Figura 19: Sistema de fallas normales en sedimentos muy finos.[10]

Sobre esta superficie se definen las coordenadas geodésicas:

- Latitud geográfica ( $\phi$ ): Ángulo medido sobre el plano ecuatorial entre el meridiano origen y el plano meridiano que pasa por P.
- Longitud geográfica ( $\lambda$ ): Ángulo medido sobre el plano ecuatorial entre el meridiano que contiene al punto ente el plano ecuatorial y la normal al elipsoide en P.

El elipsoide de revolución que mejor se adapte al geoide en la zona con un punto donde ambos coinciden o bien la normal a ambos es la solución adoptada, constituyendo el concepto de Sistema Geodésico de Referencia. A lo largo de la historia diversos elipsoides se han utilizado para definir el Sistema de Referencia de cada país, de tal forma que se define aquel que mejor se ajuste al geoide.

En geodesia existen dos Datum: el horizontal y el vertical, siendo este último la superficie de referencia respecto a la que se definen las altitudes. En este caso, lo más normal es que sea el geoide. [10]

El European Datum 1950 (ED50) Hayford propuso en 1924 en la Asamblea Internacional de Geodesia y Geodésica un Elipsoide Internacional de Referencia con  $a= 6378388$  m  $\alpha = 1/297$ . Este elipsoide fue utilizado ampliamente por la mayoría de países, no siendo perfeccionado hasta 1964, donde la Unión Astronómica Internacional en Hamburgo estableció unos nuevos valores de  $a = 6378160$  m  $\alpha = 1/298,25$

En la orientación de este sistema se estipula

- El eje menor del elipsoide de referencia es paralelo a la dirección definida por el origen internacional convencional para el movimiento del polo
- El meridiano de referencia es paralelo al meridiano cero adoptado por el BIH para las longitudes. [10]

El World Geodetic System 1984 (WGS84)

Desde 1987, el GPS utiliza el World Geodetic System, que es un sistema de referencia terrestre único para referenciar las posiciones y vectores. Se estableció este sistema utilizando observaciones Doppler al sistema de satélite de navegación GNSS o Transit, de tal forma que se adaptara lo mejor posible a toda la Tierra.

Se define como un sistema cartesiano geocéntrico del siguiente modo:

- Origen, centro de masas de la Tierra, incluyendo océanos y atmósfera.
- Eje Z paralelo a la dirección del polo CIO o polo medio definido por el BIH, época 1984.0 con una precisión de 0,005".
- El eje X como la intersección del meridiano origen, Greenwich, y el plano que pasa por el origen y es perpendicular al eje Z. El meridiano de referencia coincide por el meridiano cero del BIH en la época 1984.0 con una precisión de 0,005". Realmente el ,meridiano origen se define como el IERS Reference Meridian (IRM).
- El eje Y ortogonal a los anteriores, pasando por el origen.[10]

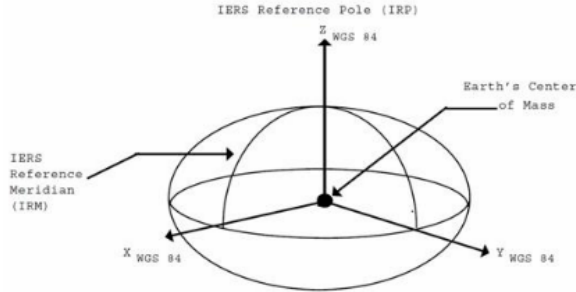


Figura 20: Definición de WGS84[10]

Marcos y Sistemas de Referencia Terrestres: El International Terrestrial Reference Frame (ITRF)

Para conseguir una realización práctica de un marco geodésico global de referencia se tiene que establecer una serie de puntos con un conjunto de coordenadas. Un conjunto de puntos consistentes inferen:

- La localización de un origen
- La orientación del sistema de ejes cartesianos ortogonales.
- Una escala.

En términos modernos, un conjunto de estaciones con coordenadas bien determinadas constituyen o representan una realización de un Marco de Referencia Terrestre, también conocido como “TRF” (Terrestrial Reference Frame, por sus siglas en Inglés). Como consecuencia de estos efectos temporales se definen los sistemas y marcos de referencia terrestres. [10]

Los Sistemas European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89) y REGCAN95

La subcomisión de la Asociación Internacional de Geodesia (IAG, por sus siglas en Inglés), para el marco de referencia europeo (EUREF), recomendó que el Sistema de Referencia Terrestre para Europa que debía ser adoptado, fuera el denominado European Terrestrial Reference System 1989 (ETRS89)[10]

#### 4. Cartografía

La Tierra y su representación en el plano Para el ser humano siempre ha sido necesario representar la superficie terrestre y los elementos situados sobre ella. De esta inquietud por conocer el mundo que les rodea surgieron los mapas. Con la representación de la Tierra aparecen dos problemas a considerar:

Forma: la superficie de representación es plana; la Tierra no lo es.

- La Tierra es un cuerpo tridimensional con aspecto cercano a la esfera, achatada por los polos y ensanchada por el Ecuador, semejante a una figura geométrica denominada elipsoide.



- La forma real de la Tierra es un geoide cuya superficie irregular coincide con la que resultaría al prolongar por debajo de las superficies continentales, los mares y océanos en calma.
- Conocer con exactitud el geoide es complicado; para facilitar los cálculos, en cartografía se simplifica la forma de la Tierra asemejándola a un elipsoide o a una esfera regular, figuras geométricas cuya formulación matemática es perfectamente conocida. [7]

Dimensiones: mayores de las que pueden emplearse para su representación

- Es evidente que ningún caso es posible la representación de la Tierra a tamaño real, por lo que se debe plantear una relación entre una distancia sobre el mapa y su correspondiente sobre la superficie terrestre: la escala.
- En resumen, la primera cuestión, la forma, se soluciona mediante los métodos de proyección cartográfica, mientras que la segunda, las dimensiones, conduce al concepto de escala. Estos dos factores hacen posible la relación entre el mapa y la realidad, es decir, condicionan la representación de cualquier mapa. [7]

## Las proyecciones cartográficas

La representación de la superficie terrestre sobre una superficie plana, sin que haya deformaciones, es geoméricamente imposible. En cartografía, este problema se resuelve mediante las proyecciones. Así, una proyección cartográfica es una correspondencia biunívoca entre los puntos de la superficie terrestre y sus transformados en el plano llamado plano de proyección.

Este método consiste en establecer una radiación de semirrectas a través de un punto, llamado vértice de proyección; en consecuencia se consigue así una correspondencia entre cada punto interceptado en la esfera y su homólogo en el plano cortado por la misma semirrecta.

Las proyecciones tampoco evitan ciertas distorsiones que, según como se proyecten, pueden afectar a la forma, al área, a las distancias o a los ángulos de los elementos representados, y es aquí donde surge otro aspecto importante de la cartografía: decidir qué proyección se va a utilizar para minimizar esas distorsiones. Las proyecciones admiten diversas clasificaciones dependiendo de las cualidades, fundamentos, y propiedades.

- En función de las cualidades métricas
- En función de las cualidades proyectivas.

Otro grupo importante de proyecciones lo constituyen las diseñadas para poder representar la totalidad de la superficie terrestre sin incurrir en deformaciones excesivas, permitiendo representar fenómenos geográficos globales.

- Proyecciones modificadas.[7]

## En función de las cualidades métricas

En el paso de la esfera al plano resultará imposible conservar simultáneamente las propiedades geométricas: ángulo, superficies y distancias se verán distorsionadas. Las proyecciones cartográficas se pueden clasificar en función de la cualidad que conservan:

- **Proyecciones conformes:** Una proyección cartográfica es conforme cuando mantiene los ángulos que forman dos líneas en la superficie terrestre. Este tipo de proyecciones se utilizan en cartas de navegación.



Figura 21: Proyección conforme[7]

- **Proyecciones equivalentes:** Una proyección cartográfica es equivalente cuando en el mapa se conservan las superficies del terreno, aunque las figuras dejen de ser semejantes. Se utilizan generalmente en mapas temáticos o parcelarios.



Figura 22: Proyección equivalente[7]

- **Proyecciones afláticas:** Una proyección cartográfica es aflática cuando no conserva ángulos, superficies ni distancias, pero las deformaciones son mínimas.
- **Proyecciones equidistantes:** Una proyección cartográfica es equidistante cuando mantiene las distancias entre dos puntos situados en la superficie terrestre.

Finalmente, se debe seleccionar el tipo de proyección según el propósito del mapa. Si por ejemplo se requiere el cálculo y comparación de superficies, será necesario utilizar proyecciones de tipo equivalente. Si por el contrario, el objetivo del mapa es simplemente ubicar los países del mundo, y no se requiere rigor en las mediciones de áreas, pueden utilizarse las proyecciones conformes. [7]



Figura 23: Proyección afiláctica[7]



Figura 24: Proyección equidistante[7]

### En función de las cualidades proyectivas

Las proyecciones se pueden clasificar en función de la figura sobre la cual se proyecta: las que utilizan el plano o las que se desarrollan a través de una figura geométrica (cono o cilindro)

### Perspectivas o planas

Se obtienen proyectando la superficie terrestre desde un punto llamado vértice de proyección sobre un plano tangente a un punto de la Tierra llamado centro de proyección.

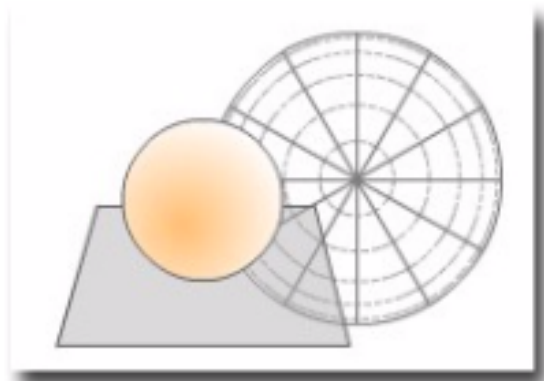


Figura 25: Perspectiva o plana[7]

La proyección mantiene sus propiedades geométricas alrededor del centro de proyección y las distorsiones aumentan conforme nos alejamos de dicho punto. El punto considerado como

vértice de proyección puede encontrarse en el exterior, sobre la superficie o en el interior de la esfera. Además, el punto de tangencia puede ser cualquier punto de su superficie. De esta forma, la proyección plana admite dos clasificaciones: en función de la posición del vértice respecto a la esfera, y en función de la posición del plano tangente a la esfera. [7]

### Según la posición del vértice respecto de la esfera

El punto considerado como vértice de proyección puede encontrarse en el interior, sobre la superficie o en el exterior de la esfera.

### Proyecciones gnomónicas

En este tipo de proyecciones, el vértice coincide con el centro de la figura esférica que representa la Tierra, por lo tanto no es posible proyectar todo un hemisferio, y los círculos máximos (meridianos, ecuador y ortodrómicas) se representan como rectas. Además, al alejarse del centro de proyección, hay grandes deformaciones.

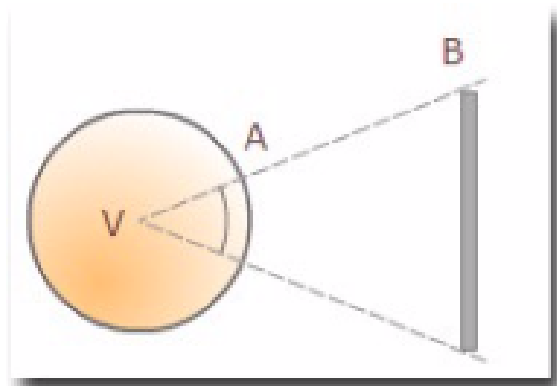


Figura 26: Proyección gnomónica[7]

Se utilizan, generalmente, en cartas de navegación aérea y marítima, y para representar las zonas polares.

### Proyecciones estereográficas

En este caso el vértice de proyección está situado sobre la superficie de la esfera, y su punto diametralmente opuesto es el punto de tangencia del plano de proyección. La deformación aumenta simétricamente hacia el exterior a partir del punto central, mientras que meridianos y paralelos se representan como circunferencias.

La proyección estereográfica es adecuada para representar la totalidad de un hemisferio; por lo que se utiliza, principalmente, en la representación de las zonas polares, los mapas mundis, así como en mapas de estrellas geofísicos.

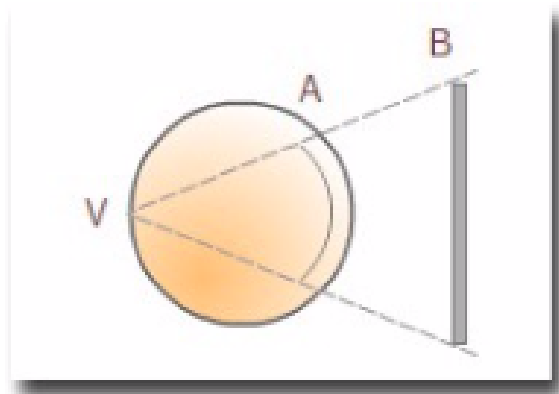


Figura 27: Proyección estereográfica[7]

### Proyecciones ortográficas

En este tipo de proyecciones el vértice de proyección se encuentra a una distancia infinita de la esfera terrestre. La escala se conserva solo en el centro, mientras que la deformación aumenta rápidamente al alejarse de este.

Es un tipo de proyección muy antigua que sólo se usa para la realización de cartas astronómicas y para presentar la apariencia de la Tierra desde el espacio.

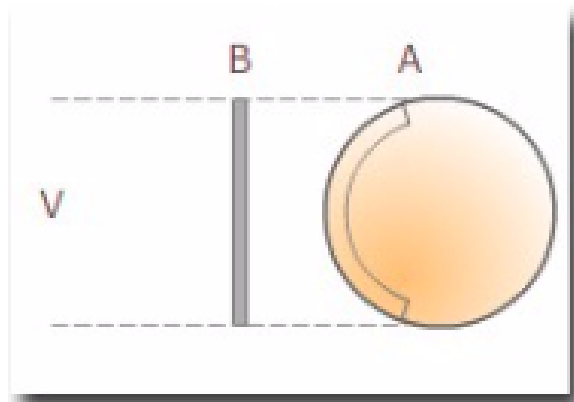


Figura 28: Proyección ortográfica[7]

### Proyecciones escenográficas

El vértice de proyección es un punto cualquiera del espacio exterior a la esfera, pero a una distancia finita de su centro. Históricamente, las proyecciones escenográficas se han destinado a la realización de mapas celestes. [7]

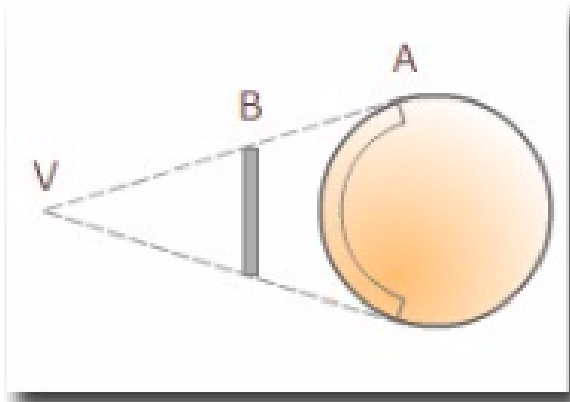


Figura 29: Proyecciones escenográficas[7]

### Según posición del plano tangente a la esfera

El punto de tangencia puede ser cualquier punto de la superficie de la esfera de tangencia puede ser cualquier punto de la superficie de la esfera.

### Proyecciones polares o ecuatoriales

Las proyecciones polares también reciben el nombre de ecuatoriales, por ser su plano paralelo al del ecuador, y por tanto perpendicular al eje de la Tierra.

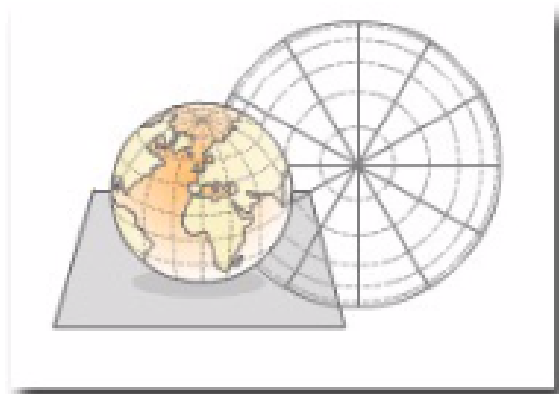


Figura 30: Proyección polar o ecuatorial[7]

Los meridianos se representan por rectas concurrentes al centro de proyección (localizado en cualquiera de los polos) y conservando el valor de sus ángulos. En consecuencia, la escala de representación varía con la latitud.

### Proyecciones meridianas o transversas

Las proyecciones meridianas o transversas, al ser el punto de tangencia el punto de corte de cualquier meridiano con el ecuador. En este tipo de proyecciones, los paralelos y

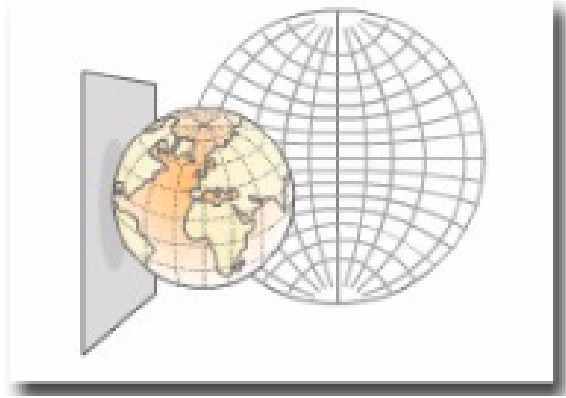


Figura 31: Proyección meridiana o transversa[7]

los meridianos se representan mediante curvas transcendentales. En el caso de la proyección gnomónica meridiana (centro de proyección coincidente con el centro de la Tierra) los meridianos se representan por rectas paralelas entre sí, desigualmente espaciadas, mientras que los paralelos se representan por hipérbolas.

### Proyecciones oblicuas u horizontales

Las proyecciones oblicuas se denominan también horizontales, por ser paralelas al horizonte de un lugar. El punto de tangencia está situado en un punto cualquiera que no se encuentre en el ecuador ni en ninguno de los polos.

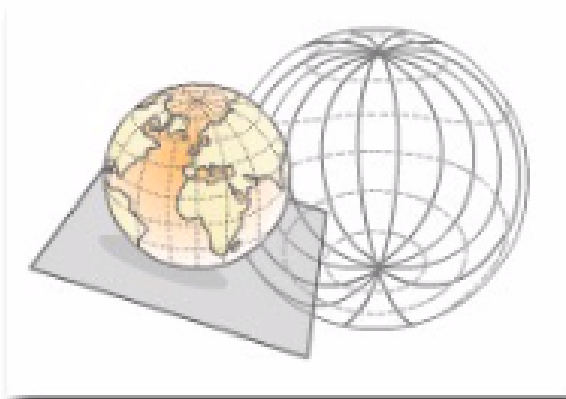


Figura 32: Proyección oblicua u horizontal [7]

En esta proyección, los paralelos quedan representados como curvas cónicas tales como parábolas, elipses e hipérbolas. [7]

### Desarrollos

Este tipo de proyección se obtiene al considerar una figura geométrica auxiliar tangente o secante a la esfera que puede convertirse después en un plano; es decir, que sea desarrollable.

Las figuras auxiliares más utilizadas son el cono y el cilindro

### Proyecciones cónicas

Utilizan el cono como figura de proyección, tangente o secante a la esfera. El eje del cono coincide con la línea de los polos, estableciendo análogamente entre los puntos de la esfera y el cono una correspondencia biunívoca. Al desarrollar el cono, se obtiene una representación

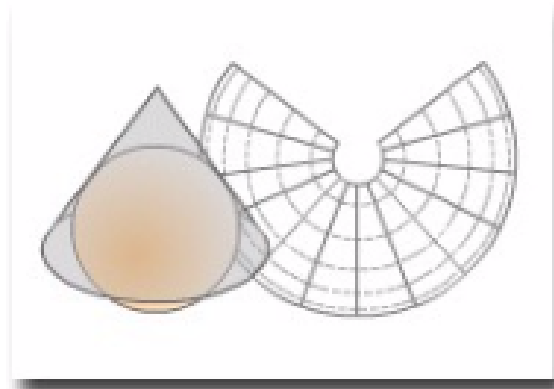


Figura 33: Proyecciones cónicas [7]

en la que los meridianos aparecen como rectas concurrentes al vértice del cono y forman ángulos iguales entre sí, mientras que los paralelos son circunferencias concéntricas cuyo centro es el vértice del cono. Un ejemplo de este tipo de proyecciones son las de Lambert y Bonne.

### Proyecciones cilíndricas

Estas utilizan el cilindro como figura de proyección, tangente o secante a la esfera. El eje del cilindro coincide con la línea de los polos, estableciendo análogamente entre los puntos de la esfera y el cilindro una correspondencia biunívoca.

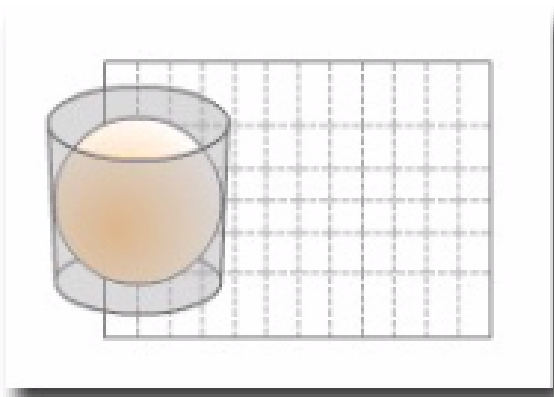


Figura 34: Proyección cilíndrica [7]



Al desarrollar el cilindro, se obtiene una representación en las que los meridianos estarán representados por rectas paralelas equidistantes, y los paralelos por rectas perpendiculares a las anteriores que se van espaciando a medida que aumenta la latitud. Un ejemplo de este tipo de proyecciones son las de Mercator y la UTM. [7]

## F. Sistema de coordenadas geográficas

Las coordenadas geográficas son un sistema de referencia que utiliza las dos coordenadas angulares, latitud (Norte y Sur) y longitud (Este y Oeste) y sirve para determinar los laterales de la superficie terrestre. Estas dos coordenadas angulares medidas desde el centro de la Tierra son de un sistema de coordenadas geográficas incluye un datum, meridiano principal y unidad angular. Estas coordenadas se suelen expresar en grados sexagesimales:

La latitud mide el ángulo entre cualquier punto y el ecuador. Las líneas de latitud se denominan paralelos. La latitud es el ángulo que existe entre un punto cualquiera y el Ecuador, medida sobre el meridiano que pasa por dicho punto. La distancia en km a la que equivale un grado de dichos meridianos depende de la latitud, a medida que la latitud aumenta disminuyen los kilómetros por grado. Para el paralelo del Ecuador, sabiendo que la circunferencia que corresponde al Ecuador mide 40.075,004 km,  $1^\circ$  equivale a 111.1 km.

A continuación unos conceptos básicos en relación a la Latitud:

- La latitud se suele expresar en grados sexagesimales.
- Todos los puntos ubicados sobre el mismo paralelo tienen la misma latitud.
- Aquellos que se encuentran al norte del Ecuador reciben la denominación Norte (N).
- Al Ecuador le corresponde la latitud  $0^\circ$
- Los polos Norte y Sur tienen latitud  $90^\circ$  N y  $90^\circ$  S respectivamente.
- Se mide de  $0^\circ$  a  $90^\circ$ .

La longitud mide el ángulo a lo largo del Ecuador desde cualquier punto de la Tierra. Se acepta que Greenwich en Londres es la longitud 0 en la mayoría de las sociedades modernas. Las líneas de longitud son círculos máximos que pasan por los polos y se llaman meridianos. Para los meridianos, sabiendo que junto con sus correspondientes antimeridianos se forman circunferencias de 40.007.161 km de longitud,  $1^\circ$  de dicha circunferencia equivale a 111,1 km.

Combinado estos dos ángulos, se puede expresar la posición de cualquier punto de la superficie de la Tierra. Por ejemplo, Baltimore, Maryland, tiene latitud 3,9 grados Norte, y longitud 76,6 grados Oeste. Así un vector dibujado desde el centro de la Tierra al punto 39,3 grados Norte del Ecuador y 76,6 grados al Oeste de Greenwich pasará por Baltimore.

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.

El Ecuador es un elemento importante de este sistema de coordenadas, puesto que representa el cero de los ángulos de latitud y el punto medio entre los Polos. Es el plano fundamental del sistema de coordenadas geográficas. [11]

- 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. [11]

## G. Proyecciones cartográficas

### 1. Universal transversa mercator (U.T.M)

Adoptada internacionalmente, tiene su fundamento en el desarrollo conforme de Gauss-Krüger.

En esta proyección se considera la Tierra como un elipsoide de revolución tangente interiormente a un cilindro, cuyo eje está situado en el plano del Ecuador. El elipsoide de referencia elegido es el de Hyford.

El problema, que tenía una solución geométrica cuando se consideraba la Tierra esférica, ha de tratarse ahora analíticamente. Las fórmulas para su aplicación son válidas para toda la Tierra, pues empleando husos de  $6^\circ$  de amplitud, se representa la totalidad de la Tierra en 60 husos iguales. Una vez obtenidas las fórmulas para uno de ellos, serán las mismas que deberán utilizarse en todos. Los husos se numeran de 1 al 60 a partir del meridiano de  $180^\circ$  de longitud respecto del de Greenwich, por lo que este meridiano separa los husos números 30 y 31, estando España comprendida entre los husos 28, 29, 30 y 31.

Las proyecciones UTM es conforme, siendo el meridiano central de cada huso automecoico y representado según una recta. La utilidad que tiene esta proyección, por su conformidad como aplicación a problemas geodésicos, la hace recomendable para la representación de casi todos los países, exceptuándose aquellas zonas situadas a  $\pm 80^\circ$  de latitud, en las que se utilizará la proyección estereográfica.

Las condiciones que se imponen en esta proyección son: [12]

Las condiciones que se imponen en esta proyección son:

- La proyección será conforme.
- El meridiano central de cada huso ha de ser automecoico.

- El meridiano central de cada huso ha de ser automecoico.
- El Ecuador y el meridiano central de cada huso se representarán por líneas rectas.
- El origen de coordenadas en la proyección será el correspondiente a la intersección del Ecuador y el meridiano central del huso.[12]

## 2. Transversal de Lambert

Es una de las proyecciones cónicas más empleadas. Su construcción comienza por la representación de la esfera sobre una superficie auxiliar, que es un cono circunscrito a lo largo de un paralelo. Posteriormente este paralelo se desarrolla sobre un plano.

No es una proyección geométrica, pues la separación entre paralelos se calculó analíticamente de forma que, igual que en la proyección Mercator, se obtiene una representación conforme.

Los meridianos son rectas concurrentes y forman ángulos iguales entre sí los que tienen la misma diferencia de longitud.

- Los paralelos son circunferencias concéntricas.
- Los puntos se proyectan desde el centro de la esfera.

En este sistema de desarrollo cónico se impone la condición de que la representación sea conforme. Consideramos la superficie cónica tangente a lo largo del paralelo de latitud media, de la zona a representar. Este paralelo será automecoico y en el desarrollo vendrá representado por una circunferencia de radio  $r$ , que vale igual en todos los desarrollos cónicos. [12]

## 3. Proyecciones GTM

Es un tipo de proyección cartográfica que tiene como objetivo el unificar los sistemas de coordenadas planas en Guatemala, mejorar la precisión en trabajos de cartografía y topografía, y sirve como sistema de referencia continuo y único para uso en la cartografía básica, temática y los sistemas de información geográfica a nivel nacional.

Dicha proyección utiliza la transversa de Mercator (tipo Gauss Kruger) en una zona única local. Con el esferoide WGS 84 Datum: World Geodetic System 1984, con su longitud de orden en  $90^{\circ} 30'$  que es respecto al meridiano central de la proyección. La latitud de origen sobre el Ecuador  $0^{\circ}$ , generalmente todos los datos son dados en metros. No contiene un falso norte, como falso este tiene 500,000 metros en el meridiano central. Utiliza un factor de escala en el meridiano central de 0.9998 y no aplica para ninguna numeración de la zona, límite de latitud del sistema, y límite de zonas. [13]

## H. Introducción a vehículos aéreos no tripulados y fotogrametría

### 1. Definición de fotogrametría

La fotogrametría, según Bonneval, es la técnica que tiene como objetivo estudiar y definir con precisión la forma, dimensiones y posición en el espacio de un objeto cualquiera utilizando esencialmente medidas hechas sobre una o varias fotografías.

Etimológicamente, la palabra fotogrametría significa la métrica de lo escrito con luz. Es, en esencia, la ciencia que utiliza la fotografía para hacer medidas, y su aplicación es extensiva a numerosas áreas de conocimiento.

Existe otra técnica que utiliza también fotografías aéreas denominada fointerpretación y esta tiene como objetivo al estudio pormenorizado de las fotografías con el fin de analizar fenómenos de muy variada tipología.

Sin embargo, la fotogrametría no interpreta fenómenos si no que, mediante mediciones en las fotografías se generan planos y mapas de gran exactitud.

Finalmente, podríamos definir la fotogrametría como la ciencia que sirve para elaborar mapas o planos partiendo de fotografías realizadas bajo unas condiciones específicas.

La más extendida de sus posibles ramas es la fotogrametría aérea, en la que, a partir de fotografías aéreas tomadas bajo unos condicionamientos geométricos, permite elaborar planos y mapas de áreas extensas con bastante precisión y agilidad.

Para un terreno rústico, el límite de rentabilidad para elegir entre un levantamiento fotogramétrico y uno por GPS podría estar en el entorno de unas 200 ha. En el caso de terreno urbano, el límite descendería considerablemente. Aunque todo depende de la escala, exactitud, y características del terreno en cuestión. [14]

### 2. Elementos fundamentales en fotogrametría

La elección de la escala de la fotografía es función de la escala de representación y del tamaño de los objetos que se pretenden detectar.

La relación entre la escala de la imagen ( $M_b = 1/m_b$ ) y la del plano ( $M_k = 1/m_k$ ) que se trata de obtener por medios fotogramétricos, viene dada según el ábaco de la siguiente figura.

Dicha escala de las fotografías nos limitará la detección del tamaño de los objetos, sabiendo que el límite de la percepción visual es de 0.2 mm. Si observamos con aparatos provistos de ampliación de la imagen, el límite pasa a ser 0.02 mm de manera que cada escala nos dará un tamaño mínimo de objeto distinto. [14] Los siguientes elementos a tener en cuenta son dos: la distancia focal de la cámara y la altura de vuelo.

La distancia focal de la cámara es un dato inherente a la cámara con la que se va a

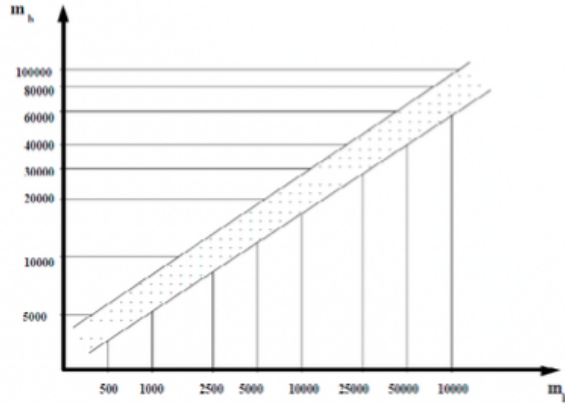


Figura 35: Relación entre la escala de la fotografía y la de la cartografía [14]

1:5000	1:10000	1:20000	1:30000
0.10 m	0.20 m	0.40 m	0.60 m

Cuadro 1: Tamaño mínimo de elemento detectado con instrumento de restitución[14]

realizar el vuelo. Dicha magnitud, es un dato calibrado y corresponde con la distancia que existe desde el centro óptico del objetivo hasta el plano focal que es dónde se captura la imagen.

La altura de vuelo vendrá dada por las dos magnitudes anteriores.

$$Mb = \frac{1}{mb} = \frac{c}{H} \rightarrow; H = cMb \quad (1)$$

Tal y como se puede observar en la Figura No. 36, esa altura H es la altura media sobre el terreno, que nada tiene que ver con la altura de vuelo sobre el nivel del mar  $H_0$ . [14]

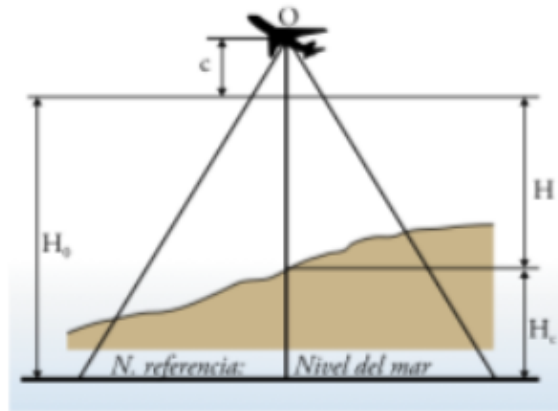


Figura 36: Altitud de vuelo sobre el nivel del mar [14]

### 3. Levantamiento fotogramétrico

La aplicación de uso más frecuente de esta disciplina, la constituye el levantamiento fotogramétrico de la superficie terrestre. Desde este punto de vista, la tarea principal de la fotogrametría es producir una representación (mapa, plano, carta) de objetos (superficie terrestre) en proyección ortogonal, a una determinada escala, a partir de fotografías del mismo. Por ello se considera a la fotogrametría, como una herramienta tecnológica de la que se surte la agrimensura.

La única diferencia esencial con trabajos de índole topográficos, la constituye el hecho de que los “registros fotográficos”, son utilizados como intermediarios, en lugar de obtener directamente la información del objeto. En la jerga fotogramétrica se dice que por este medio se traslada el terreno al gabinete.

Cercanamente asociada a la fotogrametría se encuentra la fotointerpretación, si bien esta última cumple una función muy significativa, es importante delimitar claramente ambos conceptos:

La fotointerpretación constituye el estudio y exaltación de imágenes fotográficas del objeto, con el fin de identificarlos y determinar sus características y propiedades. La fotointerpretación requiere amplios conocimientos de la ciencia o disciplina para cual se emplea. Su aplicación es tan vasta como las ciencias, y no requiere demasiados métodos e instrumentos.

La fotogrametría desde el punto de vista de su aplicación requiere amplios conocimientos teóricos, métodos e instrumental que le son propios. Aquí la fotointerpretación desempeña un papel secundario, bajo la forma de interpretación de las superficies y distribución de los objetos en estudio.

Dentro de sus aplicaciones, podemos ver desde sus comienzos, fue la representación cartográfica de la superficie terrestre como documento fehaciente para medir, dictaminar y decidir.

En el marco general de la ingeniería existen cuatro grandes grupos de actuaciones donde se utilizan la fotogrametría:

- Vías de comunicación: Para el estudio del establecimiento de trazados.
- Planificación territorial: En el planeamiento urbanístico y ordenación del territorio.
- Hidrografía: Estudio de cuencas deformaciones de presas, entre otros.
- Ejecución de movimientos de tierras: Medición de volúmenes removidos.

Desde el punto de vista cartográfico, la utilización de este método sirve para confeccionar mapas topográficos básicos en varias escalas:

- Mapas a escala grande: Proyectos de ingeniería detallados, catastros, servicios, entre otros.
- Mapas a escala media: Planeamientos y desarrollo, anteproyecto de ingeniería.

- Mapas a pequeña escala: Fines generales, planeamiento, vías de comunicación, fronteras, entre otros.

Las ventajas del método fotogramétrico son altamente significativas en levantamientos de zonas extensas, ya que reduce los trabajos clásicos sobre el terreno y los costos operativos. Asimismo, permite operar independientemente de las condiciones climáticas del lugar, como también en regiones inaccesibles y poco conocidas. Facilita la interpretación del terreno con mayor fidelidad, economizando tiempo y esfuerzo. Admite una organización racional de los trabajos de medición y trazado. [15]

## I. Clasificación de la fotogrametría

La fotogrametría se puede clasificar según los siguientes aspectos, En función del instrumental utilizado:

- Fotogrametría analógica
- Fotogrametría analítica
- Fotogrametría digital

En función de la distancia al objeto:

- Fotogrametría espacial
- Fotogrametría aérea
- Fotogrametría terrestre

### 1. Fotogrametría analógica

Los sistemas analógicos se basan en el empleo de instrumentos llamados restituidores, que reproducen, a escala, modelos virtuales del objeto. Estos aparatos permiten la medición de las coordenadas espaciales de los puntos que pueden observarse en las dos imágenes, gracias a la identificación de puntos homólogos por medio de la visión estereoscópica y de la marca métrica flotante.

En los restituidores analógicos se requiere que las fotografías se tomen en la disposición consiste en que los ejes de las dos tomas fotográficas sean paralelos y perpendiculares a la base o línea que une las dos estaciones de toma.

En los aparatos analógicos existen una serie de limitaciones que conviene conocer, y básicamente se refieren a la imposibilidad de utilizar planos de referencia que se encuentren girados más de 51" respecto al plano de la fotografía. Solo se puede proyectar sobre alguno de los tres planos de referencia. También pueden existir limitaciones, dependiendo de los modelos, respecto a las escalas de restitución y a las focales de las cámaras. Todo ello restringe notablemente su aplicación en fotogrametría terrestre. [16]

## 2. Fotogrametría analítica

En la actualidad, la mayor parte de los instrumentos de restitución se basan en el cálculo analítico de las coordenadas del objeto a partir de las coordenadas medidas sobre las imágenes. Es fácil deducir que las relaciones geométricas que existen entre los haces de direcciones de cada una de las dos imágenes y los puntos del objeto pueden establecerse de forma matemática. Este sistema, utilizado desde los primeros tiempos de la fotogrametría, presentó siempre el inconveniente de lo engorroso y lento de los cálculos que hay que realizar para cada punto. Esta dificultad limitó notablemente la utilización de los métodos analíticos hasta que los ordenadores permitieron efectuar dichos cálculos en tiempo real.

La aplicación de los ajustes de haces permite un amplio abanico de posibilidades, tanto para la mejora de la precisión en la restitución de edificios que requieren un gran número de fotografías para su completa documentación, como la reducción de los trabajos de campo para la medición de puntos de control. Pero una de las aplicaciones más interesantes de este tipo de programas es la que permite realizar levantamientos de fotogrametría utilizando cámaras no métricas.

La llegada de la etapa analítica representa, ante todo, la inversión de la tendencia convergente de la época anterior. La simbolización abstracta de todos los parámetros geométricos de la fotogrametría representa, ante todo, la eliminación de restricciones físicas. Por lo cual, se puede hablar de:

Libertad de toma: La toma fotográfica no tiene por que ser estereoscópica y, en consecuencia, ajustada o próxima al Caso Normal. Cualquier toma puede ser resuelta matemáticamente siempre que exista intersección, es decir, siempre que sea posible disponer de dos puntos de vista. Con este planteamiento se pierde la potencia de la visión estereoscópica pero se gana la libertad de acción de campo.

Libertad de restitución: Los restituidores siguen siendo una gran ayuda pero no son ya imprescindibles. Basta con programar los algoritmos y explotar la potencia de cálculo de los ordenadores para poder obtener coordenadas 3D volcables a cualquier diseño asistido por computadora o CAD, (Computer-Aided Design, por sus siglas en Inglés).

Libertad de cámaras y películas: Los errores imputables a la cámara (distorsión radial y tangencial) y a las películas (deformación) pueden ser modelizados matemáticamente y puede, en consecuencia, ser tan grandes como se quiera. De esta cuenta, disminuye la dependencia de materiales de alta calidad. Por otra parte, la independencia alcanza al propio carácter métrico de las cámaras. Puesto que sus parámetros internos no tienen por qué ser conocidos ya de antemano, y por ende se puede incorporar al proceso fotogramétrico cámaras no calibradas o cámaras sin marcas fiduciales con focal desconocida.

Incorporación de otros datos: Tanto en el plano aéreo como en el terrestre, los datos procedentes de cualquier fuente (distancias medidas, condiciones geométricas o físicas, datos procedentes de otros medios, entre otros.) pueden incorporarse sencillamente al método fotogramétrico con la derivada ganancia en la robustez y en la libertad del proceso. Desarrollo de Terrestre: La informatización beneficia los métodos donde mayor libertad cabe, esto es, en la fotogrametría terrestre. Esta disciplina se aproxima bastante al usuario como lo demuestra la propagación de programas de este estilo en los que no se aplica la visión estereoscópica,



prevaleciendo la libertad de toma.

Ajuste de observaciones: El planteamiento matemático de los modelos fotogramétricos permite el empleo de datos en cantidad y, en consecuencia, la aplicación de técnicas de ajuste estadístico. La ventaja de ello es que puede llevarse a cabo un análisis sistemático de los errores cometidos y de la propagación de estos desde las observaciones iniciales hasta los resultados finales. La calidad métrica queda cuantificada en estimadores de la precisión y la fiabilidad. [16]

### 3. Fotogrametría digital

La evolución de la informática en todos los campos y de manera continua, afecta de forma directa a la fotogrametría. La expansión comercial en fotogrametría digital se produjo en 1990. Hoy, el tratamiento digital de imágenes esta produciendo una nueva revolución al permitir sustituir los elementos de alto costo de los equipos de restitución (mecánica y óptica de precisión) por hardware y software informático de costo cada día mas reducido.

La fotogrametría digital trabaja con imágenes digitales y pretende automatizar al máximo las tareas que requieren de operadores experimentados, aunque la automatización total no es todavía un hecho real, de momento, sólo es posible su automatización de ciertas partes del proceso fotogramétrico.

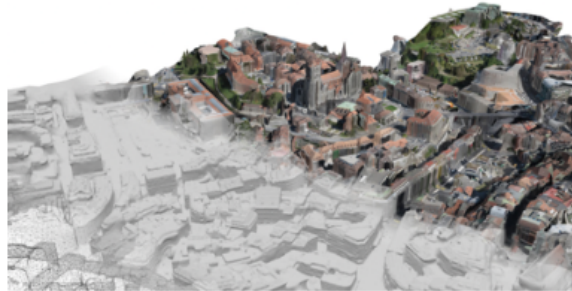


Figura 37: Evolución informática en la fotogrametría [16]

Entre las ventajas, está el poder obtener un fichero de imagen digital cuyos pixeles podremos asignar, no solo unos valores numéricos de color, sino las coordenadas espaciales del punto del objeto al que corresponde dicho píxel. Es decir, obtenemos un modelo digital, no sólo con datos métricos tridimensionales, sino con información cromática y de texturas. A partir de estos datos es fácil generar representaciones del objeto desde cualquier dirección, en cualquier sistema de proyección y con calidad de imagen fotográfica.

La aparición y la rápida comercialización de las cámaras digitales de gran formato tiene como consecuencias las siguientes:

La desaparición de la imagen analógica: Con ella desaparecen también las limitaciones asociadas con el almacenamiento, el transporte y la conservación. No hay ya deterioro o deformación de las imágenes ni se requieren de especiales condiciones espaciales y ambientales para preservar los datos. Ya no se depende de más procesos físicos.

Mayor resolución radiométrica y espectral: Se dispone de mayor profundidad de color lo

que se traduce en mayor calidad, en mejoras de los procesos de matching y en la posibilidad de volar bajo condiciones de iluminación más desfavorables.

La desaparición del escáner: Este era uno de los mayores problemas de la etapa anterior; el escáner fotogramétrico. Por una parte, la precisión exigible en todo proceso fotogramétrico requería unos equipos de digitalización tremendamente estables y, en consecuencia, caros y dedicados. Por otra parte, el tamaño de la imagen requería unos tiempos de escaneado de los que dependía todo el flujo de producción.

Aparecen nuevos conceptos de cámaras: Como la cámara barredora (12000x 1), o la cámara modular (6000 x 6000 x 4, aproximadamente).

Cambia el concepto de calibración: En la época anterior imagen y cámara son conceptos distintos pues la imagen se corresponde con la película. No todas las películas se posicionan de forma exactamente igual sobre la cámara y, lo que es más, una vez formada la imagen ésta sigue procesos de deformación que la alejan del modelo inicial de la cámara. En consecuencia las imágenes analógicas requieren de unos “testigos” (marcas fiduciales) que indican la geometría de la cámara sobre la película. Sin embargo, en el caso de las cámaras digitales, la imagen recoge fielmente la propia geometría de la cámara con lo que ya no es necesario el empleo de marcas fiduciales.

Posibilidades de automatización y de cartografía en tiempo real: Los distintos aspectos mencionados se traducen en el hecho de que se abren las puertas a la automatización total del proceso y, aún más, a la posibilidad de automatización en tiempo casi real.

Por último hacemos mención a las grandes posibilidades que ha abierto internet, está abriendo, y seguirá aportando en el campo de la fotogrametría. Especialmente están emergiendo cada día más suministradores de datos espaciales y de sistemas de metainformación. Las últimas tendencias apuntan al mayor uso de láser para la modelización tridimensional de objetos y superficies, la fotogrametría completamente automática y la fotogrametría usando los móviles. [16]

#### **4. Fotogrametría aérea**

Para levantamientos y compilación de las condiciones topográficas se usan fotografías tomadas desde el aire, pero para que las fotografías den un plano verdadero se deben cumplir con ciertas condiciones, siendo estas: El terreno en la fotografía debe ser horizontal, la cámara no debe estar inclinada con respecto a la vertical cuando se hace la exposición, los lentes de la cámara y el material fotográfico debe ser lo mas perfecto posible y no debe de haber refracción atmosférica. Además, cuando se vuela a gran altitud, se debe tomar en cuenta la curvatura de la Tierra.

Estas condiciones ideales rara vez, si es que nunca, se satisfacen. Normalmente el terreno tiene algún relieve y son inevitables pequeñas inclinaciones. Estas producen distorsiones en las fotografías aéreas y están asociadas a variaciones en la escala. Como resultado las fotografías aéreas no son un plano verdadero o mapa.

## La fotografía aérea vertical

La Figura No.38 representa una fotografía tomada sobre un terreno ondulado, la cámara apunta directamente vertical hacia abajo. Las líneas de los puntos del terreno pasan a través del centro de perspectiva O del lente, apareciendo las imágenes de esos puntos en el negativo, esto es, A sobre el terreno aparece en a, p es el punto principal de la fotografía, P es el punto principal en el terreno, y ambos definen la línea de plomada para una fotografía vertical. El punto principal p está en la base de la perpendicular llevada desde O sobre el plano y se localiza en la intersección de las líneas que unen las marcas de colimación o fiduciales las cuales se encuentran usualmente en las esquinas.

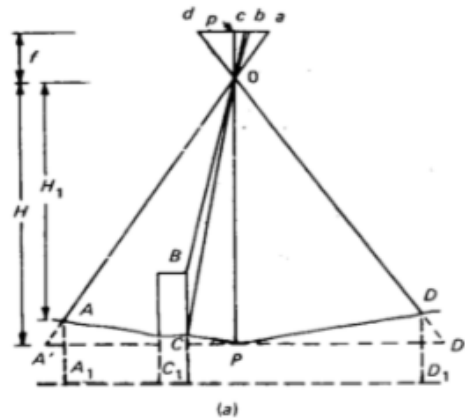


Figura 38: La fotografía aérea es una proyección central[17]

En cada uno de los límites de las fotografías; Op se conoce como la distancia principal. Si el terreno estuviera a nivel, como se muestra por la línea punteada que pasa por P, la escala de la fotografía sería  $f:H$ . Pero si se traza un plano horizontal a través de A, se tendría otro par de triángulos semejantes con lo que se obtendría que la escala es  $f:H$ , y así para todos los puntos que no son datum. Con lo que la escala en un punto sobre la fotografía depende de la altura de ese punto sobre el datum seleccionado.

Considerando el lado de un edificio alto BC y su consecuente imagen cb sobre negativo, B está verticalmente sobre C, y en el plano los dos puntos coinciden, pero sobre la fotografía el lado del edificio cd se puede observar al igual que la azotea, y este edificio aparecerá inclinado hacia fuera del centro de la fotografía. Se puede demostrar que la distorsión de la imagen es proporcional a la distancia a partir del punto de plomada de la fotografía el cual en este caso particular coincide con el punto principal. La Figura No.38 muestra el edificio BC, para mayor claridad con su base sobre el plano datum, y con B a una altura h sobre dicho plano. Así, como pOP es verdaderamente, entonces, v, V, B, C, c y b están todos sobre un plano vertical, ya que B está verticalmente sobre C. Este plano vertical interseca el plano del negativo, y ya que dos planos se intersecan en una sola línea, v, c y b deben ser colineales y el desplazamiento de b con respecto a c es radial desde el punto de plomada v.

Considerando los triángulos semejantes vbO, EBO,

$$\frac{Vb}{v0} = \frac{EB}{EO} \rightarrow \frac{vb}{f} = \frac{EB}{H-h} \quad (2)$$

También, a partir de los triángulos semejantes  $vcO$ ,  $VCO$ ,

$$\frac{Vc}{v0} = \frac{Vc}{VO} \rightarrow \frac{vC}{f} = \frac{VC}{H} = \frac{E}{B} \quad (3)$$

$$\frac{vb}{vc} = \frac{H}{H-h} = \frac{vb}{vb-bc} \quad (4)$$

$$\frac{vb}{bc} = \frac{H}{h} \quad (5)$$

Así, la distorsión debida a la altura  $BC$

$$= bc = \frac{h}{H} * vb \quad (6)$$

Esta expresión es válida solamente para fotografías verdaderamente verticales. La distorsión por altura, sin embargo, es radial a partir del punto de plomada cuando la fotografía es vertical o inclinada. [17]

### La fotografía aérea inclinada

Las pequeñas inclinaciones a partir de la vertical, en dirección desconocida, son inevitables; el ángulo promedio de inclinación generalmente no será menor de  $2^{\circ}$ , pero se puede reducir a  $\frac{1}{2}^{\circ}$  cuando se usa piloto automático. Al igual que el relieve, la inclinación causa distorsiones.

La Figura No. 39 muestra el negativo inclinado en el ángulo  $\theta$  con la horizontal.  $O$  es el centro de perspectiva de los lentes de la cámara.  $V$  y  $v$  son los puntos de plomada del terreno y la fotografía respectivamente, y están en la misma línea vertical que  $O$ .  $P$  y  $p$  son los puntos principales del terreno y la fotografía.  $iOI$  es el ángulo de bisección de los ángulos  $pOv$  y  $POV$ ; a los puntos  $I$  e  $i$  se les conoce como isocentros del terreno y la fotografía. A los puntos  $i$  e  $I$ ,  $v$  y  $V$ , los cuales están unidos por una línea que pasa por  $O$ , se les conoce como puntos homólogos. Ya que los triángulos  $iOp$  e  $IOV$  son semejantes, además que  $ipO$  e  $IVO$  son ángulos rectos e  $iOp$  es igual con  $IOV$ , los ángulos restantes,  $piO$  y  $VIO$  deben ser iguales. Por consiguiente  $iOI$  forman los mismos ángulos ( $90-(\theta/2)$ ) con los planos del negativo y del terreno. La Figura No. 39 muestra en perspectiva las condiciones cuando el negativo esta inclinado con un ángulo teta con respecto a la horizontal. El negativo o la línea del plano principal que pasa a través de  $p$ , se produce al encontrarse esta con el plano del terreno en  $M$ .  $Mp$  también es perpendicular a la intersección de  $LMN$  del terreno con el negativo, y su proyección  $MP$  también es perpendicular a  $LMN$ , mientras que ambas líneas (junto con los puntos  $O$ ,  $v$  y  $V$ ) están contenidas en el plano vertical, llamado plano principal. El plano horizontal que contiene a  $O$  de la traza horizontal  $JK$  sobre el negativo, y cualquier línea horizontal paralela a esta sobre el negativo se llama plano paralelo. También las imágenes de las líneas paralelas a  $VIP$  sobre el terreno se intersecan con la traza horizontal en un punto que se le llama punto de fuga.

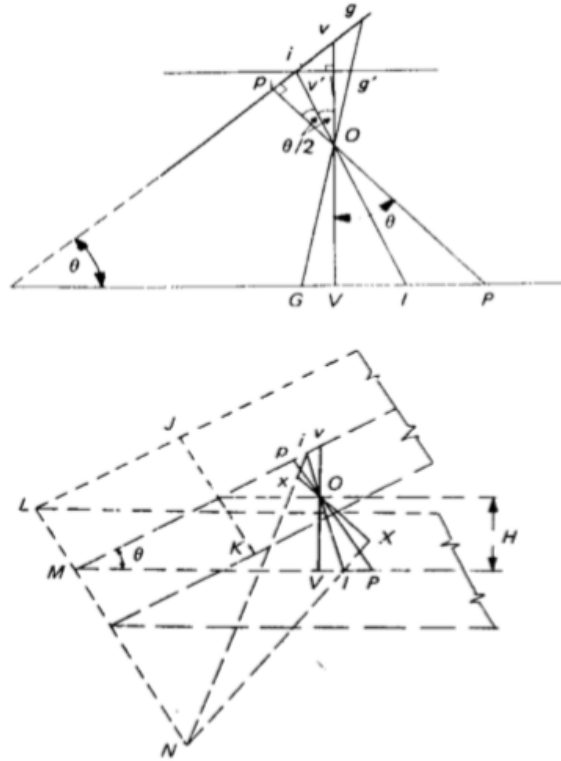


Figura 39: Muestra el negativo inclinado en el ángulo  $\theta$  con la horizontal[17]

$$\frac{\theta}{2}, Op = f \quad (7)$$

$$\Rightarrow Oi = f \sec\left(\frac{\theta}{2}\right), Ov = f \sec(\theta) \quad (8)$$

La escala dada en el isocentro,  $i$ , y en cualquier punto del plano paralelo a través de  $i$  es igual a  $Oi/OI$ .

$$\frac{OI}{OI} = \frac{f(\sec\frac{\theta}{2})}{\frac{H \sec\theta}{2}}, pOi = VOI = \frac{\theta}{2} \quad (9)$$

$$= \frac{f}{H} \quad (10)$$

Cual es la de una fotografía vertical tomada desde la misma estación de la cámara  $O$ . Esto no es verdadero en ningún plano paralelo. Por ejemplo, la escala en el punto principal  $p$ , y cualquier otro punto sobre el plano paralelo que pase por  $p$ , es  $\cos(\theta/H)$ .

El lector puede comprobar que los cambios en escala a lo largo de la línea principal a una tasa de cambio de  $\sin(\theta/H)$ , se incrementará desde  $p$  hacia  $v$ . Nótese también que si la

inclinación de la fotografía se hace perpendicular a  $vV$ , a través de  $i$ , como se muestra en la Figura No. 39, se puede tomar ésta como equivalente a fotografía vertical, ya que  $op=ov$ .

Un punto del terreno  $G$  al nivel del datum es registrado en  $g$  y en  $g'$ , respectivamente en esas fotografías, de tal forma que en la fotografía inclinada, la imagen de la distancia  $IG$ , se agranda con respecto a la distancia  $ig'$  en la fotografía vertical. El desplazamiento relativo ( $ig-ig'$ ) de la imagen debido a la inclinación teta puede determinarse rápidamente de la geometría de la Figura No. 39 Como sigue:

Midiendo  $pg$  y deduciendo  $ig$

$$ig = pg - f \tan \frac{\theta}{2} \quad (11)$$

Estimando  $v'g'$  ya que  $Ov'$

$$Ov' = f, \tan(pOg) = \frac{pg}{f} \quad (12)$$

Calculando  $ig'$  ya que  $iv'$

$$iv' = ip \quad (13)$$

La imagen de un punto  $X$  sobre el plano del terreno aparecerá en  $x$ , ya que los puntos  $t, X, x$  e  $i$  están sobre un plano. Este plano, el plano del terreno y el del negativo se intersecan en un punto solamente, el cual se denota por  $N$ .

Se demostró al principio del capítulo que la línea  $iOI$  que une los isocentros, forma el mismo ángulo con los planos del terreno y del negativo, con lo que resulta que el triángulo  $iMI$  es isósceles.

Ya que

$$iM = IM \quad (14)$$

y

$$Mil = iIM = 90 - \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

Ahora

$$iMN = IMN = 90 \quad (16)$$

Por lo tanto, los triángulos  $iMN$  e  $IMN$  son congruentes y  $MiN = MIN$ . Así en la Figura No.40 El ángulo subtendido en  $I$  por  $X$  y  $P$  sobre el terreno será igual al ángulo subtendido en  $I$  por  $X$  y  $P$  sobre el terreno será igual al ángulo subtendido en  $i$  por  $x$  y  $p$  en el negativo, y por extensión, del análisis se puede ver que en general los ángulos subtendidos en el isocentro del terreno por puntos sobre éste serán igual a los ángulos subtendidos en el isocentro de la foto por las correspondientes imágenes de esos puntos.

En la Figura No. 40 El desplazamiento de la imagen de  $Y$  con respecto a la imagen de  $X$  se muestra radialmente desde el punto de plomada sobre el negativo inclinado, ya que  $Y$  está verticalmente sobre  $X$ , de tal forma que  $Y, X, V, C, v, x$  y  $y$  están contenidos en un plano vertical, el cual interseca al negativo para dar una línea recta que contiene a  $v, x, y$ .

Así en la fotografía inclinada,

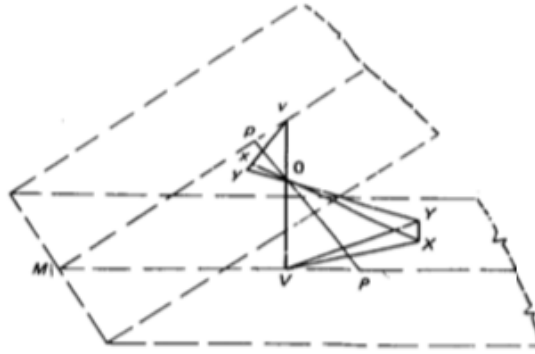


Figura 40: Muestra el negativo inclinado en el ángulo  $\theta$  con la horizontal[17]

- Las distorsiones debidas a la altura son radiales desde el punto de plomada.
- Las distorsiones debidas a la inclinación son radiales desde el isocentro.

El efecto combinado del relieve y la inclinación en la posición de un punto sobre una foto inclinada es complejo, con lo que se producen muchas variaciones en la escala. Mientras que una fotografía representa una vista en perspectiva del terreno, esta no es un plano verdadero o un mapa. Cualquier método cartográfico usando fotografías aéreas debe buscar eliminar estas variaciones en la escala causadas por el relieve y la inclinación. [17]

## Fotografía aérea

La fotografía aérea es la fuente básica de datos y a menos que esta satisfaga ciertas condiciones, no se podrán hacer mediciones precisas. Se deben cumplir esencialmente dos condiciones para obtener buenas fotografías aéreas con propósitos fotogramétricos:

Cada fotografía debe de ser de alta calidad geométrica y de imágenes Cada fotografía se debe tomar desde una posición dada en el espacio con el eje de la cámara apuntando lo más cercano posible a la vertical hacia abajo.

## Lentes

Para propósitos fotogramétricos, cualquier lente debe estar virtualmente libre de distorsiones teniendo un alto poder de resolución, excelente distribución de la luz y óptima corrección de color de las partes visibles y visible cercana del espectro electromagnético. En los lentes modernos, es normal una distorsión en el plano focal menor a 0.01 mm. Los lentes de las cámaras se pueden clasificar en supergranangular, granangular, ángulo normal y ángulos estrechos. Los lentes supergranangular son aquellos que tienen un campo angular del orden de  $120^\circ$ . [17]

## **Películas**

Las películas son el medio adoptado normalmente en la práctica moderna para las fotografías, en lugar de las placas. Es importante que la base sobre la cual se coloca la emulsión sensitiva a la luz sea dimensionalmente estable, de tal forma que las propiedades geométricas de las fotografías se mantengan. Las películas para blanco y negro y color se encuentran disponibles con una base estable de poliéster y dentro de cada grupo hay varias películas en las que varía la sensibilidad espectral.

Los detalles individuales se identificarán por los cambios o los contrastes en estas sombras grises así como por su forma, sombra o las características asociadas. La película pancromática es sensible a la luz azul así como la luz naranja, con un mínimo de sensibilidad a la luz verde de alrededor de 550 nm. Como la luz pasa a través de la atmósfera desde el terreno a la cámara se pueden encontrar partículas finas suspendidas en forma de polvo o agua, lo que resulta en una dispersión de la luz, las longitudes de onda pequeña tienen un mayor grado de dispersión que las longitudes mayores. Para lograr que las formas de las imágenes de los detalles del terreno se produzcan, esta luz no deseada se elimina por medio de un filtro amarillo.

Alternativamente, se utiliza película blanco y negro sensitiva a la radiación infrarroja con una longitud de onda del orden de 900 nm, pero ya que esta película es muy sensitiva a la luz azul se emplea un filtro rojo para absorber la radiación visible. La reflectividad del intervalo infrarrojo por la vegetación verde viva ocasiona que los bosques y los matorrales aparezcan más brillantes en las fotografías infrarrojas, con la posibilidad de identificar varias especies. Este hecho es importante en la detección de camuflaje ya que las superficies pintadas de verde no reflejan esta radiación de la misma forma que la vegetación viva. Por otro lado, el agua tiene una reducción en la reflectividad, por lo que se convierte en formas oscuras en la fotografía, con lo que las líneas de costa y los ríos aparecen marcados.

Las cámaras multibanda producen imágenes separadas del mismo terreno y son instrumentos valiosos en los estudios de interpretación como sigue: banda azul, penetración en áreas sombreadas; banda verde, identificación de especies de plantas; banda roja, interpretación general y detalles submarinos; banda infrarroja, diferenciación de especies y patrones de drenaje. Por medio de filtros es posible producir imágenes en color y falso color a partir de estos originales en blanco y negro. Las fotografías en color y falso color muestran los detalles topográficos generales y son de particular valor en los estudios de interpretación, ya que las diferentes longitudes de onda se registran como colores, aunque el objetivo primario del falso color fue para la detección de camuflaje. En consecuencia, la radiación infrarroja estará representada en un objeto de color verde como color magenta si éste refleja fuertemente la radiación, pero aparecerá de color azul si este absorbe la radiación; por esta razón el agua aparece de color azul en las películas infrarrojas. [17]

## **Condiciones ambientales**

Las condiciones ambientales tienen un efecto obvio sobre la calidad de las fotografías. El día ideal para la fotografía aérea es uno brillante, el cual esté libre de nubes y bruma por debajo de la altura de vuelo requerida por la aeronave. Preferiblemente deberán haber



algunas nubes delgadas sobre el avión para reducir rayos del Sol con lo cual los objetos sobresalientes en el terreno no producirán sombras fuertes que oscurezcan detalles; si el Sol está resplandeciente deberá estar a gran altura, para que las sombras que se produzcan sea cortas. Tampoco deberá haber turbulencia en el aire o ésta deberá ser pequeña a la altura de vuelo requerida, ya que esto afecta adversamente la estabilidad del vuelo lento del avión.

Estas condiciones varían con la época del año y la localidad. En el Reino Unido los mejores meses para la toma de fotografías aéreas son de abril a octubre. Los retrasos debidos a condiciones climáticas desfavorables son inevitables usualmente y es prudente planear con delicadeza el vuelo cuando se usa la fotogrametría aérea para proyectos cartográficos. [17]

## Levantamiento aéreo

Para uso fotogramétrico, las fotografías se deben tomar de una forma particular. No solamente se debe cubrir el área de terreno con una serie de fotografías entre las cuales no existe ningún hueco, sino también es esencial para la exploración estereoscópica que cada punto del terreno aparezca por lo menos en dos fotografías.

Para lograr esto, las fotografías se toman en una serie de fajas. Como la aeronave vuela en línea recta, las fotografías se toman a intervalos tales que exista un traslape o sobreposición mínima del 60 % entre fotografías consecutivas. Este traslape atrás y adelante asegura la cobertura estereoscópica a lo largo de la faja con un margen de error. Dos fotografías consecutivas reciben el nombre de par estereoscópico.

La Figura No. 41 ilustra tres fotografías sucesivas tomadas desde las estaciones aéreas 1, 2 y 3 respectivamente. X, Y y Z son puntos en el terreno y Xt, Yt y Zt son los de la fotografía. La distancia entre las estaciones aéreas se le conoce con el nombre de base aéreas, B. Se puede ver que existe un traslape del 20 % entre las tres fotografías, y que el punto principal del terreno Y, el cual esta verticalmente por debajo de Yt aparece en las tres fotografías como Y' en la fotografía 1 y como Y'' en la 3. Así, por triángulos semejantes,

$$\frac{f}{H} = \frac{X1Y'}{XY} = \frac{X1Y'}{B} = \frac{b}{B} \quad (17)$$

$$B = \frac{bH}{F} \quad (18)$$

B es igual a la parte de la fotografía no incluida en el traslape por su proximidad inmediata. Si el traslape atrás y adelante es del 60 %, entonces  $b=(40/100) \times 230 \text{ mm}$  para una fotografía de formato cuadrado de 230 mm.

El número de fotografías en una faja para una escala determinada se puede calcular ya que B se puede saber. Por lo menos se debe añadir una fotografía al número total para asegurar el cubrimiento total. Las fajas subsecuentes se vuelan paralelas a la primera, siendo el traslape lateral entre fajas del 15 al 35 %. Esto permite que las fajas se conecten y dejen un margen de error en la navegación. Si w es la porción lateral de la fotografía no incluida en el traslape y W es la distancia correspondiente en el terreno,

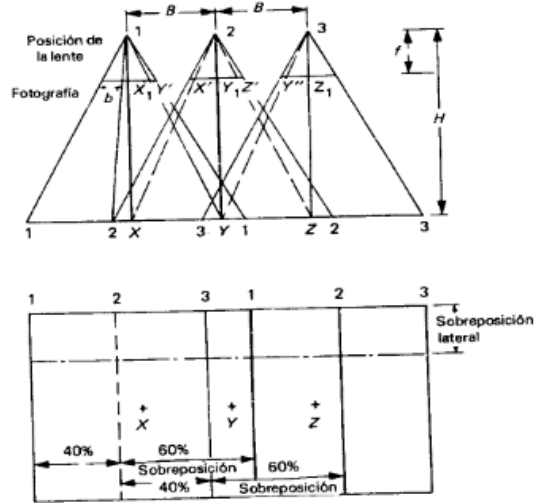


Figura 41: Ilustración de tres fotografías sucesivas desde sus respectivas aéreas [17]

$$\frac{w}{W} = \frac{f}{H} \quad (19)$$

$$W = \frac{wxH}{f} \quad (20)$$

Si el traslape literal es del 25 %, entonces  $w = (75/100) \times 230$  mm para una fotografía de formato cuadrado de 230 mm. La dimensión correspondiente en el terreno,  $W$ , se puede obtener para cualquier escala de la fotografía.  $W$  también es la distancia entre las líneas de vuelo y se puede determinar el número de líneas de vuelo para cubrir al ancho del área. Nuevamente, se debe añadir una línea adicional para completar el cubrimiento.

El área neta de terreno cubierta por una fotografía es  $W \times B$  y se puede ver que el número de fotografías necesarias para cubrir un área  $A$  será  $A/(W \times B)$ . Esto da solamente una estimación preliminar, ya que el número necesario dependerá de la disposición en la cual las fajas de fotografías cubran el área.

El vuelo para fotografías aéreas requiere gran habilidad y práctica. En el momento de fotografiar, el eje de la cámara debe estar dentro de un grado o dos con respecto a la vertical y se debe mantener la altura de vuelo predeterminada. También la orientación de la cámara debe ser correcta en relación con la dirección de la aeronave. Para prevenir que el avión derive de su curso correcto bajo la acción de vientos cruzados, éste se debe dirigir de tal forma que se mantenga dentro de la línea convenida; en este caso las fotografías no formaran una faja continua a menos que la cámara se gire para que las fotografías sean tomadas en la forma correcta; la mira de fotonavegación mencionada previamente, permite detectar las correcciones necesarias. El curso se puede dar por medio de una brújula o con marcas en tierra, pero esto es difícil en distancias de, por ejemplo, 20 o 25 km sin marcas intermedias, para esto se tienen sistemas para rastrear y controlar el vuelo por líneas rectas y paralelas. Uno de estos sistemas es el Litton Photogrammetric Integrated Control System, cuyo componente principal es un sistema de navegación que utiliza plataformas inerciales. Los procedimientos

y el soporte lógico de cómputo se han desarrollado con referencias particulares a la fotografía aérea, y una unidad de interface permite pasar los comandos de control y las anotaciones a dos cámaras. [17]

## **Ortofotomapas**

Un ortofotomapa es un producto fotográfico en el cual las distorsiones producidas por el relieve del terreno y la inclinación se han eliminado y como resultado la ortografía posee las características geométricas de un mapa. Tal fotografía no se puede tomar directamente desde el aire por lo que se necesita emplear un procedimiento con instrumentos espaciales, los cuales se puede conectar a los restituidores convencionales.

Inicialmente el modelo estereoscópico se coloca con su orientación absoluta correcta en el restituidor. En principio el modelo se divide en una serie de fajas paralelas y después se subdivide en pequeños elementos lineales por medio de una ranura estrecha. Los movimientos de la ranura están relacionados directamente con los movimientos de la marca flotante sobre la superficie del modelo estereoscópico. Al mismo tiempo se expone una película ortonegativa a través de la rendija la cual se mueve a lo largo de cada faja, para producir un negativo libre de desplazamiento por relieve e inclinación a una escala uniforme. El ortonegativo, por lo tanto, retiene todos los detalles presentados en la fotografía original a diferencia del mapa de línea convencional en el cual el operador selecciona los detalles a ser representados.

En el procedimiento anterior, el ortonegativo se produce al mismo tiempo que se hace el barrido, esto es, en un modelo de línea, separando el procedimiento de medición en el estereograficador y la proyección en el instrumento ortográfico. Es posible, sin embargo, utilizar muchos sistemas de ortografía en modelos fuera de línea. Esto requiere utilizar un dispositivo de almacenamiento en el cual se puedan digitalizar los datos del perfil o de la configuración durante el proceso de barrido y después utilizarlos para controlar la exposición de la ortofoto. El modo de operación fuera de línea tiene muchas ventajas sobre la modalidad en línea.

Cuando se añade información adicional como curvas de nivel, nombres de ciudades, cuadrícula, etc., la ortofoto se convierte en un ortofotomapa. Las curvas de nivel se pueden producir de muchas maneras, así como por el mismo formato normal, colocando el modelo estereoscópico en el restituidor. La información adicional se puede añadir a la ortofotografía durante el proceso de impresión. [17]

## **Modelo digital de terreno (MDT)**

Un modelo digital de terreno se puede definir como una muestra estadística de las coordenadas X, Y y Z del terreno, esto es, de la superficie del terreno, de tal forma que la interpolación de la coordenada de Z de cualquier punto puede estimarse precisamente de coordenadas X, Y. Por lo tanto, la morfología de los detalles debe ser representada adecuadamente por las coordenadas de los puntos seleccionados, y no solamente por aquellas coordenadas Z establecidas para la precisión requerida, sino que los puntos deben ser lo suficientemente numerosos y adecuadamente distribuidos. Los datos para un MDT se pueden

generar de un levantamiento directo, por fotogrametría o de un mapa existente. De estas, la técnica fotogramétrica es la más ampliamente utilizada.

Las coordenadas espaciales de estos puntos característicos se pueden almacenar en una computadora para facilitar la interpolación de otros puntos, el MDT se puede clasificar de acuerdo al método de registro de los puntos dentro de uno de los siguientes grupos: puntos ordenados, puntos semiordenados, y puntos aleatorios.

Los modelos de puntos ordenados implican que la posición de cada uno de los puntos característicos se fije con respecto a los puntos que lo rodean y se sugiere una red con disposición cuadrada, rectangular o triangular; los terrenos con forma uniforme son los más apropiados para estas redes.

La medición fotogramétrica es un método eminentemente conveniente para la recolección de datos para este tipo de MDT si las líneas se pueden hacer coincidir con las direcciones X y Y de los ejes del equipo de restitución.

En terreno accidentado las curvas de nivel se pueden digitalizar de tal forma que las ordenadas, X, Y cambien para una coordenada Z constante. Esta forma de MDT cae dentro del grupo designado como de puntos semiordenados, en el cual existe relación entre algunos de los puntos que conforman el modelo. También se incluyen en este grupo los terrenos con pendientes uniformes, en los que se tienen cambios de pendientes bien definidas, para los cuales se miden y almacenan las coordenadas X, Y y Z.

Los modelos de puntos aleatorios demandan que se cuente con una computadora de gran tamaño; la superficie de interpolación tiene que ser formada a partir de los puntos observados, los cuales se pueden medir y almacenar por métodos ordenados o semiordenado sobre la banda de interés. Las relaciones mencionadas para estos grupos no se usan, pero en cambio la superficie de interpolación se basa en un número de puntos cercanos al punto cuya elevación se requiere. Se adopta una superficie basada en el procedimiento de mínimos cuadrados para establecer una superficie parabólica.

Cuando se forma un MDT, la precisión de las mediciones de los puntos individuales obtenidos por fotogrametría son menores que las que se pueden obtener por métodos de levantamiento directo. Las mediciones fotogramétricas son más económicas, ya que se pueden medir muchos más puntos y las pruebas comparativas indican que la precisión promedio es similar después de la interpolación. Sin embargo el potencial de los MDT puede explotarse completamente cuando se usa junto con una computadora y el soporte lógico asociado. [17]

### **Técnicas de medición con equipo simple**

Para muchas aplicaciones de la ingeniería civil se deberán aplicar los métodos rigurosos de fotogrametría aérea discutidos previamente para obtener mediciones con la precisión deseada. Sin embargo, pueden existir ocasiones en las cuales sea aceptable un orden bajo de precisión y se apliquen técnicas de medición que empleen instrumentos simples y no caros. Si bien todos ellos son de naturaleza no rigurosa y hacen ciertas suposiciones relativas a la fotografía aérea y al terreno, muchas de estas técnicas simples pueden ser de importancia para el ingeniero civil. [17]

## Estereoscopios

Para la observación estereoscópica, se debe acomodar un par de fotografías de tal forma que el ojo izquierdo observe la imagen izquierda, y el ojo derecho la imagen derecha solamente. Las dos imágenes combinadas en el cerebro darán una sola de la zona común traslapada, con esto se logra que impresión se relieve de una manera similar como si el observador viera el terreno mismo, esto es, el efecto de la imagen plana de la fotografía se transforma en una apariencia de profundidad espacial y se pueden obtener alturas relativas, a partir de un par estereoscópico.

El estereoscopio de bolsillo es barato, portátil y muy práctico para utilizarse en el campo, pero es incómodo de usar con fotografías aéreas de formato cuadrado de 230 mm y, por consiguiente, el estereoscopio de espejos, es más popular. Este proporciona una separación física de las dos fotografías aéreas cuando tiene un formato cuadrado de 230 mm, empleando una doble refracción del rayo por medio de un sistema de espejos a  $45^\circ$  con la horizontal.

El par de fotografías se deben orientar de forma particular bajo el estereoscopio. Se debe encontrar los puntos principales de las fotografías, y el punto principal de la fotografía derecha debe identificarse y marcarse en la fotografía izquierda y viceversa. Las fotografías se separan con la sobreposición en el lado inferior para dar una fusión satisfactoria por una distancia especificada por el fabricante. Las fotografías se pueden rotar sobre unos pernos colocados por debajo de sus respectivos puntos centrales hasta que los dos puntos principales transferidos sean colineales con los respectivos puntos principales. El visor debe estar siempre paralelo a esta base. Las fotografías se pueden iluminar uniformemente y para prevenir el movimiento de estas, se deben quitar los pernos.

## Método radial

Se ha demostrado que en una fotografía aérea la distorsión debida a la altura es radial a partir del punto de plomada mientras que las distorsiones debidas a la inclinación lo son desde el isocentro. Una suposición que también se puede hacer es que ambas distorsiones son radiales desde el punto principal estipulando que el ángulo de inclinación es pequeño, menor de  $2^\circ$  o  $3^\circ$ , y que las variaciones de la altura del terreno son pequeñas comparadas con la altura de vuelo. Esta suposición se usa en el método radial y conduce a muchas simplificaciones, ya que el punto principal se puede localizar por medio de las marcas fiduciales, mientras que el punto de plomada y el isocentro no se localiza tan fácilmente. [17]

## Métodos perspectivos

Si se supone que el área de terreno cubierta por una fotografía aérea, o parte de ella, es plana, las relaciones entre la proyección normal se mantienen para el terreno y la fotografía así como para la fotografía y el mapa. Para el dibujo de los detalles planimétricos están disponibles muchos métodos simples, basados en la transformación perspectiva y utilizando una sola fotografía. En uno de estos métodos para localizar la posición F en un mapa de un punto de imagen f, se usa el método de tiras de papel, el cual hace uso del principio de la relación cruzada. La Figura No. 42 muestra cuatro puntos de control A, B, C y D y sus

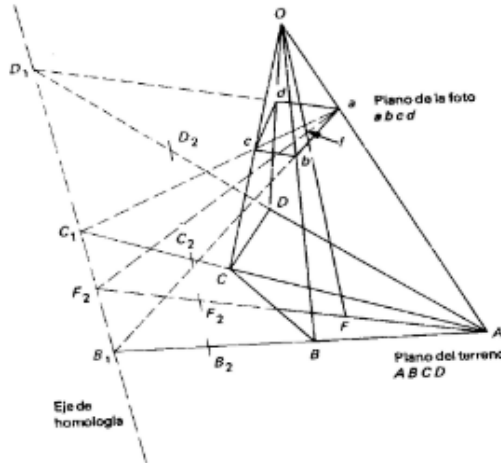


Figura 42: Muestra de toma aérea con cuatro puntos de control [17]

imágenes en a, b, c y d sobre la fotografía. Los dos planos se intersecan en una línea y las líneas sobre esos planos conectan los pares de puntos intersecados sobre esa línea; esto es, ab y AB en B1.

$$\frac{C_1B_1}{C_1F_1} / \frac{C_1B_1}{D_1F_1} \quad (21)$$

Esta se conoce como relación cruzada y se puede ver rápidamente que tiene la misma magnitud que

$$\frac{C_2B_2}{C_2F_2} / \frac{C_2B_2}{D_2F_2} \quad (22)$$

Dando por cualquier otro corte transversal las líneas correspondientes en el plano del terreno, o por un corte equivalente las líneas en el plano de la foto

La intersección de las líneas salientes de una imagen, digamos de a hacia b,c,d y f, se marcan en la tira de papel y se identifican como en la Figura No. 43. Se adopta un proceso similar en d. Estas tiras se pueden posicionar sobre las líneas correspondientes dibujadas en los puntos de control sobre el mapa, con lo que las líneas marcadas previamente están sobre las líneas respectivas a B, C y D o A, B y C. La posición de F se puede fijar usando las líneas Af1 y Df'. Si se van a localizar muchos puntos, entonces las redes se pueden dibujar sobre el mapa y la fotografía para producir las líneas correspondientes sobre ellos como en la Figura No. 43 Con esto se pueden transferir los detalles de la fotografía al mapa con las referencias de la red.

La relación cruzada puede ser útil en otras varias situaciones. Por ejemplo, la velocidad de vehículos se puede determinar, si estos aparecen dos veces en una fotografía. Si B1C1 y D1F1 son la primera y segunda posición del vehículo, con las correspondientes imágenes en B2C2 y D2F2 en la Figura No. 44.

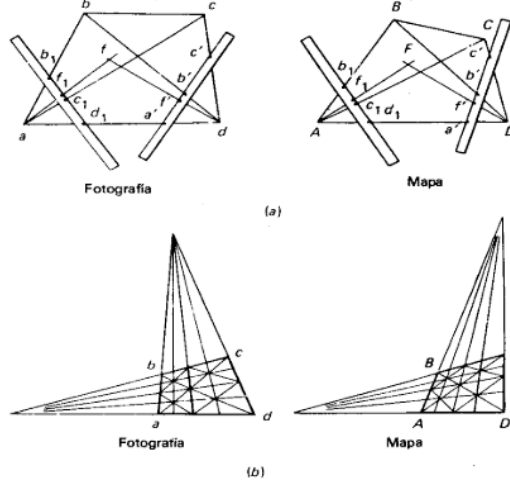


Figura 43: La intersección de las líneas salientes de una imagen [17]

$$\frac{C_1B_1/D_1B_1}{C_1F_1/D_1F_1} = \frac{C_2B_2/D_2B_2}{C_2F_2/D_2F_2} \quad (23)$$

Haciendo la longitud del vehículo como  $L$  y  $B_1F_1 = C_1D_1 = s$

$$\frac{C_1B_1/D_1B_1}{C_1F_1/D_1F_1} = \frac{L}{L-s} / \frac{L+s}{L} = \frac{L^2}{L^2-s^2} \quad (24)$$

Similarmente

$$\frac{C_2B_2/D_2B_2}{C_2F_2/D_2F_2} = \frac{L_1}{L_1-s_1} / \frac{L_2}{L_2-s_2} = \frac{l_1l_2}{L_1^2+l_1(s_2-s_1)-s_1s_2} \quad (25)$$

Ya que

$$l_2 + s_1 = l_1 + s_2 \quad (26)$$

$$\frac{L^2}{L^2-s^2} = \frac{l_1l_2}{l_1l_2-s_1s_2} \quad (27)$$

$$s^2 = \frac{s_1s_2}{l_1l_2} L^2 \quad (28)$$

$s$  se puede determinar ya que todas las otras cantidades son conocidas, con lo que la velocidad será  $s/t$ . Las direcciones relativas del vehículo y el plano de la imagen no son importantes, pero el intervalo ( $t$ ) entre las dos exposiciones debe conocerse precisamente. [17]

## Mosaico

Si un conjunto de fotografías verticales traslapadas se colocan juntas sobre un tablero de apoyo, se obtiene un mapa aproximado, o vista aérea del área, la cual no tiene una escala

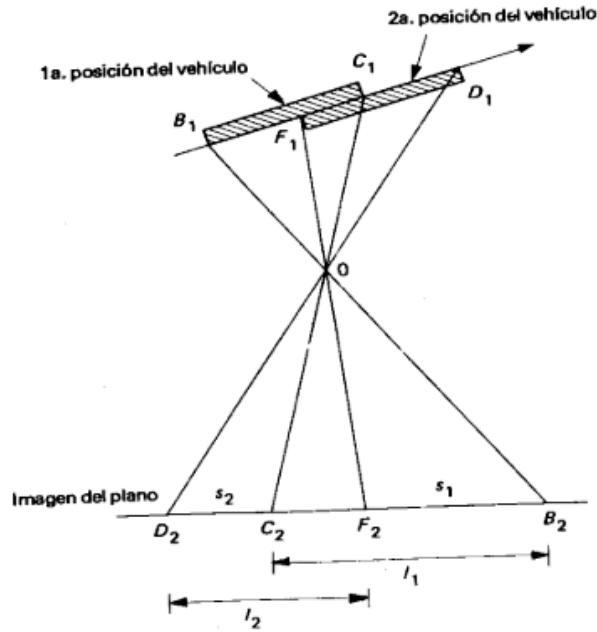


Figura 44: Tomas aéreas en movimiento [17]

uniforme. A esto se le llama mosaico sin control, y su ensamble requiere mucha habilidad ya que las distorsiones por relieve e inclinación que ocurren inevitablemente en cada fotografía causan la pérdida de detalles entre fotografías adyacentes. Estas se deben disfrazar lo mejor posible, y así solamente se usará la porción central de las fotos, donde las distorsiones son menores. El mosaico se ensambla usualmente desde el centro hacia fuera y se requieren las características como caminos, ríos, etc., se pueden enfatizar, así como añadir letreros. El mosaico se refotografía para que la apariencia final sea la de una sola foto.

El mosaico puede ser de gran utilidad en los procesos de reconocimiento y planeación ya que este contiene toda la información que se puede ver desde la aeronave en el momento de la toma fotográfica. Las fotografías muestran puntos tales como el tipo y densidad de cualquier desarrollo, uso del suelo, accesos existentes y aquellos requeridos para el proyecto de carreteras, alteraciones en la topografía, etc. También revela información a gran detalle que después puede dibujarse sobre un mapa. [17]

## 5. Fotogrametría terrestre

La fotogrametría terrestre emplea fotografías tomadas desde puntos sobre la superficie de la Tierra con propósitos de medición y sus principios son muy similares a los que la fotogrametría aérea. Sin embargo, las fotografías se toman desde estaciones fijas en el terreno, con lo que es posible determinar la orientación absoluta de la cámara en el momento de la exposición y simplificar el proceso de medición subsecuente.

La fotogrametría terrestre se realiza normalmente con un fototeodolito que consiste de una cámara de distancia focal conocida en combinación con un teodolito. Este permite la determinación de la orientación de los ejes de la cámara y las mediciones angulares necesarias



para fijar la estación de la cámara. El plano de imagen de la cámara está representado por la superficie de la placa de cristal sobre la cual se graban cuatro marcas fiduciales, las cuales aparecen sobre cada fotografía, lo que permite localizar la posición del punto principal, como se explicó para las fotografías aéreas. La presencia de estas marcas permite que se designe a estas cámaras como cámara métrica, en otras palabras, es una cámara diseñada específicamente para propósitos fotogramétricos.

El eje es perpendicular a la placa de cristal y por lo tanto al material fotográfico, la distancia entre el material y el centro óptico se conoce como la distancia principal. En esta cámara, la cual esta enfocada al infinito, la distancia principal es virtualmente la distancia focal del lente, pero otras cámaras se fabrican de tal forma que su distancia principal puede variar con determinación precisa, con lo que el enfoque se puede obtener en rangos muy cortos.

El eje óptico de la cámara P32 está acomodado paralelo a la línea de colimación del telescopio del teodolito y la línea que une las marcas fiduciales en los lados cortos del formato deben ser horizontales cuando el eje del teodolito está vertical. En este respecto se debe puntualizar que el formato particular de estas fotografías es de 60 mm x 80 mm y que produce un campo visual asimétrico ya que la placa central de la cámara P32 está fuera de línea por 10 mm, paralela a los lados cortos, desde el punto principal.

La cámara rota con el teodolito sobre el eje vertical y de alturas, pudiendo rotar también 360° sobre su propio eje óptico, con paradas fijas a intervalos de 90°. Así las fotografías tomadas con la cámara P32 pueden tener el lado largo horizontal o verticalmente con lo que, junto con la inclinación de la cámara mencionada anteriormente, se puede hacer adaptaciones a la configuración del terreno. No todos los fototeodolitos proporcionan estas facilidades por lo que la discusión subsecuente no las toma en cuenta. .[17]

## **Técnicas fotográficas**

Para fijar la posición de un punto se requiere que las fotografías sean tomadas por lo menos desde dos estaciones de la cámara, cuyas posiciones deben ser conocidas. Cuando se obtienen estas fotografías las direcciones de los ejes de la cámara pueden converger desde las estaciones o ser paralelos.

La Figura No. 45 se refiere al primer caso y ésta muestra que la cámara fue posicionada en cada estación en turno de tal forma que el punto C requerido fuera incluido en el detalle mostrado en cada fotografías; la búsqueda se facilita por medio de una ventana de cristal. Se toman suficientes fotografías desde cada estación para localizar los puntos de interés y los muy importantes se deben localizar en fotografías desde tres estaciones. Es más conveniente si las placas están verticales al momento de la exposición fotográfica y suponiendo esto se presenta la siguiente discusión. Los ángulos A1AB y B1BA, los cuales indican la dirección del eje de la cámara en cada estación, se deben medir en las estaciones importantes para cada fotografía y anotarse cuidadosamente en una libreta de campo; para la línea de visual del teodolito puede dirigirse inicialmente a lo largo de AB o BA, respectivamente. Después del procesamiento, las coordenadas de la imagen del punto C se pueden determinar rápidamente con respecto al horizonte principal y al eje vertical conectando las marcas fiduciales respectivas.

El procedimiento general es:

Se debe efectuar un reconocimiento, particularmente de levantamiento para planos de escalas mayores a 1 en 20000, en virtud de que los puntos seleccionados para las estaciones de fototeodolito den intersecciones satisfactorias, es decir, los puntos seleccionados como puntos de control del levantamiento den figuras geométricas adecuadamente condicionales. Durante este proceso el ingeniero topógrafo comprobará que el área sea cubierta completamente por las fotografías.

El levantamiento de control debe dirigirse, en función del área del levantamiento. Se puede requerir una triangulación precisa, y una triangulación de menor orden ligada a ella. Estas estaciones pueden servir como estaciones del fototeodolito si se requieren y se pueden obtener estaciones extras por resección desde tres estaciones, tomando una fotografía desde la estación más cercana seleccionada para incluir las tres estaciones de triangulación.

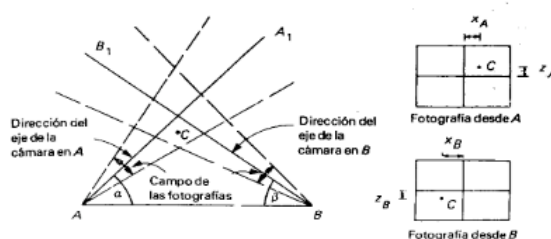


Figura 45: Muestra que la cámara fue posicionada en cada estación [17]

Midiendo sobre las fotografías, la estación se puede localizar por medio de la solución del problema de los tres vértices. Si el área es pequeña en extensión puede ser suficiente una red, midiéndose la línea base por medio de la barra subtensa. La elevación de las estaciones se puede obtener por medio de la nivelación trigonométrica o de taquimetría.

Para propósitos de dibujo, los puntos prominentes deben aparecer en las zonas comunes de traslape de dos fotografías. Es en especial la buena intersección de los ejes de la cámara para dibujar los puntos, y los muy importantes deben aparecer en tres fotografías desde tres estaciones separadas. El terreno no cubierto desde una estación instrumental seleccionada requerirá de estaciones subsidiarias para completar el cubrimiento. Donde el terreno es plano y tendiente a caer desde la cámara, el método de fotogrametría terrestre tiende a ser anti-económico considerando la gran cantidad de terreno no cubierto por las fotografías, y como un principio general el terreno debe tener la pendiente hacia el fototeodolito. El número de estaciones requeridas se determinará por las características generales del área a levantar. Las nubes bajas producen dificultades, por lo que se debe excluir ciertas estaciones en terrenos montañosos.

Se debe elaborar un croquis para cada estación instrumental en cada exposición mostrando la vista tomada, y el ángulo leído se puede registrar con ésta. [17]

### Medición en la foto

El método más simple para dibujar a partir de fotografías terrestres es el gráfico. En la Figura No. 46, a y b representan las estaciones de la cámara en A y B, dibujadas a la escala

requerida del mapa sobre una hoja de material para dibujo. Las direcciones del eje de la cámara se dibujan a los ángulos medidos. Cada fotografía se posiciona de tal forma que la línea que une las marcas fiduciales verticales esté en la dirección del eje de la cámara en la estación y tal que el punto principal, esté a una distancia igual a la distancia principal,  $f$ , desde la posición dibujada de la estación. Se dibuja una línea, o eje de referencia, paralela al eje de la cámara a través del punto de detalle  $C$ , marcándose la posición en la cual se cruza con la línea horizontal. En efecto, las coordenadas de  $X_a$  y  $X_b$  se deberán marcar sobre estas líneas. Dibujando una línea a través de la posición de la estación de la cámara y el punto sobre la línea horizontal recién obtenido, ésta intersectará una línea similar obtenida desde la segunda fotografía en la posición sobre el plano del punto  $C$ .

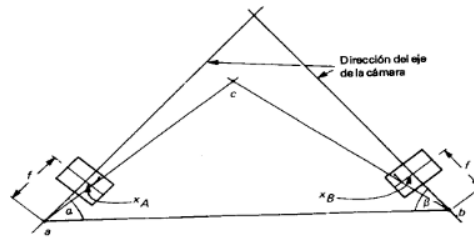


Figura 46: Posición de estaciones de cámara en A y B [17]

La determinación de la altura se puede obtener también a partir de las fotografías. Habiéndose encontrado la posición en el plano  $C1$  de un cierto punto, se requiere determinar la altura  $H$  de ese punto con respecto al plano horizontal que contiene al eje de la cámara. [17]

## J. Evolución histórica de la fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que cuenta con una larga trayectoria, ya por el año 350 a. C Aristóteles lo refirió como el proceso de proyección óptica de las imágenes. En el Renacimiento, diversos pintores y tratadistas, en particular Leonardo da Vinci y Alberto Durero, investigaron de forma sistemática sobre las leyes de la perspectiva. Luego en 1636, Girard Desargues publicó su primer libro con el objetivo de racionalizar la geometría proyectiva. Más tarde en 1759, el matemático alemán Johann Heinrich Lambert publicó la "Freye Perspective", texto en el cual ya se sugería que los principios de la perspectiva se podrían utilizar para la obtención de planos y mapas.

Habrà que esperar sin embargo hasta el siglo XIX para que un oficial francés de ingenieros, el capitán Aimé Laussedat, empiece a utilizar perspectivas obtenidas con una cámara clara, invención del británico Wollaston, para medir edificios. Mayor éxito que Laussedat logró el alemán Albrech Meydenbauer, a quién se debe el nombre que hoy damos a esta técnica.

Tanto Laussedat como Metdenbauer utilizaban el llamado método de las intersecciones, que es un procedimiento gráfico en el que es preciso conocer la posición desde la que se ha tomado cada fotografía y las direcciones de los ejes ópticos de la cámara en cada estación. Este método, muy laborioso y que exige trabajar con fotografías de gran formato, siguió

empleándose hasta prácticamente la segunda Guerra Mundial.

El método de la estereofotogrametría utiliza pares de fotografías obtenidas con ejes sensiblemente paralelos de tal manera que sea posible observar las fotos estereoscópicamente. Este fenómeno fue utilizado por Stolz, quien estableció nuevos avances en la identificación de puntos homólogos. Tiempo después, con base en estos avances, Pulfrich construyó en 1901 un estereocomparador, primer aparato de precisión para la medición fotogramétrica y que es la base de todos los actuales aparatos de restitución. Finalmente, en 1908, el oficial de ingenieros austriaco Von Orel construye el primer estereoautógrafo, que era un aparato de restitución que permitía el dibujo continuo y semiautomático.

Con la aparición de los ordenadores que permiten una gran velocidad de cálculo, actualmente la fotogrametría ha vuelto al sistema ya utilizado con los estereocomparadores: el cálculo analítico de las coordenadas espaciales a partir de las coordenadas de imagen medidas con un estereocomparador. La velocidad de cálculo que brinda el ordenador permite la restitución inmediata en tiempo real.[16]

1038	Alhazen publica su traslado sobre óptica, traducido al latín en el año 1270, bajo el título <i>Opticae Thesaurus Alhazeni libri vii</i> .
1704	Si Isaac Newton publica el libro <i>Opticks</i> , estableciendo los principios de la óptica moderna.
1725	M.A Capeller produce un mapa del Monte Pilatus, basándose en dibujos en perspectiva.
1727	Johan Heinrich Schulze determina la sensibilidad de las sales de plata a la luz.
1759	Johan Heinrich Lambert desarrolló en su obra <i>Perspectiva libre</i> , el procedimiento sistemático para la transformación de una perspectiva.
1802	Thomas Wedgood inicia las primeras aplicaciones de las ideas de Schulze.
1819	John Herschel descubre el hiposulfito de sodio, que servirá para fijar la imagen.
1827	Joseph Nicéphore Niépce toma la primera foto del mundo.
1832	Sir Charles Wheatstone descubre la forma de recrear la visión estereoscópica mediante dos dibujos con puntos de vista ligeramente diferentes, y un visor para su observación, al que llamó "estereoscopio".
1837	Louis Daguerre, asociado con Niépce, inventa un proceso de yoduro de plata sobre una placa de cuero. El tiempo de exposición, de ocho horas mediante el proceso de Niépce, se reduce a una veintena de minutos.
1839	El 19 de agosto, François Arago, un geodesta de la Academia Francesa de Ciencia, anuncia en sesión pública el proceso fotográfico directo creado por Luis Daguerre, dándole el nombre de "Daguerrotipo".
1839	John Herschel adopta el término "fotografía".
1840	François Arago, demostró la posibilidad de usar fotografías en los levantamientos topográficos.

1849	El oficial Aimé Laussedat, del cuerpo de ingenieros del ejército francés inicia los primeros experimentos con la perspectiva mediante cámara lúcida, para realizar levantamientos topográficos.
1852	El oficial Aimé Laussedat adopta la fotografía para reemplazar la cámara lúcida en los levantamientos topográficos. A este procedimiento le puso el nombre “metrofotografía”.
1855	El fotógrafo Gaspard-Félix Tournanchon (Nadar) toma la primera fotografía aérea del mundo, sobre el poblado de Petit-Bicêtre, desde un globo. El 23 de octubre de ese mismo año, patenta la idea de utilizar la fotografía aérea para realizar los levantamientos topográficos y la realización de mapas.
1859	El coronel Aimé Laussedat presenta una recopilación de sus experimentos.
1873	Creación de las emulsiones fotográficas modernas por John Burgess.
1885	Primer registro fotogramétrico de sitios arqueológicos, en las ruinas de Persépolis.
1888	El capitán Edouard Gaston Daniel Deville inicia la fotogrametría terrestre en Canadá, como alternativa a los levantamientos topográficos extensos, convirtiéndola en un procedimiento rutinario.
1892	F. Stolze inventa la marca flotante.
1893	El arquitecto Albrecht Meydenbauer introduce el término “fotogrametría”.
1896	Edouard Gaston Daniel Deville presenta el primer instrumento que usa pares estereoscópicos para realizar planos de línea.
1909	Carl Pulfrich inicia experimentos con fotos estereoscópicas.
1909	El 24 de abril, un fotógrafo toma la primera fotografía aérea desde un avión, pilotado por Wilbur Wright, sobre Centocelli, cerca de Roma, durante uno de los vuelos de entrenamiento realizados para oficiales de la armada italiana.
1910	Fundación de las Sociedades Internacional para la Fotogrametría, ISP en sus siglas en inglés, actualmente ISPRS, en Austria por E. Dolezal.
1913	Primer congreso de la ISP, llevado a cabo en Viena.
1913	El capitán Cesare Tardivo produce el primer fotoplano basado en fotografías aéreas tomadas desde un avión sobre Benghazi, Libia.

Cuadro 2: Hitos en el desarrollo de la fotogrametría[16]

## 1. La fotogrametría en Guatemala

El único ingeniero caminero del que se tiene antecedente de la utilización de fotogrametría para el trazo preliminar en gabinete y diseño de caminos ha sido el ingeniero Eduardo Goyzueta de Caminos; quien utilizó un aparato tipo aviógrafo marca Volsh, lo más moderno de su época y para lograr la separación de imágenes para obtener el modelo estereoscópico utilizó un filtro verde y uno rojo por foto, tanto en el aparato como por cada ojo en los anteojos para lograr el efecto en la mente. Este aparato es muy parecido al múltiplex de la

Segunda Guerra Mundial. Al Ingeniero Roberto Goyzueta se le veía deambular con planos, fotos y placas aéreas por los corredores del Edificio de Caminos, siempre con el interés y la visión de los beneficios y bondades que el método fotogramétrico podía ofrecer para el desarrollo de los caminos y aprovechando las propiedades y vectores tridimensionales de la fotografía digital. Es de vital importancia el desarrollo de esta técnica en Guatemala, ya que se puede utilizar para anteproyectos de urbanizaciones, estudios de cuencas y proyecciones perspectivas del flujo de lahares y lodos para evitar desgracias de antemano para los huracanes y tormentas para poblados en situación de riesgo. [18]

## **K. Integración de tecnologías**

### **1. Cámara**

La cámara fotogramétrica, llamada también cámara métrica, es una cámara fotográfica cuyos elementos de orientación interior son conocidos y cuya calidad geométrica es tal, que se puede considerar como una proyección central ideal. Como consecuencia de esta calidad geométrica, este tipo de cámaras debe tener foco fijo, ya que cualquier variación en el enfoque haría variar el ángulo de apertura  $\alpha$ . [19]

#### **Componentes de las cámaras fotogramétricas aéreas**

A pesar de que todas las cámaras aéreas difieren ligeramente unas de otras, tienen suficientes parecidos como para hacer una descripción general que abarque todas ellas. Los tres componentes básicos de una cámara aérea son:

- Almacén o magazin.
- Cuerpo de la cámara.
- Ensamble del lente.

#### **Almacén**

El almacén de la cámara, el cual puede ser cambiado durante el vuelo, alberga los rieles que contiene la película expuesta y sin exponer. La capacidad del almacén es de 120 metros de película, lo que representa una capacidad cercana a las 480 fotografías. El almacén también contiene los mecanismos de avance y aplanamiento de la película. El aplanamiento es muy importante en las cámaras aéreas, ya que si el negativo se abultara o se acrecentara durante la exposición, las posiciones de la imagen en las fotografías resultantes pueden ser incorrectas. El aplanado de la película puede ser llevado a cabo en cualquiera de las cuatro maneras siguientes:

Aplicando tensión a la película durante la exposición. Presionando firmemente la película contra una placa de vidrio ubicada delante de la película, en el plano focal. Aplicando una

presión dentro del cono de la cámara, forzando así la película contra una placa plana ubicada detrás de la película. Sosteniendo la película mediante un plato de vacío cuya superficie interior está en el plano focal.

El sistema de vacío es el que ha dado mayor satisfacción y es el más utilizado para llevar a cabo el aplanamiento de la película en las cámaras aéreas. Una placa de vidrio frente a la película es objetable, ya que las posiciones de la imagen son distorsionadas debido a la refracción de los rayos de luz que atraviesan el vidrio. [19]

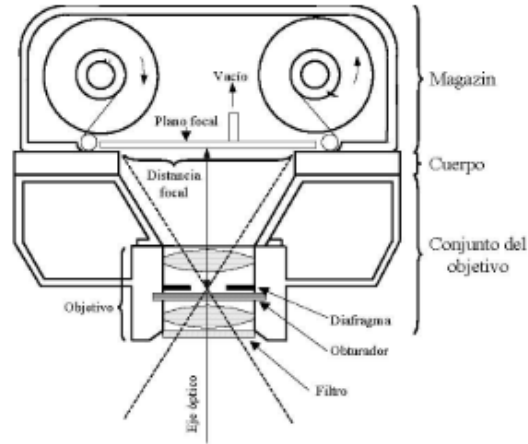


Figura 47: Esquema de cámara fotogramétrica aérea [19]

### Cuerpo de la cámara

El cuerpo de la cámara es una carcasa de una sola pieza que usualmente alberga el mecanismo de operación. Este mecanismo provee la fuerza para operar la cámara a través de todo su ciclo, considerando el mismo en:

- Avance de la película.
- Armado del obturador.
- Disparo del obturador.

La fuerza para el mecanismo de operación puede ser suministrada manualmente o mediante energía eléctrica. El cuerpo de la cámara también contiene asas o agarraderos para su transporte y conectores para fuentes externas. [19]

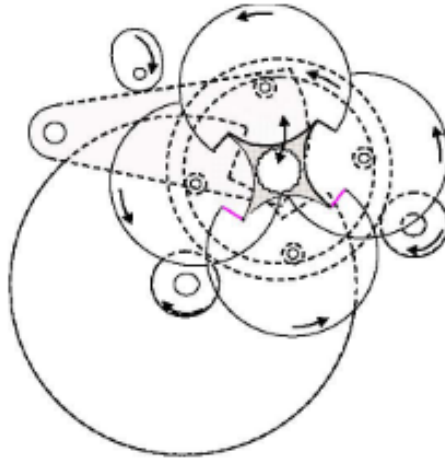


Figura 48: Diagrama de obturador de una cámara aérea [19]

### Ensamble del lente

El ensamble del lente contiene varias partes que llevan a cabo varias funciones. Contendidos en el ensamble del lente están los lentes, el filtro, el obturador y el diafragma. En la mayoría de las cámaras el ensamble del lente también contiene un cono interior. Este cono interior soporta el ensamble del lente y el plano focal en una posición relativa entre ellos fija. Este cono también fija los llamados elementos de orientación interior. Estos elementos son determinados cuidadosamente mediante la calibración de la cámara, de tal manera que pueden ser usados en cálculos fotogramétricos. Este cono está hecho de metal con un bajo coeficiente de dilatación térmica, para que los cambios en las temperaturas de operación no desarreglen la calibración. En algunas cámaras aéreas, las cuales no tienen cono interior, el cuerpo y el cono exterior actúan conjuntamente para mantener los lentes y el plano focal en su posición relativa.

El objetivo de la cámara es la parte más importante de la misma. El toma los rayos de luz desde el objeto en el espacio y los lleva a foco en el plano focal. Los objetivos utilizados en las cámaras aéreas son objetivos altamente corregidos, constituidos por varios lentes. El filtro sirve para tres propósitos:

- Reduce el efecto del velo atmosférico.
- Ayuda a proveer una distribución uniforme de la luz en todo el formato.
- Protege al lente de daños y suciedad.

### El plano focal

El plano focal de una cámara es el plano en el cual todos los rayos de luz incidente llegan a foco. En una fotografía aérea las distancias objeto son grandes en comparación con las distancias imagen. Es por ello que las cámaras aéreas utilizan un foco fijo para distancias



objeto infinitas. Esto es logrado colocando el plano focal de la manera más exacta posible, a una distancia igual a la longitud focal detrás del punto nodal posterior del objetivo de la cámara.

El plano focal queda definido por la superficie superior del cuadro plano focal. Ésta es la superficie contra la cual es aplanada la película cuando se hace la exposición.

El marco que representa físicamente el plano focal contiene además:

**Marcas fiduciales:** Las marcas fiduciales de la cámara son generalmente cuatro y están localizadas bien sea en la mitad del cuadro del plano focal o bien en las esquinas. Estas marcas son registradas en el negativo cuando se toma la fotografía. Las líneas que unen marcas fiduciales opuestas deberían intersectarse en el punto principal de la fotografía, y se pone todo el cuidado necesario en la fabricación de la cámara para que se dé esta condición.

El punto principal se define como el punto en el plano focal donde una línea que pasa por el punto nodal posterior del objetivo de la cámara, y que es perpendicular al plano focal, e intersecta al plano focal.

**Información marginal:** Esta área de información se encuentra siempre sobre uno de los lados del marco. Tiene un sistema independiente de iluminación eléctrica y es registrado al mismo tiempo que se hace la exposición.[19]

En el área de información marginal suele aparecer:

- **Altímetro:** Registra la altura absoluta de vuelo sobre el nivel del mar.
- **Reloj:** Indicación de la hora puede ser útil para calcular altura de objetos verticales como por ejemplo árboles edificios etc. Por el método de sombra.
- **Nivel esférico:** Se usa para conocer la inclinación de cada fotografía.
- **Identificación de la cámara:** Esto es necesario para obtener la distancia principal, marca, tipo, serie, etc. Con estos datos es posible localizar la cámara empleada para poder llevar un control sobre el tiempo transcurrido entre diferentes calibraciones. El valor de la distancia principal, permite calcular la escala de la fotografía.
- **Número de las fotografías:** Permite posteriormente armar y ordenar la fotografía en faja y bloques.
- **Datos de la misión:** Permite identificar el área y la fecha en que fueron tomadas las fotografías.
- **Indicador del funcionamiento del sistema de vacío:** Si este funciona correctamente aparece una “v” o una circunferencia, en el borde de la fotografía. De lo contrario, no aparece o solo se registra parte de la señal.

## 2. Drones

### ¿Qué es un drone?

Un “drone” es un objeto volador no tripulado capaz de ser manejado a distancia o trazar su propia ruta mediante GPS, (Global Positioning System, por sus siglas en Inglés.)

Se puede diferenciar entre dos tipos de drones: a) En forma de avión, los cuales tienen la ventaja del planeo por lo tanto tienen un consumo menor; y b) En forma de cuadricóptero, los cuales son propulsados por cuatro hélices y con la posibilidad de moverse en todas direcciones y permanecer quietos en el aire, sobre este último tipo se centrará el presente trabajo. [20]

### Partes básicas de un drone

Las partes básicas de un drone son:

- Motores, hélices, y ESCS: Son los componentes fundamentales para mantener un drone en el aire. Los ESCs (Electronic Speed Control) regulan la potencia eléctrica suministrada a los motores, y por lo tanto la velocidad de giro del rotor, que al girar a alta velocidad suspende el drone en el aire gracias a las hélices que se mueven solidariamente.
- Controlador de vuelo: Se trata del cerebro de la máquina, ya que detecta y controla todos los aspectos de esta. Prácticamente todos los componentes electrónicos van conectados al controlador de vuelo.
- Mando o control remoto: Es un dispositivo con dos joysticks a través de la cual se puede introducir los movimientos que el drone realice gracias a unos comandos.
- Radio receptor: Se trata del componente que recibe las órdenes del mando, transmitiéndolas al controlador de vuelo, para que la instrucción sea ejecutada mediante variaciones en la velocidad de los rotores que alteran el curso del drone a voluntad del usuario. En caso de querer activar un accesorio, la placa también se encargaría después de recibir la señal de mando.
- Baterías: Estas proporcionan la energía necesaria al drone para realizar todas sus funciones deseadas. Suelen ser de polímero de litio, de bajo peso y alta descarga, ideales para maniobrar con el aparato. [20]

### Características técnicas de un drone

Las características de un drone varían dependiendo de la gama de este, pero en este apartado se intentará marcar unos mínimos y unos máximos de las características más importantes de un drone.

## **Peso**

El dron de juguete estándar no suele llegar al kilogramo, variando entre los 50 gr y los 500 gr.

Cuando se pasa el kilogramo, ya se puede hablar de un dron “industrial”, utilizado por empresas para varios trabajos, y de estos podemos encontrar de hasta 25 kg o más, en función del tipo de trabajo que se quiera realizar.

## **Velocidad**

La velocidad puede variar entre los 2 m/s en el caso de los drones más pequeños a los 27.28 m/s (100km/h) en adelante en drones de gama media.

## **Altitud**

Los drones de gama más baja no pueden llegar a una gran altitud debido al poco rango de sus señales, de las que se hablará más adelante, pero un dron de gama media /alta puede llegar fácilmente a los 120 m de altura.

## **Rango de operación**

Esta característica es la que nos indica lo máximo que se puede alejar el dron del sitio desde el cual recibe la señal, en caso de ser manejado con un mando radiocontrol.

## **Autonomía**

Esta característica es de gran importancia, puesto que dependerá de la batería integrada al dron, la cual varía desde 15 minutos, para volar un dron de juguete, a los 90 minutos, para volar drones de las gamas más altas. Cuanto más peso sean capaces de levantar los motores de los drones, más pesadas son las baterías que se pueden añadir a los mismos, y por lo tanto mayor autonomía de vuelo. [20]

### **3. Limitaciones de drones**

Los drones también contienen algunas limitaciones, tanto por falta de concreción en algunos aspectos legislativos, como por la polémica causada alrededor de su uso. Para tener una base de la que partir en el análisis de los problemas ocasionados, se explica la legislación vigente.

## **Legislación a seguir para hacer uso de los drones**

### **Pre-reserva de distintivo**

Al momento de ingresar la aeronave no tripulada al país, tendrá que solicitar la pre-reserva de distintivo, este documento es válido únicamente para DESADUANAJE de la aeronave no tripulada. Debiendo presentar dentro de los ocho días hábiles posteriores al egreso de la aeronave de la aduana, la solicitud de reserva en el Registro Aeronáutico Nacional e inicial el trámite correspondiente para su inscripción.

### **Reservación de distintivo**

Todo operador de vehículos no tripulados debe formalizar el trámite ante el RAN de la DGAC, a efecto se le asigne un distintivo o número de identificación consecutivo. Este tipo de documento, es válido para la inscripción de la aeronave no tripulada (UAV) como Bien Inmueble ante el Registro General de la Propiedad de Guatemala.

Se asignará un distintivo empleando las letras UAV-TG.XXX, donde XXX es un número consecutivo separado por un guión. Este número consecutivo corresponde a un estricto orden cronológico otorgado por el Registro Aeronáutico Nacional.

La ubicación del distintivo de la identificación se hará de la manera siguiente:

- En la parte inferior del ala izquierda, en tamaño proporcional al tamaño de la superficie, o en ambas partes del estabilizador vertical únicamente los últimos tres dígitos.
- Para aeronaves no tripuladas que no poseen ala fija, se deberá colocar los últimos tres dígitos en una parte visible de ambos lados de la aeronave.

En ambos casos deben de contar interna o externamente con una placa metálica la cual indique los datos siguientes:

- Modelo
- Serie
- Propietario
- Distintivo de identificación

Estos datos deberán coincidir con los números de identificación del dispositivo de actuación remota de cada aeronave.

### **Responsabilidad**

Según lo estipulado en los Artículos 8 y 12 del Convenio de la Ley de Aviación Civil; Artículos 107 y 109 de la Ley de Aviación Civil; Artículos 6, 157, y 200 del Reglamento

de la Ley de Aviación Civil; y la Regulación de Aviación Civil de Aeronaves No Tripuladas Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales (RAC 101), secciones 101.5, 101.13, 101.17, 101.21, 101.23, 101.25, 101.35, 101.35, 101.37, 101.39, 101.55, 101.77; el propietario de la Aeronave No Tripulada, es responsable de cualquier tipo de lesión y daño causado a terceras personas como a la propiedad privada derivado de actividades de aviación general, como consecuencia de sus operaciones en vuelo o en la superficie. Así mismo, de operar en lugares apropiados para el desarrollo de sus actividades y bajo las condiciones que establezcan las Regulaciones. [21]

## **L. Métodos de navegación fotográfica**

Un método de navegación tiene como objetivo el guiar un avión o drone entre un punto de partida a uno de llegada, conociendo su posición en todo momento. Generalmente las trayectorias vienen impuestas por el trabajo, de forma que el avión fotográfico no puede apenas separarse de su trayectoria, para asegurar el recubrimiento lateral. Existen varios métodos de navegación:

### **1. Navegación a simple vista con cartografía disponible**

Se representan, sobre los mapas-índices, los ejes de vuelo o pasadas y la situación con el menor error posible, de los puntos principales de los fotogramas. El navegante tratará de seguirlos ayudado por las indicaciones de un telescopio de navegación, que permite usar referencias hacia delante y hacia atrás.

Las pasadas irán numeradas, así como todos los fotogramas de inicio y fin de la pasada, que llevarán rotulado su número de exposición.

### **2. Navegación a simple vista sin cartografía previa**

Muchas veces en los países en desarrollo, la cartografía de la zona está muy atrasada, es inexacta o no existe. En estos casos el navegante recurre a algún método “sin mapa” para obtener una completa cobertura fotográfica.

Existen diversos métodos de navegación sin cartografía, entre los cuales citaremos:

#### **Sobrevuelo a mayor nivel**

Se usa este método cuando la zona de trabajo es relativamente pequeña (ciudades, áreas de ríos, pequeños proyectos de desarrollo, emplazamiento de presas, entre otros.)

Este método consiste en fotografiar inicialmente la zona de trabajo desde una gran latitud y a menor escala. Sobre las fotografías obtenidas anteriormente, se marcan las pasadas fotográficas a la escala correcta elegida para el vuelo final, ejecutando el vuelo basándose en la información obtenida.

En la utilización de este método, la primera operación que hay que decidir es la escala necesaria para sobrevolar el área. Hay que tener en cuenta el tamaño del área requerida y la escala a la cual el navegante tiene que volar la misión final. [22]

### **Vuelo de franjas entrelazadas**

Este método se usa para zonas de trabajo más extensas.

Al igual que el método anterior, se empezará por realizar un vuelo a una escala menor (mayor altitud), para preparar el material básico mediante franjas enlazadas. Como se puede ver en la Figura No. 49. Se planificará la zona de trabajo a sobrevolar de manera que fuera mayor que la solicitada.

Obtenidas las copias, se unen entre si para formar franjas, estableciendo la línea central y las transversales de manera que el detalle común de ambas quede alineado. Sobre la franja central se dibuja un eje de vuelo y se agregan el resto de los ejes de vuelo de las pasadas, se pueden numerar las pasadas para su organización, procediendo a realizar el vuelo a la escala final apoyándonos en la información aportada por las fotografías anteriores. [22]

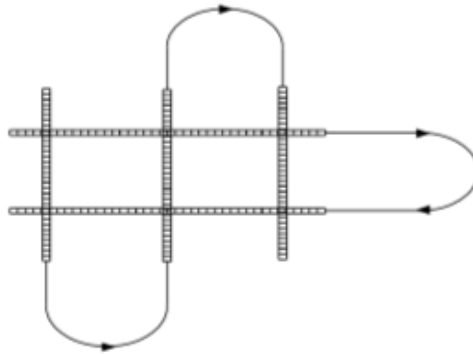


Figura 49: Vuelo de franjas entrelazadas [22]

### **Navegación de línea lateral**

Es el método más simple desde el punto de vista de la planificación, pero exige un gran respaldo en cuanto a la producción fotográfica.

Se basa en una o más pasadas principales que van a ser usadas para lo que se conoce como el seguimiento de la línea lateral. De nuevo el bloque se planifica más grande de lo necesario.

Se realiza un vuelo de reconocimiento previamente para pruebas de exposición y planificación de la pasada principal. Efectuadas estas pruebas, se procede a la toma de las fotografías de la pasada principal con las especificaciones correctas para el vuelo; al final de la pasada del avión vuelve a la base y se procesa la película. Se hace un conjunto de copias y se forma la pasada trazando una línea central (eje de vuelo). A partir de esta se trazan

dos ejes paralelos con el recubrimiento lateral especificado. Una vez que están marcadas las dos nuevas pasadas se vuelve a realizar otro vuelo para la obtención de los fotogramas de las nuevas pasadas. El navegante usará como referencia para la toma de estas nuevas fajas, la línea del recubrimiento lateral, de esta forma tendrá una información terrestre visible en el área de recubrimiento  $q\%$ .

Efectuadas estas nuevas tomas, el avión vuelve a la base, se obtienen las copias y sobre estas nuevas tomas se repite el proceso.[22]

### 3. Sistemas de navegación avanzados

Los sistemas electrónicos de navegación están basados en el conocimiento de las coordenadas del avión respecto al terreno en cada momento del desarrollo del vuelo, con el fin de conducir automáticamente al vehículo a los puntos de exposición aérea, previamente establecidos en el planeamiento de vuelo.

Dentro de estos sistemas destacan los siguientes:

- VLF/Omega: El usuario introduce la posición exacta del avión en coordenadas geográficas antes del despegue y los sistemas calculan los movimientos X e Y relativos a partir del despegue, presentando al usuario la posición y velocidad con respecto a la tierra y los errores de trayectoria, incluyendo la deriva. Este sistema se basa en el principio de “volar desde”.
- Doppler: Basado en el radar Doppler y con el mismo principio que el anterior, este sistema controlado por el navegante mide la distancia y rumbo desde una posición de partida conocida.
- INS (Sistema de navegación inercial): Basado también en el principio de “volar desde”, este sistema hace uso de los cambios relativos de dirección medidos dentro del avión, para estimar las coordenadas X e Y desde un punto de partida conocido.
- Otros sistemas a destacar son el ANA y el I.T.C. (Photnav), los cuales tratan de compaginar los procedimientos de medición de distancias usuales para los trabajos topográficos de apoyo y de campo y los instrumentos de control de las inclinaciones de los fotogramas. Los datos que suministran estos equipos, constituyen la base de datos para el cálculo electrónico de las coordenadas aéreas del avión y la corrección automática de su trayectoria aérea.
- GPS (Global Position System): En la actualidad es uno de los sistemas más utilizados en la realización de vuelos fotogramétrico, ya que permite obtener en modo cinemático posiciones en coordenadas X, Y, Z del orden del 0.5 m, permitiendo ser utilizado tanto en labores de navegación como en labores de obtención de ciertos elementos de la orientación externa, coordenadas de los centros de proyección ( $X_o, Y_o, Z_o$ ), permite la generación automática de los gráficos de vuelo. [22]

## M. Software

Dentro de la fotogrametría, existen diferentes softwares que ayudan mucho al proceso de datos para la creación de esta aplicación. Actualmente, los mejores y los más utilizados son los siguientes:

- Agisoft PhotoScan
- Pix4d
- Drone Deploy
- Autodesk Recap Pro

### 1. Agisoft photoscan

Ese software fue fundado en 2006 como una empresa de investigación innovadora centrada en la tecnología de computadora. A través de intenso trabajo de R&D, Agisoft ha adquirido experiencia en algoritmos de procesamiento de imágenes, con técnicas de fotogrametría digital que marcan la dirección para el desarrollo de herramientas aplicadas. Estas son algunas aplicaciones que Agisoft Photoscan provee:

- Triangulación fotogramétrica: Esta función sirve para procesamiento de varios tipos de imágenes: aéreas (nadir, oblicuas) y de corto alcance, calibración automática: marco, cámaras esféricas y cilíndricas, y soporte de proyectos multicámara.
- Nube de puntos densos: Edición y Clasificación: Esta función sirve para la elaboración de modelos de edición para obtener resultados precisos, clasificación de puntos para personalizar la reconstrucción de geometría, exportación de .LAS para beneficiarse del flujo de trabajo de procesamiento de datos de punto.
- Modelo de elevación digital: Exportación DSM/DTM: Modelo digital de superficie o terreno digital, según el proyecto, georreferenciación basada en metadatos EXIF/registro de vuelo: datos GPS/GCP, y soporte de sistemas de coordenadas de registro EPSG: WGS84, UTM, entre otros.
- Exportación de ortomosaicos georreferenciados: Ortomosaico georreferenciado: el formato GeoTIFF más compatible con SIG: EL archivo .KML se ubicará en google Earth, exportación en bloques para grandes proyectos, y corrección de color para textura homogénea.
- Mediciones: Distancias, áreas, volúmenes: Herramientas incorporadas para medir distancias, áreas y volúmenes, para realizar un análisis métrico más sofisticado, los productos Metashape se pueden transferir sin problemas a herramientas externas gracias a una variedad de formatos de exportación.[23]



## 2. Pix4D

Software fundado en 2011, Pix4D amplió los límites de la fotogrametría moderna con el uso de la R&D, el programa incluye científicos, ingenieros y especialistas en fotogrametría. Los miembros del equipo del software no solo contribuyen al sistema, sino que también contribuyen al conocimiento científico del mundo. Estas son algunas de sus aplicaciones que tiene:

- **Captura:** Se pueden capturar imágenes RGB, térmicas o multiespectrales con cualquier cámara. Si se está utilizando un dron, se puede automatizar el vuelo y la transferencia de datos de imágenes con esta aplicación.
- **RayClud:** Esta provee un entorno único que conecta las imágenes originales a cada punto de la reconstrucción 3D o 2D para verificar visualmente y mejorar la precisión del proyecto.
- **Mapas y modelos 3D precisos, puramente de imágenes:** Esta provee una clasificación automática de nubes de puntos, y distingue objetos con procesos de clasificación de aprendizaje automático.
- **Aplanador y alisador de superficies digitales:** Cree superficies para mejorar la superficie o rellene agujeros en áreas críticas.
- **Mida fácilmente la superficie, la distancia, el volumen y la elevación:** Esta mide en 3D con una altura de base de datos totalmente ajustable.
- **Inspeccionar y anotar:** Inspeccione proyectos de forma remota e identifique con precisión, resalte y describa elementos críticos.
- **Colabora y comparte:** Esta permite compartir de forma selectiva y segura datos e ideas del proyecto con un equipo de trabajo, clientes u otras partes interesadas. [24]

## 3. Drone deploy

Este software fundado en el 2013, tiene misión principal es hacer que los cielos sean abiertos y accesibles para todos. Con la confianza de los usuarios en una variedad de industrias, este software está transformando la forma en que las empresas recopilan, administran e interpretan los datos que captan los drones. La plataforma es fácil de usar y hace posible que las empresas de cualquier tamaño mejoren sus flujos de trabajo a través del procesamiento de imágenes escalables, el almacenamiento de datos, los mapas de drones y modelos 3D compartibles en tiempo real. Aquí algunas funciones que provee este software:

- **Volar y capturar imágenes de drones:** Esta automatiza vuelos y mapas para drones DJI utilizando la aplicación móvil, brinda la opción de usar las imágenes geoetiquetadas de cualquier dron para crear un mapa en DroneDeploy.
- **Inteligencia de sitio aéreo en tiempo real:** Esta permite crear mapas precisos de alta resolución, informes y modelos 3D, así como mapas en vivo 2D en tiempo real para análisis inmediato.

- Colaboración en equipo de forma simple y segura: Esta brinda equipos con procesamiento ilimitado de imágenes en la nube y opciones de colaboración, exhortación e integración.[25]

#### 4. Autodesk recap pro

Autodesk, Inc., es una compañía dedicada al software de diseño en 2D y 3D fundada en 1982. Uno de sus mas novedosos productos es “ReCap Pro”, ya que con este software se pueden crear modelos 3D a partir de fotografías o escaneos láser. El producto final es una nube de puntos o malla lista para herramientas de autoría CAD (Computer-Aided Manufacturing, por sus siglas en Inglés), y BIM (Building Information Modeling, por sus siglas en Inglés).

Dentro de las funciones que ofrece este software están las siguientes:

- Servicio de foto a 3D basado en la nube: Obtenga capacidades ampliadas de fotogrametría con ReCap Photo.
- ReCap Pro para dispositivos móviles: Registre, marque y mida datos de captura de realidad en el campo con un Ipad. Incluye funciones de colaboración.
- Registrar automáticamente escaneos láser: El registro automático crea una nube de puntos 3D precisa y escalable a partir de sus datos escaneados en minutos.
- Medir y editar nubes de puntos: Utilice ReCap para medir, marcar y comunicarse a través de los datos de la nube de puntos y compartirlos con los colaboradores.
- Crear videos para exhibir tu trabajo: Un mejor proceso para convertir View States en animaciones prácticas que puede usar para crear presentaciones.
- Características de medición: La interface Surface Snap le permite medir el espacio libre entre un punto de superficie inicial y un punto que se proyecta hacia fuera desde la selección.[26]



## **A. Fase preliminar**

Previo al trabajo de campo es necesario hacer una planificación completa sobre el terreno en el cual se va a trabajar, además del equipo que se utilizará. Dentro de los factores importantes a analizar del terreno tenemos los siguientes:

- Ubicación del terreno
- Planicie del terreno
- Dimensiones del terreno
- Colindancias
- Restricciones
- Seguridad
- Puntos de control
- Clima

### **1. Ubicación del terreno**

En la ubicación del terreno se describe la localización exacta del área y se brinda una breve indicación de qué vías carreteras tomar para poder llegar al destino. Esta parte es importante porque ayuda al usuario a determinar el transporte que debe de llevar, el combustible, y el tipo de ropa que será necesaria para el levantamiento fotogramétrico. Asimismo, es vital determinar la hora de salida y de llegada, ya que en nuestro país se tiene que prevenir siempre el tema del tráfico.

Dentro de esta etapa se recomienda efectuar una visita previa al área y llevar a cabo un vuelo de inspección con el objeto de hacer las tomas necesarias para determinar los puntos de colindancias, restricciones, seguridad, puntos de control, clima, entre otros.

## **2. Planicie del terreno**

La planicie del terreno es un factor muy importante, puesto que se tiene que tomar en cuenta si existe una cantidad de vegetación que sobrepase los 20 metros en el terreno y determinar las inclinaciones del mismo, es decir, si este es muy ondulado o plano. Estos factores nos ayudan a fijar aproximadamente qué altura de vuelo es necesaria para no tener accidentes con el equipo aéreo, y a precisar la posición de los puntos de control, con el fin de que estos se encuentren en espacios abiertos que no sean obstruidos por sombras o diferentes estructuras.

## **3. Dimensiones del terreno**

Respecto a la dimensión del terreno, se tiene que conocer de manera general el proyecto y sus límites para poder saber aproximadamente el tamaño del estudio. Asimismo, se debe estar al tanto de los múltiples accesos a todas las áreas del mismo, ya que por más que el levantamiento sea por aire, se necesita el ingreso terrestre para poder colocar los puntos de referencia.

Saber las dimensiones universales del terreno también es de mucha ayuda porque se tiene una idea de cuántas baterías se van a necesitar para el levantamiento, y el tipo de rejilla que estas debieran de tener. Los tipos de rejilla se explican más adelante en el presente trabajo dentro del apartado del plan de vuelo.

## **4. Colindancias**

Saber las vecindades es sustancial por las cuestiones de restricciones y de seguridad a los alrededores. Se debe de conocer claramente con quién se comparte los linderos del terreno, puesto que puede que sea un espacio privado o con restricción expresa de volar sobre el terreno, lo cual perjudicaría el estudio. La razón por la cual los terrenos colindantes no deben de tener ningún problema respecto de volar un dron es porque para llevar a cabo un levantamiento fotogramétrico se necesita tomar ciertas fotografías de todo el entorno. Pues, al tomar estas fotografías de las vecindades se asegura que todo el terreno de estudio cuente con tomas aéreas suficientes.

Si se diera el caso en el cual que se tuviera como vecindad un área restringida, como por ejemplo, una estación de policías, una embajada, o una pista de aterrizaje es mejor tomar solo una parte de la topografía del terreno de forma aérea, y el área faltante tomarla con equipo terrestre.

## 5. Restricciones

Respecto a las restricciones y limitaciones en Guatemala sobre el uso de drones, los usuarios se deben de guiar y regir por el “RAC 101: Regulación de Aeronaves No Tripuladas, Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales”, creado por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC, por sus siglas en Español) el cual describe y establece todo el proceso de inscripción, operaciones prohibidas y permitidas, autorizaciones especiales, accidentes, seguros, entre otros temas relacionados a los Vehículos Aéreos No Tripulados, también conocidos como UAV (Unmanned Aerial Vehicle, por sus siglas en Inglés). (El RAC 101 se encuentra adjunto al presente trabajo en el apartado de apéndice).

Para el registro de un UAV se tiene que presentar las siguientes solicitudes:

### Pre-reserva de distintivo

Al momento de ingresar la Aeronave No Tripulada al país, se tiene que solicitar la pre-reserva de distintivo, cuyo documento es válido únicamente para desaduanaje de la aeronave no tripulada. Debiendo presentar dentro de los ocho días hábiles posteriores al egreso de la aeronave de la aduana, la solicitud de reserva en el Registro Aeronáutico Nacional e iniciar el trámite correspondiente para su inscripción.

### Reservación de distintivo

Todo operador de Vehículos No Tripulados debe formalizar el trámite ante el Registro Aeronáutico Nacional de la Dirección General de Aeronáutica Civil, para que se le asigne un distintivo o número de identificación consecutivo. Este tipo de documento, es válido para la inscripción de la Aeronave No Tripulada como bien inmueble ante el Registro General de la Propiedad de Guatemala.

Se asignará un distintivo empleando las letras UAV-TG-XXX, en donde XXX es un número consecutivo separado por un guión. Este número consecutivo corresponde a un estricto orden cronológico otorgado por el Registro Aeronáutico Nacional.

La ubicación del distintivo de identificación se hará de la manera siguiente:

- En la parte inferior del ala izquierda, en tamaño proporcional al tamaño de la superficie, o en ambas partes del estabilizador vertical únicamente los últimos 3 dígitos.
- Para aeronaves no tripuladas que no poseen ala fija, se deberá colocar los últimos 3 dígitos en una parte visible de ambos lados de la aeronave.

En ambos casos deben de contar inter o externamente con una placa metálica la cual indique los siguientes datos:

- Modelo
- Serie

- Propietario
- Distintivo de identificación

Estos datos deben coincidir con los números de identificación del dispositivo de actuación remota de cada aeronave.[27]

## 6. Seguridad

En Guatemala la seguridad personal es imprescindible, por lo que al momento de llevar a cabo la visita de campo se tiene que contemplar la contratación de un agente de seguridad para que ayude a controlar los alrededores del proyecto. Eso, principalmente, para evitar cualquier tipo de problema con los vecinos al ver una UAV sobrevolando sus terrenos, así como también para salvaguardar el equipo a utilizar, puesto que este posee un valor alto en el mercado.

Asimismo, se debe investigar la zona en la cual se encuentra el terreno, con el objeto de establecer si se trata de una “zona roja” y acumulan alta criminalidad, o por lo contrario si se trata de una “zona crema o segura” la cual se encuentra libre de violencia. Dentro del proyecto, también se debe de verificar quiénes son las personas que transitan en el lugar, es decir, distinguir si circulan personas externas al mismo, o bien, únicamente trabajadores de la constructora, labradores previamente contratados, etc. Por último, hay que conocer si el terreno se encuentra totalmente cerrado o si existe un libre el acceso entre éste y las vecindades, si el terreno cuenta con seguridad privada y con garita o caseta policial que regule la entrada y salida de cualquier persona.

## 7. Puntos de control

Los PUNTOS DE CONTROL van muy de la mano con la visita preliminar, ya que los primeros datos que se obtienen son las características de la superficie del terreno. Esto nos ayuda a determinar el material, con el que se realizaran los puntos, capaz de soportar las condiciones climáticas y superficiales del terreno.

No obstante, se puede obtener una aproximación del tamaño necesario de los puntos de control a partir de la visita de inspección, aunque teóricamente ese dato se podrá saber hasta que se determine el GSD .

## 8. Clima

El factor clima comprende varios puntos dentro de la visita preliminar, puesto que no es solamente útil para determinar las temperaturas bajo las cuales se va a trabajar, y qué cantidad de líquidos o protección solar debemos de llevar para el resguardo físico de los usuarios. Si no que, el hecho mismo que la temperatura sea muy alta o muy baja puede causar que al momento de llevar a cabo el levantamiento fotogramétrico, el drone genere un cierto tipo de “error” en la toma de fotografías aéreas. Esto se da, puesto que las temperaturas

extremas generan que ciertas configuraciones del UAV varíen considerablemente, como por ejemplo la distancia focal de la cámara, teniendo entonces desde el primer vuelo un error a considerar en los resultados.

Este “error” causado por las temperaturas extremas se conoce como ROLLING SHUTTER y para solucionarlo se debe de verificar que el software a utilizar para el levantamiento fotogramétrico tenga esta “opción” dentro de sus funciones, para poder así contrarrestar y disminuir dicha inexactitud dentro de la precisión de la toma de datos en el levantamiento fotogramétrico.

Detalles del equipo a utilizar:

- UAV´s
- GPS
- Cinta Métrica bastones y monitores
- Campamento

## 9. UAV

Dentro del mercado existen dos tipos de UAV o también conocidas como aeronaves que vuelan sin tripulación o “RPAS” (Remotely Piloted Aircrafts, por sus siglas en Inglés), estos son los ala delta y los cuadricópteros. Algunas de las diferencias entre ambos son la calidad de imagen, el tiempo de vuelo y la cantidad de terreno que abarcan.

De esta cuenta, con la visita preliminar de campo se obtiene una idea general del tipo de UAV o RPA requerido, el tamaño del terreno por abarcar y la altura aproximada del vuelo. Por otro lado, un factor clave dentro del terreno por examinar, es delimitar lugares seguros y accesibles para el despegue y aterrizaje del equipo. Ya que, con un RPA de ala delta se requiere tanto para el despegue, como para el aterrizaje un terreno bastante abierto sin estructuras de cualquier tipo cerca que obstruyan el paso, como por ejemplo un terreno de fútbol. En contra posición, con un RPA cuadricóptero le es suficiente un área reducida de tamaño para llevar a cabo tanto el despegue, como el aterrizaje.

## 10. GPS

Para que los puntos tomados por el GPS: (Global Positioning System, por sus siglas en Inglés) sean correctos, se tiene que asegurar que el GPS sea primordialmente del tipo RTK (Real Time Kinematic Positioning, por sus siglas en Inglés). Ya que sin esta opción es muy difícil tener una verdadera precisión en el levantamiento topográfico.

Asimismo, se tiene que contemplar que hay dos formas de alcanzar la precisión con los GPS, estas son:

- Tener muchos puntos de control y dejar los GPS con poco tiempo en cada uno.



- Tener pocos puntos de control y dejar los GPS más de 15 minutos en cada uno.

La cuestión respecto a qué forma utilizar lo determinará la dimensión y la planicie del terreno. De esta cuenta, si existen pocos espacios abiertos se recomienda mantener el GPS recibiendo señal más de 15 minutos y colocar pocos puntos de control.

## 11. Cinta métrica, bastones y monitores

Estas herramientas son de suma importancia para el levantamiento fotogramétrico ya que son útiles para tomar la altura de los GPS requerida. Los bastones sirven para obtener una mejor recepción de las señales, así como también para la delimitación del punto base, mientras se terminan de tomar los demás puntos. Por otro lado, los monitores sirven para la configuración de los equipos, ya sea desde cargar el plan del vuelo al RPAS , hasta la toma de los puntos geodésicos.

## 12. Campamento

Cuando se realiza la visita de campo es recomendable buscar un espacio crucial para colocar todo el equipo a utilizar, para que de esta forma se encuentren libres de accidentes y resguardados de cualquier acto criminal. Por lo que, una buena forma de prevenir estas situaciones es instalando un campamento o refugio para tener un lugar concreto en el cual se tenga control de todo el equipo, se vea toda la logística pre, durante y post del trabajo de campo y se pueda quedar la seguridad privada, si es que se tiene, vigilando el equipo.

## B. Plan de vuelo

Luego de describir todos los factores del terreno y equipo, es necesario, previo al levantamiento fotogramétrico, un plan de vuelo para poder llevar a cabo un trabajo de campo eficiente y seguro, teniendo en cuenta el cuidado del equipo y la seguridad personal de los usuarios. Además, el plan de vuelo tiene que constar con los siguientes requisitos:

- GSD
- Altura de vuelo
- Cinta traslape horizontal
- Traslape vertical
- Velocidad del vuelo
- Baterías necesarias
- Tamaño de puntos de control
- Mapa del terreno determinado

- Creación de malla aproximada sobre el terreno
- Ajustes en cámara

## 1. Ground sampling distance (GSD)

El GSD es directamente proporcional a la altura de vuelo dividido la resolución de la cámara y la anchura del sensor dividido por Distancia focal . Tal y como se muestra en la siguiente ecuación 29.

$$GSD = \frac{H}{AnchuraResolucionImagen} * \frac{Sw}{Distanciafocal} \quad (29)$$

Para levantamientos fotogramétricos se recomienda tener un GSD menor del 5 cm/pix, ya que tener un dato mayor a esto generaría una baja resolución en las fotografías y menos precisión en la toma de medidas.

Por otro lado, el GSD deberá ser distinto conforme a la escala de mapa que se utilice como se muestra en el Cuadro No. 3.

Escala	GSD (cm/pix)
1:250	2.8
1:500	4.8
1:750	5.6
1:1000	7.6

Cuadro 3: GSD necesarios dependiendo el tipo de escala

Como se puede observar, los GSD mayores a 5 cm/pix son mayormente utilizados para expresar mapas que abarcan terrenos más extensos, puesto que no necesita mucho detalle en las imágenes. Por lo tanto, entre más cerca se encuentre la fotografía más pequeño es el GSD, y existirá más detalle en la fotografía. Sin embargo, el GSD también depende mucho del tipo de cámara que se utilice para el estudio.

## 2. Altura de vuelo

La altura es un factor imprescindible en el levantamiento fotogramétrico, puesto que ésta afecta directamente la resolución de los estudios, como se explicó anteriormente. Esta altura se tiene que evaluar de dos formas, siendo estas las siguientes: Primero, en la visita de campo, se tiene que tomar en cuenta la vegetación alta presente, la ondulación del terreno, y alguna estructura tipo antena, o edificio. Con este primer parámetro se obtiene la altura mínima con la que se podrá volar el dron. Segundo, se tiene que verificar si con la altura mínima antes obtenida se tiene una resolución menor a 5 cm/pix. Esto se verificará haciendo una relación de altura y el GSD, usando la ecuación No. 29. mediante la cual se determinará la altura máxima y mínima necesarias, para que el estudio no tenga errores en cuanto a la resolución.

### **3. Traslape horizontal**

Al utilizar un traslape horizontal, dentro del presente estudio, se asegura tener una continuidad en el modelo 3D, ya que cada imagen generará más puntos clave entre ellas.

Lo que se recomienda normalmente para el traslape horizontal o también conocido como longitudinal, es que el mismo no sea mayor a un 85 % y no menor de un 70 %. Si es mayor de un 85 % este estarán tomando fotografías muy traslapadas y esta situación no mejorará en la resolución. Por el otro extremo, si se tiene un traslape muy bajo esto causará que el modelo 3D tenga discrepancias dentro del modelo de puntos denso.

Para la determinación del traslape horizontal depende del ancho de la resolución de la imagen en pixeles de la cámara que se esté utilizando. Entre mayor sean los pixeles de la cámara mayor será la altura a la que se podrá volar.

### **4. Traslape vertical**

Respecto al traslape vertical a utilizar en el estudio se recomienda manejar porcentajes no mayores a un 80 % y no menores a un 60 %, porque al igual que en el traslape horizontal antes mencionado, sin el traslape adecuado se generaran incertezas e inexactitudes dentro del modelo.

Para la determinación del traslape vertical depende del alto de la resolución de la imagen en pixeles. Entre menor sean los pixeles de la cámara, mayor será el porcentaje de traslape requerido y menor será la altura mínima de vuelo.

### **5. Velocidad de vuelo**

Para la toma de fotografías aéreas se debe considerar la velocidad con la que el RPA tomará las fotografías, ya que si este se desplaza de manera muy rápida las imágenes que ira captando pueden salir en movimiento. Esto generaría error en la precisión dentro del estudio.

Una de las causas de mayor dificultad para el vuelo es el viento que se encuentre en el lugar. Si en el terreno corre mucho viento el UAV tendrá que mantener una velocidad más alta para poder estabilizarse en el aire y no ser arrastrado por el viento.

Para una precisa captura de las imágenes, la velocidad de vuelo que se recomienda usar es de 2 m/s. Esto significa que el RPA tendrá que ir frenando y acelerando durante el transcurso de la rejilla.

### **6. Tipo de rejilla**

Existen diferentes tipos de rejillas para poder hacer el levantamiento fotogramétrico. El tipo de rejilla a utilizar dependerá del tipo de mapa que se quiera generar y del tipo de

superficie que se tenga en el terreno de estudio. Dentro de los tipos de rejillas se encuentran las siguientes:

- **Cuadrícula regular**
- Doble cuadrícula
- Rejilla lineal
- Cuadrícula circular o en espiral

### **Cuadrícula regular**

La cuadrícula regular ayuda a ejecutar el levantamiento fotogramétrico de un terreno plano, sin vegetación, en el cual no sea necesario abstraer mucho detalle. Por ejemplo, que sirva para un estudio de catastro, desarrollo de construcción, cuantificación de material, entre otros.

Este tipo es muy útil ya que abarca mucho terreno y los resultados son bastante precisos, sin embargo, para un estudio en el cual si se requiere tener un mayor detalle del terreno se debe considerar otro tipo de cuadrícula.

### **Doble cuadrícula**

Este tipo de rejilla es utilizada para encontrar áreas, perímetros, y volúmenes de objetos o materiales que se encuentren dentro del terreno. Este es uno de los tipos con mayor detalle y precisión que existen para llevar a cabo estudios. Con este procedimiento se tiene en cuenta todos los ángulos del área.

No obstante, la doble cuadrícula tiende a necesitar mayor cantidad de baterías, esto porque, duplica el trabajo del levantamiento fotogramétrico. Normalmente, los RPAS de ala delta son los que generan este tipo de cuadrícula en terrenos con gran extensión, pero un multirrotor también puede ejecutar el estudio sin problema alguno.

### **Rejilla lineal**

Cuando se tiene por estudio un terreno lineal como lo son las construcciones viales, que son lugares planos, se puede utilizar la rejilla lineal ya que esta cuenta básicamente con una sola línea que va tomando las fotografías del área determinada. Puede ser solamente una línea o pueden ser dos líneas, esto dependerá del ancho de la carretera.

Su mayor ventaja es la eficiencia y celeridad con la que capta todo terreno a mucho menor tiempo. Con este tipo de rejilla el estudio es resulta ser bastante preciso, principalmente cuando se trata de vías carreteras.

## **Cuadrícula circular o en espiral**

Este tipo de rejilla es ideal y muy común para la restauración de estructuras antiguas, ya que generalmente se utiliza para hacer modelos tridimensionales con un detalle alto. Este procedimiento se basa en girar alrededor de la escultura determinada en forma de espiral, de abajo para arriba, tomando todos los ángulos de la estructura, su altura, y los detalles que este contiene.

Este tipo de procedimiento normalmente, se junta con la fotogrametría terrestre, para mayor precisión.

## **7. Tamaño de puntos de control**

Los puntos de control son parte fundamental del levantamiento topográfico, ya que con estos se corrige el error que los RPAS aún contienen. Asimismo, los puntos de control son los responsables de que se mejore, notablemente, la precisión del estudio.

Por lo tanto, se tienen que establecer puntos de control con un tamaño suficientemente grande para la localización de los mismos cuando se esté llevando a cabo la toma de las fotografías aéreas. El tamaño de los puntos de control tiene que expresar el tamaño de un pixel representado en la tierra. Entre mayor sean los pixeles de la cámara, menor será el tamaño de los puntos de control. Asimismo, el GSD es la herramienta ideal para la determinación del tamaño del punto de referencia. Se recomienda que el punto de control sea diez veces más grande que el GSD. Sin embargo, para ser más conservadores se hace 20 veces más grande para prevenir la falta de visión de estos puntos.

## **C. Fase de campo**

Posteriormente al plan de vuelo, se procede a la fase de campo. A partir de esta etapa ya se tiene que tener todo planificado, solamente falta llegar al lugar de estudio y comenzar a realizar todo el trabajo. Se debe de tener en cuenta que la mejor hora para realizar este tipo de levantamiento y estudio fotogramétrico es a partir de las 10 de la mañana hasta las 2 de la tarde, esto porque en esas horas normalmente el sol se encuentra en un ángulo recto y por ende no se generan sombras dentro de la obra.

Dentro de esta fase es necesario realizar algunos pasos para generar un levantamiento preciso y efectivo. Siendo estos los siguientes:

- Campamento
- Ubicación de puntos de puntos de control
- Preparación de equipo
- Vuelo de inspección
- Levantamiento fotogramétrico

- Levantamiento fotogramétrico
- Toma de puntos georreferenciados

Con estos pasos se va a tener un estudio seguro tanto para los equipos, como para el personal de trabajo.

## **D. Fase final**

Luego de haber llevado a cabo el trabajo de campo se debe pasar a la última etapa, siendo esta la del procesamiento de datos, en la cual se extraen las imágenes del UAV y se procesan en el software a utilizar. Dentro del marco teórico, se describieron algunos de los programas más favorables que generan este tipo de levantamientos. En esta etapa se necesita escoger uno de ellos, elección la cual dependerá bastante del procesador del ordenador del usuario. Esto debido a que este tipo de estudio requiere de una alta gama de memoria RAM , tarjeta de video y de interfaz. Además, porque se deben extraer los puntos de referencia tomados con el equipo geodésico.

Generalmente, para realizar un levantamiento fotogramétrico se hace una serie de pasos y configuraciones específicas para la generación del modelo tridimensional, ortomosaico, entre otros. Los pasos a seguir son los siguientes:

- Extracción de imágenes
- Software
- Visión de mapa
- Orientación de fotos
- Puntos de referencia
- Nube de puntos densa
- Clasificación de puntos
- Limpieza de ruido
- Creación de malla texturizada
- Generación de DSM y DTM
- Ortomosaico
- Informes

## **1. Extracción de imágenes**

Luego de haber generado el trabajo de campo, se tiene que extraer todo el contenido del UAV, este generalmente se encuentra almacenado en tarjetas de memoria. Estas se deben introducir al ordenador y se debe de verificar que se encuentren todas las imágenes del estudio, y que no existan fotografías que no sean parte de la cuadrícula realizada.

Si dentro del estudio hay más de mil fotografías, es recomendable dividir las imágenes en dos archivos de 500 cada uno. Esto hará que el archivo ya no sea tan pesado y que el proceso de las mismas sea más fácil y manejable.

Todas las imágenes tienen que estar en formato JPG. Es recomendable guardar las imágenes dentro de un disco externo con los fines de protegerlas de cualquier adversidad, de no abarcar tanta memoria del ordenador, y de acceder a ellas más cómodamente.

## **2. Software**

Dentro de los SOFTWARE mencionados en el apartado del marco teórico, los programas más recomendados y completos son AGISOFT PHOTOSCAN y PIX4D Mapper, estos dos se encuentran disponibles para descargarlos de forma gratuita.

Sin embargo, el rendimiento del programa depende de la capacidad del ordenador. Los dos programas requieren un procesador mínimo Core i7, una tarjeta madre 8DDR4, una memoria RAM mínima de 16 GB y una tarjeta de video Nvidia GTX 980 Ti. Estos requerimientos permitirán procesar el estudio sin ningún problema y en un tiempo considerable.

Otro factor a considerar es que el ordenador se encuentre en un área abierta en donde tenga suficiente ventilación. Ya que, al momento de transferir toda la información al ordenador, este tiende a sobrecalentarse. Asimismo es recomendable colocarle un ventilador de computadora extra puesto que se debe de prevenir cualquier posible daño al equipo que se está usando para el estudio.

## **3. Visión de mapa**

Al momento de ingresar las imágenes dentro del software, este genera una vista previa de la ubicación en donde se encuentra el estudio. Esto sirve para verificar si el estudio se llevo a cabo en el lugar deseado, y que el GPS del RPA está en buenas condiciones.

Asimismo, también contiene la cuadrícula que se utilizó durante el estudio. Un factor importante a considerar en esta etapa es verificar el sistema de coordenadas utilizado por las imágenes, ya que este debe ser el mismo que los puntos de referencia y el del software.

## **4. Orientación de fotos**

Una de las primeras etapas del procesamiento de datos es la orientación de las fotografías, ya que esto generará una nube de puntos. Esta nube de puntos sirve para tener una idea del

terreno evaluado, sin embargo no contiene tanto detalle para la toma de medidas.

Esta vista sirve para determinar si todos los puntos se encuentran en su lugar y no hay puntos fuera del cuadro de estudio. Si el proceso tuviera estos puntos desfasados, éstos no se deben tomar en cuenta para el estudio, y por ende deben ser eliminados.

Generalmente esta parte del proceso puede durar aproximadamente desde 40 minutos hasta 1 hora y media. El tiempo de duración dependerá del número de imágenes tomadas, y como se explicó anteriormente, de la capacidad de la computadora utilizada.

## 5. Puntos de referencia

Para la colocación de los puntos de referencia tomados con el equipo geodésico estos se tienen que extraer en formato txt. Asimismo, se debe de verificar que las coordenadas tengan los puntos X, Y, y Z.

Al ingresar los puntos al software, se debe de corroborar el sistema de coordenadas utilizado. De manera que, si es diferente se debe convertir al sistema correcto. Luego de esto, los puntos de referencia se importan a la nube de puntos, en donde se tendrá que ir verificando manualmente que en las imágenes que se encuentren tanto los puntos de control, como el punto geodésico encima del punto de control.

Generalmente, estos puntos se encuentran desfasados, esto se debe al error de georreferencia de los UAV's, de modo que al arreglar esta desviación, el estudio se vuelve más preciso y certero.

Si algunos puntos de referencia no se lograran observar bien, ya sea por obstáculos o por la luz solar, estos no se deben de tomar en cuenta para el estudio. Pero entre más imágenes se verifiquen, más exacto será el levantamiento.

## 6. Nube de puntos densa

Luego de georreferenciar las imágenes se debe de orientar el proyecto de nuevo, esto con el fin de modificar la desviación obtenida al comienzo. A partir de esto se procede entonces a la generación de la nube de puntos densa.

La NUBE DE PUNTOS DENSA , es un modelo tridimensional del levantamiento fotogramétrico, en el cual ya se pueden observar más detalles de toda la obra. Asimismo, con la nube de puntos densa se puede realizar cualquier medición de perímetro, área o volumen.

Este parte del proceso es de alta duración, tardándose aproximadamente 2 horas, ya que el programa une y combina las imágenes lo más que se pueda, llenando cualquier espacio vacío que se tenga en el modelo con imágenes. Es por eso que los softwares del mercado ofrecen calidades menores de detalle al modelo, para que se ejecutara con mayor rapidez la nube de puntos densa.



## 7. Clasificación de puntos

En la nube de puntos densa se obtiene todo el modelo, incluyendo todos los objetos del terreno. Esto en algunas situaciones no es necesario para los estudios, ya que al momento de generar mapas de elevaciones, o curvas de nivel, se necesita solamente el perfil del terreno.

Para estas situaciones en las cuales solamente se necesita el perfil de terreno, existe la clasificación de puntos, de modo que, esta escanea punto por punto, y agrupa las imágenes en el terreno por colores. Con esto se logra obtener un modelo con distintos grupos, como lo son: vegetación, terreno, vehículos, entre otros.

## 8. Limpieza de ruido

Por más clasificado que se encuentre el modelo, existen ciertas partes que el software no es capaz de clasificar. Por lo tanto, se procede a limpiar de forma manual, lo cual implica ir quitando todo el ruido que generen los objetos, como por ejemplo: material de construcción, juegos infantiles, personas, etc.

Para este proceso se tiene que tener mucho cuidado al momento de limpiar el modelo ya que todos los espacios que se clasifiquen, se tomaran como espacios vacíos o superficies planas. De manera que, se tienen que eliminar solamente los factores externos al perfil del terreno.

## 9. Creación de malla texturizada

Dentro de este proceso la generación de la MALLA TEXTURIZADA es utilizada para cerrar los espacios vacíos causada por la clasificación anterior. Esta malla ayudará a terminar el modelo tridimensional.

Con el uso de esta malla, la determinación de las dimensiones se vuelve más fácil, puesto que es lo más cercano a un modelo sólido y sin espacios vacíos. La creación de la misma es de corta duración, tardándose aproximadamente un tiempo de 10 a 15 minutos.

## 10. Generación de DSM y DTM

Luego de tener la malla texturizada se procede a la creación de los modelos digitales de elevación. Existen dos tipos de modelos: a) El DSM: (Digital Surface Models, por sus siglas en Inglés), y b) El DTM: (Digital Terrain Models, por sus siglas en Inglés). La diferencia entre ellos es que el DTM modela tomando en cuenta todos los detalles del terreno. Esto significa que no toma en cuenta la clasificación y la limpieza que se realizó.

En cambio, el DSM modela la superficie del terreno, excluyendo cualquier campo clasificado, en otras palabras, dejando en pocas palabras solamente la superficie del terreno. Esto es beneficioso porque se pueden observar las elevaciones que se encuentran en el área.

## 11. Ortomosaico

La fase final del procesamiento de datos es la creación del Ortomosaico , con el cual se obtendrá un modelo en 2D del terreno objeto del presente estudio. Con la resolución obtenida en el ortomosaico, se puede observar detalladamente todo el terreno y este se puede extraer para utilizarlo en programas como AutoCad, Civil CAD, Qgis, Google Earth, entre otros.

Esta última etapa del proceso se tarda aproximadamente de 30 min a 1 hora. Los ortomosaicos tienen una aplicación práctica en la vida de las personas, por ejemplo en la agricultura, la minería, la realización de estudios catastrales, y la realización de los levantamientos topográficos, entre otros.

## 12. Informe

Todo software contiene su informe de resultados, el cual básicamente provee un resumen de todas las configuraciones que se utilizaron dentro del levantamiento.

Con el informe se obtienen datos como: los puntos tomados por los RPAs, el error geodésico del modelo, la resolución de las imágenes, las características de la cámara, el detalle de todo el vuelo, etc. Estos datos son útiles para determinar si el procedimiento se llevó a cabo correctamente y para soportar resultados obtenidos.

## E. Construcción, urbanización y vivienda La Dignidad Escuintla, Escuintla



Figura 50: Entrada principal proyecto Escuintla

### 1. Fase preliminar

Para la obtención de datos sobre el terreno se realizó una visita al proyecto, esto pues era importante hablar con el Ingeniero encargado de la obra, sobre el estudio que se iba a

realizar, para coordinar fechas para el trabajo de campo, y principalmente para determinar el equipo requerido para el proyecto. Dentro de la visita se recorrió todo el proyecto, se tomaron algunas imágenes aéreas como parte de un vuelo de inspección como se muestra más adelante.



Figura 51: Vuelo de inspección de obra La Dignidad

## Ubicación del proyecto

El proyecto se encuentra ubicado en el Municipio de Escuintla, Departamento de Escuintla. El terreno cuenta con una latitud de  $14^{\circ}17'26.63''N$  y una longitud de  $90^{\circ}47'47.29''O$ . La urbanización consta de 1,000 casas de tamaño (14X7m), cuya construcción está separada en 5 fases, y cada fase contiene alrededor de 178 viviendas.

## Planicie del terreno

Por estar cerca de la costa en la urbanización se tienen alturas máximas de 20 metros. El terreno se clasifica como llano, siendo este un factor importante a tomar en cuenta, puesto que dependiendo de la categorización que se le dé variará la cantidad de puntos de control que se deben de usar para tener una buena precisión en la topografía. En los siguientes capítulos se explicará el efecto de tener un área ligeramente ondulada.

## Dimensiones del terreno

El proyecto tiene una dimensión aproximadamente de 24.88 hectáreas, como se muestran en la Figura No. 52. Lo cual, el borde rojo muestra la delimitación de la obra. Sin embargo el área de estudio consta de aproximadamente 8 hectáreas ya que, las primeras 2 fases ya estaban habitadas y no se tenía pleno acceso a ellas.



Figura 52: Vista aérea del terreno Escuintla

## Colindancias

La urbanización tiene en sus vecindades, por la derecha, una pequeña residencial en la parte inferior, en la parte superior se colinda con el municipio de Escuintla. Por la izquierda se tiene la vía principal CA2 y el centro comercial Inter Plaza, que para este tipo urbanización es muy conveniente el estar cerca del mismo por las necesidades básicas de las personas, y por la plusvalía que generan este tipo de construcciones.

## Restricciones

Respecto a las restricciones se inspeccionó el “RAC 101: Regulación sobre Aeronaves No Tripuladas, Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales”, que tomó vigencia el 22 de Julio del 2013, creado por la Dirección General de Aeronáutica Civil. Dentro del la Regulación antes mencionada se tomó en cuenta las siguientes restricciones:

- Altura máxima de operación
- Operación de distintos tipos de aeronaves no tripuladas
- Áreas autorizadas para la operación de aeronaves no tripuladas

Para la altura máxima de operación el RAC 101 establece en el artículo 101.35 lo siguiente “una persona no debe operar un Avión No Tripulado, por encima de 400 pies AGL, excepto: en un área aprobada específicamente en las Operaciones específicas de Certificado Operático (CO) o en el permiso de Vuelo, como un área para la operación de aeronaves no tripuladas y de acuerdo con las condiciones de la aprobación, o según lo permitido por esta regulación.”[27] En el presente caso, el vuelo tendrá una altura máxima de aproximadamente 230 pies.

Por último, respecto a las áreas autorizadas para la operación de aeronaves no tripuladas, en el artículo 101.9 del RAC 101, se establece que para cualquier estudio se debe de

presentar una solicitud de aprobación de la operación en un área para el funcionamiento de las aeronaves no tripuladas en general ante la DGAC. Esta entidad es la encargada de aprobar dicha solicitud y por ende determinar si un área es segura para el vuelo. El presente estudio, por tratarse de una altura baja no se necesita llenar el formulario correspondiente, siempre y cuando no se encuentre en un área con restricción de vuelo.

## **Seguridad**

En relación a la seguridad se debe prevenir cualquier riesgo que pueda afectar el equipo, la obra, los alrededores y principalmente a las personas. Por consiguiente, en la visita de campo se tomó en cuenta los siguientes aspectos:

- Agentes policiales
- Maquinaria pesada
- Áreas de construcción
- Vegetación
- Cercado
- Espacios abiertos y cerrados

En cuanto a la seguridad de la obra, ésta se encuentra totalmente cerrada por una malla. Asimismo, la constructora ha subcontratado a una empresa de agentes de seguridad, la cual se encarga de regular la entrada y la salida de cualquier persona a la construcción. Además, las personas que se encuentran dentro del proyecto de urbanización son solamente trabajadores de la constructora.

Por otra parte, existe un flujo denso de maquinaria pesada, sin embargo, la urbanización cuenta con grandes espacios por donde las máquinas se trasladan sin generar ningún tipo de tráfico. Actualmente, solo están en construcción la fase 4 y 5 de la urbanización, lo cual causa que esté más libre el área de estudio. Finalmente, respecto a los espacios abiertos y cerrados, se pueden observar bastantes áreas verdes y calles anchas con disponibilidad alta de vehículos, esto garantiza un buen espacio para el despegue como para el aterrizaje, y áreas adecuadas para situar los puntos de control. Por último, respecto a la vegetación, se observa que los árboles más altos son de aproximadamente de 20 metros de altura.

## **Puntos de control**

En la planificación de puntos de control se buscó los mejores espacios abiertos para la adecuada colocación de los mismos, esto porque si se coloca en espacios cerrados al momento de que el UAV realice la fotogrametría, puede que estos puntos no se observen de todos los ángulos por estar escondidos, o por otra parte que los puntos de igual manera no logren ser visibles por estar cerca de objetos de gran altura que les generen sombras. Además, que la estación del GPS se recomienda que se encuentre en un área abierta para tener una

recepción de satélites, y evitar así cualquier interferencia. Por lo tanto, se utilizaron espacios de parqueos y áreas verdes.

Respecto a la cantidad de puntos de control, esto se determinó en relación del tamaño del terreno y de su planicie. El área de estudio es de aproximadamente de 8 hectáreas, a pesar de ello, la dimensión del vuelo fue de 8.60 hectáreas, y esto porque el vuelo tiene que ser más amplio que el terreno por temas de efectividad. Lo cual, con esta dimensión del terreno y la planicie, se determinó usar 7 puntos de control, más el base. Esta referencia ayudará a volver más preciso los resultados a obtener.

Para concretar la cantidad de puntos de control se utilizó un método llamado “patas de mesa”, el cual se refiere a simular el área de estudio como la parte plana de una mesa, y los puntos de control como las patas que sostienen este plano. Este ha sido un método muy eficiente y preciso para varios Ingenieros, por lo que se tomó en cuenta para el presente levantamiento topográfico.

## **Clima**

El Departamento de Escuintla, se considera en Guatemala como “la costa”, lo que conlleva ser un lugar mayormente soleado con temperaturas muy altas. Estos dos factores generan algunos puntos para tomar en cuenta. Con las temperaturas altas es necesario llevar suficiente líquido (agua) para el trabajo de campo, ya que una de las consecuencias más comunes por la falta de éste, es la deshidratación o insolación durante el proceso, principalmente cuando se están tomando los puntos georreferenciados. Por lo que, para el presente estudio se llevó una hielera con bebidas hidratantes para prevenir estas situaciones.

Respecto al sol, que es muy fuerte, se determinó que la mejor hora para ejecutar el estudio era de 8:00 a.m. a 11:00 a.m. lo más tarde, ya que la temperatura es un poco más baja, y porque el ángulo en el cual se da la irradiación solar a estas horas de la mañana no genera sombras dentro de la obra. Por otra parte, el sol hace que se genere un cierto brillo en el proyecto, causando que el usuario pierda visibilidad durante el levantamiento fotogramétrico. Esto se solucionó cambiando la configuración de la cámara, y principalmente elaborando los puntos de control con un material mate u opaco, que no brilla con el reflejo del sol.

La visita preliminar también fue útil para determinar el tipo de equipo que se iba a necesitar para lograr abarcar todo el terreno sin problema alguno, como se muestra a continuación.

## **UAV**

El Vehículo Aéreo No Tripulado a utilizar en el presente estudio es un DJI Mavic Pro 2, el cual es apto para abarcar las 8 hectáreas que aproximadamente mide el terreno. Se trata de un UAV cuadricóptero bastante moderno, el cual posee como mayor ventaja una cámara de muy alta calidad. Su principal desventaja es que posee un tiempo de vuelo muy corto, por lo que se tendrá que determinar, más adelante, la cantidad de baterías necesarias para abarcar el área completa.

## **GPS**

Para el área de estudio son necesarios los puntos de control, como ya se mencionó, para los cuales se utilizarán dos GPS marca Trimble R8, colocando uno de ellos como punto base y fijo, mientras que el segundo como base rover (base móvil), que es la estación que estará en movimiento. La estación base se colocaría en medio del terreno y se tendrá que colocar el tiempo total de la toma de puntos rover (móviles).

## **Cinta métrica, bastones y monitores**

Estos equipos servirán para la colocación de los GPS como la extracción de datos con el uso de monitores digitales.

## **Campamento**

El campamento es ideal para este tipo de levantamientos, ya que es el punto fijo en el cual se hará la planificación previa del levantamiento, como también es el lugar en el cual se colocará todo el equipo a utilizar para el mismo. Es muy importante que el lugar sea plano y abierto, y de preferencia que se encuentre en medio del terreno que se va a estudiar. Además, cerca del campamento se colocará el punto de despegue y de aterrizaje.

## **2. Plan de vuelo**

Luego de la visita de campo y la determinación de los factores principales para la fase preliminar, es necesario llevar a cabo el plan de vuelo para cumplir con los objetivos propuestos. Es de suma importancia conocer las especificaciones del equipo, principalmente las del drone, para concretizar a qué altura de vuelo se debe volar el mismo para que no afecte la resolución del levantamiento. Estos los siguientes temas a evaluar:

## **GSD**

Para determinar el GSD (Ground Sampling Distance, por sus siglas en Inglés) se tuvo que tomar en cuenta diferentes factores, entre ellos las dimensiones del sensor de la cámara a utilizar, la distancia del lente focal, la altura teórica de vuelo, y el tamaño de la imagen.

Como bien se ha explicado, el GSD es la resolución que van a tener las imágenes dentro del levantamiento, por lo que es de suma importancia fijarlo, y saber que para una ortofoto el valor del mismo tiene que ser no mayor de 5 cm/pix. En el presente estudio se utilizó la ecuación No. 18 para determinar el GSD a usar.

En las siguientes tablas se encuentran todas las especificaciones que tuvo la cámara utilizada en el presente trabajo.

Equipo utilizado	
UAV utilizado	DJI Mavic Pro 2
sensor	1 pulg CMOS
Ancho del sensor	13.2 mm
Alto del sensor	8.8 mm
Distancia lente focal	10.26 mm
Altura teórica de vuelo	70 m
Ancho de imagen	5472 pix
Altura de imagen	5472 pix

Cuadro 4: Especificaciones de modelo de cámara utilizada

Se puede ver que la altura teórica que se utilizó fue de 70 metros, esto es una suposición puesto que no se sabe el dato final aún, ya que se tendría que tener una resolución mínima de 5 cm/pix para determinar que dicha altura es la adecuada para el levantamiento.

Por otro lado se sabe que no se puede volar más alto que 400 ft por las regulaciones sobre aeronaves no tripuladas en Guatemala. En la siguiente tabla se pueden observar las opciones de altura que se tienen.

GSD (cm/pix)	Altura de vuelo (m)	Ancho pixel (pix)	Distancia focal (mm)	Ancho sensor (mm)
1.18	50	5472	10.26	13.2
1.41	60	5472	10.26	13.2
1.65	70	5472	10.26	13.2
1.88	80	5472	10.26	13.2
2.12	90	5472	10.26	13.2
2.35	100	5472	10.26	13.2
2.59	110	5472	10.26	13.2
2.82	120	5472	10.26	13.2

Cuadro 5: Resoluciones de imágenes respecto a la altura de vuelo

### Altura de vuelo (H)

Como se puede observar se tiene un máximo de altura de 120 metros con un GSD no mayor a 5, por lo que se puede utilizar perfectamente dicha altura. Por el otro extremo, se tiene una altura mínima de 50 metros con un GSD menor a 5. No obstante, se tomará la altura supuesta que es 70 metros por ser más conservadores, y para aprovechar lo plano de la superficie.

### Traslape horizontal (Dw)

Para el traslape de las imágenes es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$GSD * AnchoImagen / 100 \tag{30}$$



Este valor es el porcentaje que tiene que tener el traslape horizontal en el levantamiento. En el marco teórico se explicó que lo recomendable para este valor es tener un 80 % mínimo de traslape horizontal.

En la siguiente tabla se muestra los distintos porcentajes que tenemos dependiendo del GSD.

GSD (cm/pix)	Altura de vuelo (m)	Ancho pixel (pix)	Traslape horizontal (%)
1.18	50	5472	64
1.41	60	5472	77
1.65	70	5472	90
1.88	80	5472	103
2.12	90	5472	116
2.35	100	5472	129
2.59	110	5472	142
2.82	120	5472	154

Cuadro 6: Traslape horizontal

Se puede observar que las alturas 50 y 60 metros contienen un traslape menor al 80 por lo que se recomienda realizar el estudio con más altura. A 70 metros de altura se tiene un traslape del 90 % por lo que se puede usar 80 % que es el recomendado, esto porque usar mas del 85 % no mejora ya nada dentro del modelo.

### Traslape vertical (Dh)

Al igual que el traslape horizontal, en el traslape vertical se recomienda considerar un porcentaje mínimo del 60 %. Para la determinación del Dh es necesario utilizar la siguiente ecuación:

$$GSD * Altodeimagen/100 \tag{31}$$

El Cuadro No.7 muestra los porcentajes considerados.

GSD (cm/pix)	Altura de vuelo (m)	Ancho pixel (pix)	Traslape Horizontal (%)
1.18	50	5472	43
1.41	60	5472	51
1.65	70	5472	60
1.88	80	5472	69
2.12	90	5472	77
2.35	100	5472	86
2.59	110	5472	94
2.82	120	5472	103

Cuadro 7: Traslape vertical

Según los resultados, se tendrá que tener en el levantamiento un traslape vertical de 60 % para 70 metros de altura.

### Velocidad del vuelo

La velocidad del vuelo dependerá de las condiciones del terreno. En el presente caso, se debe de tomar en consideración que en la urbanización a estudiar corre mucho viento, lo cual hará que a al UAV se le dificulte el desplazamiento normal. Por lo que, si dentro del lugar de estudio existen velocidades de viento mayores a 35 m/s, no es conveniente para el equipo navegar con estas circunstancias; pero si se tiene una velocidad del viento menor a esa el vehículo aéreo podrá desplazarse sin dificultad alguna. Consecuentemente, en el presente estudio se estableció un rango de velocidades, para el UAV mantenga una velocidad media. El UAV tendrá una velocidad mínima de 2 m/s y una velocidad máxima de 15 m/s.

### Tipo de rejilla

Para este tipo de levantamiento es necesario tomar medidas del terreno, por lo que es lógico hacer una rejilla más precisa y con mayor detalle. Por lo tanto, se utilizará la doble grilla para que esta tome fotografías de todos los ángulos. Siempre tomando en cuenta que la altura de vuelo es de 70 metros y el traslape horizontal y vertical es del 80 % y del 60 %, respectivamente.

### Tamaño de puntos de control

El tamaño de los puntos de control se determina respecto al GSD elegido, ya que el punto de control tiene que ser mayor al pixel de la cámara cuando este sea tomado en el aire. Por lo tanto, para determinar el tamaño mínimo necesario, se utiliza la siguiente ecuación:

$$GSD * 10 \tag{32}$$

Ya que el GSD a utilizar en el presente estudio es de 1.65 cm/pix, la dimensión mínima deberá ser de 16x16 centímetros. No obstante, se puede hacer puntos de control mayores a este dato.

### Creación de malla aproximada sobre el terreno

Una vez ya se han determinado los factores anteriormente descritos, se puede pasar a la creación de la malla sobre el terreno. Para llevar a cabo la misma se utilizó una aplicación denominada Map Pilot for DJI, en la cual se dibujó aproximadamente el área de estudio y se le colocó la doble grilla. Siempre ajustando la misma a las medidas propuestas como lo muestra la siguiente Figura No. 53.

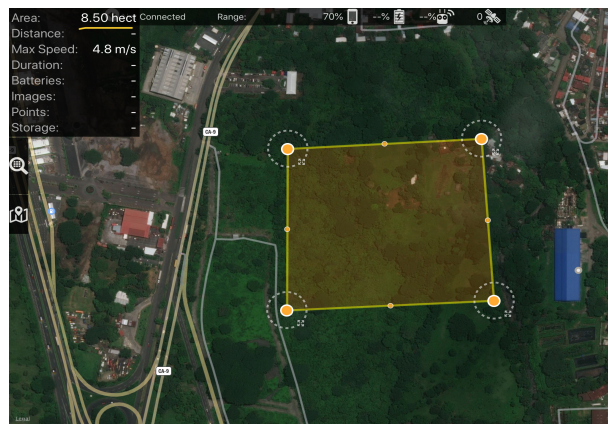


Figura 53: Área determinada para levantamiento fotogramétrico

Luego de delimitar el área, se coloca el tipo de rejilla propuesta, con su altura determinada, y sus porcentajes de traslapes. Se comprueba el GSD de la fotografía, se evalúa la cantidad de baterías que requerirá el vuelo, la duración del mismo y los límites de velocidad propuestos. Todos estos datos se pueden ver en la siguiente Figura No. 54.

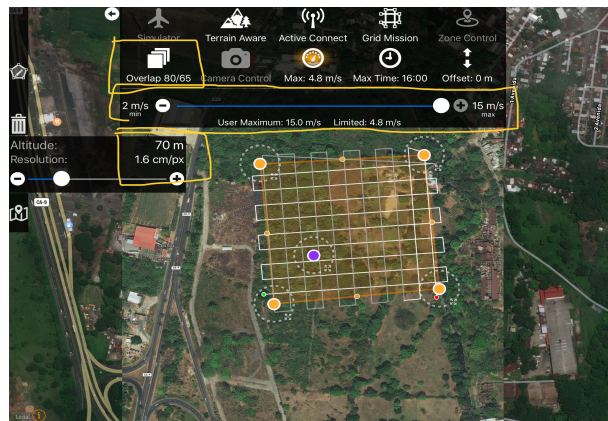


Figura 54: Colocación de doble rejilla

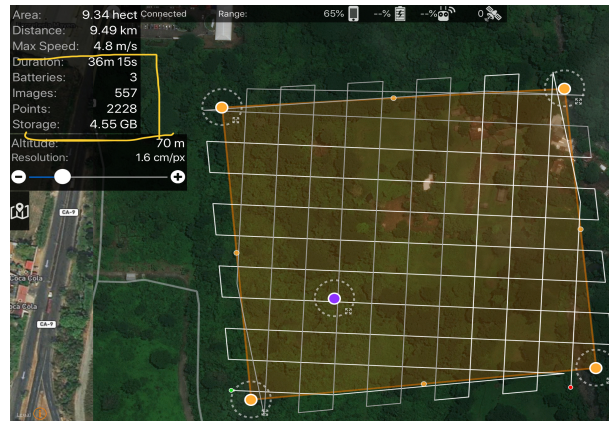


Figura 55: Cantidad de baterías necesarias y tiempo de vuelo

En la Figura No. 55 Se puede observar que el levantamiento topográfico necesitará 3 baterías como mínimo, que el vuelo tendrá una duración de 36 minutos, tiempo en el cual tomará 557 fotografías. Esto es a lo que se le conoce como el “plan de vuelo”, y ya teniendo estos datos se puede realizar el trabajo de campo.

### 3. Fase de campo

El presente estudio se realizó el día 6 de Octubre del 2019 en la urbanización La Dignidad, en el Municipio de Escuintla, Departamento de Escuintla, Guatemala. Se salió de la ciudad capital a las 7:00 de la mañana, arribando al lugar de destino a las 8:30 a.m. En el lugar de destino se tenía una temperatura de 27 grados Celsius, y el cielo se encontraba despejado, apenas comenzaba a subir el sol. La ruta que se tomó para llegar a la urbanización fue la siguiente: Primero bajar la ruta Interamericana hacia la Ciudad Guatemala, luego tomar la circunvalación El Trébol para poder acceder a la Calzada Aguilar Batres y seguir por la vía CA-9 ruta al Occidente hasta, entrar en la autopista SIVA Palín-Escuintla, hasta llegar a la circunvalación de Escuintla en el km 82, el proyecto se encuentra ubicado del lado derecho.

#### Campamento

Primero se colocó el campamento base en el área prevista en la visita inicial, este campamento constaba de un toldo y una mesa plástica para acomodar todo el equipo, y planificar el procedimiento a ejecutar. En la Figura No. 56 Se puede observar el campamento, donde se está determinando la colocación de los puntos de control en los planos del terreno.



Figura 56: Planificación de puntos de control dentro de campamento base y preparación de equipo

### Ubicación de puntos de control

Para esta etapa se movilizó por toda la urbanización buscando los espacios abiertos, y los puntos estratégicos para que se tuviera una buena dispersión de puntos dentro del área. Se colocaron en total 8 puntos, 7 rovers y 1 base. La distribución de los puntos fue hecha con el objetivo de tener uno en cada esquina del cuadrante, y uno en la parte de en medio del terreno, el punto base. Los puntos base se elaboraron de un material mate u opaco que no permite que el sol se refleje en los mismos, y se pudieran observar claramente desde los 70 metros de altura, además de que medían un tamaño de 60x60 centímetros, como lo muestra la siguiente Figura No. 57.



Figura 57: Puntos de control utilizados para el levantamiento topográfico

## Preparación de equipo

Teniendo instalados los puntos de control se comenzaron a preparar los equipos a utilizar, se colocó dentro del campamento base el UAV de inspección y el UAV del levantamiento para poder calibrarles el compás y la brújula. Los equipos GPS se abrieron y se les revisó el nivel de batería. Se instaló la base de despegue y la de aterrizaje. Por último, se graduaron los bastones. La Figura No. 58 muestra el armado de la zona de despegue y de aterrizaje.



Figura 58: Estación de despegue y aterrizaje de vuelos UAV

Por otro lado, se chequeó el viento y la interferencia magnética del lugar, ya que estos dos factores pueden causar accidentes con el equipo aéreo. En la siguiente figura se muestra la interferencia magnética del lugar en los 4 días anteriores al 6 de octubre de 2019.

Antes de volar tu drone por favor revisa la previsión de tormentas geomagnéticas.  
No volar | Evitar si es posible | Ok para volar

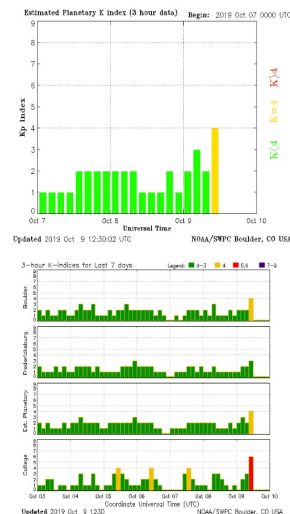


Figura 59: Interferencia magnética. Elaborado por Computedmano App

Los resultados muestran que se tuvo un índice de K de 3, lo que se considera un buen dato, puesto que no se generará algún tipo de interferencia que cause daño del equipo o la

pérdida material de esté. Lo idea para un vuelo es que el índice K de interferencia magnética se mantenga en menos de 4, si esta es igual a 4 es un poco arriesgado pero aún así se puede ejecutar el vuelo, ahora si es mayor de 4 si es conveniente irse a otro lugar y buscar menos interferencia.

## Vuelo de inspección

En la siguiente fase se realizó un vuelo de inspección utilizando un UAV cuadricóptero marca 3DR modelo SOLO. Este vuelo previo se colocó la altura teórica, como se puede ver en la Figura No. 60, y ayudó a determinar que no existiera algún obstáculo dentro del área de estudio.



Figura 60: Segundo vuelo de inspección de área

Asimismo, dentro del vuelo de inspección también se fueron buscando los puntos de control para determinar que estuvieran colocados correctamente, fueran visibles y que no estuvieran afectados por alguna sombra de estructura, vegetación o personal, como muestra la Figura No. 61.

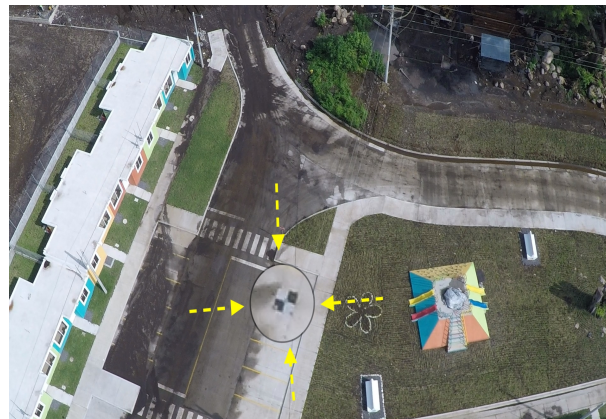


Figura 61: Inspección de visibilidad de puntos de control

## Levantamiento fotogramétrico

Previo a ejecutar el vuelo fotogramétrico, se realizó un primer vuelo que tomó de igual forma el recorrido del georreferenciado, sin embargo, éste llevaba como misión hacer el levantamiento sin los puntos de control. Esto se hizo de esta manera, para comparar los resultados sin los puntos georreferenciados con los que se les colocó el GPS. Con estos datos se obtendrá el error real de los drones y se demostrará porque es necesario un equipo de GPS para corregir dicho error.

Para el levantamiento fotogramétrico se colocó el UAV en la base de despegue, como se puede ver en la Figura No. 62.



Figura 62: Configuración de plan de vuelo y despegue de UAV

Se cargó todo el plan de vuelo determinado, y se ejecutó el mismo. Durante el vuelo se tiene que controlar que la nave aérea no tripulada esté siguiendo el curso deseado, y que la configuración de las fotografías sea también la correcta. Esto se puede observar en la siguiente Figura No. 63.



Figura 63: Plan de vuelo ejecutándose en desarrollo



## Toma de puntos georreferenciados

Para el segundo vuelo, se realizó el recorrido para tomar los puntos georreferenciados, para esto se prepararon todos los equipos de GPS. Uno de los dos GPS se colocó en el trípode, en el centro del terreno, el cual sirvió como punto base. Primero se tuvo que nivelar el trípode como lo muestra la Figura No. 64



Figura 64: Calibración de punto base central



Figura 65: Toma de altura de GPS

Dentro de la calibración lo que se tiene que tomar en cuenta es que la base sea, preferiblemente, de un material duro, ya que cuando se coloca en superficies blandas como la grama, el punto de control tiende a ondularse y no queda totalmente estirado. Asimismo, se debe calibrar buscando el punto medio del punto de control, ya que esto garantiza que el punto que se está tomando tenga el mismo valor que el marcador que se coloque más adelante.

Por otro lado, se tiene que medir a qué altura se encuentra colocado el GPS, para esto es necesario usar un metro o una cinta métrica y poder así determinar este valor. Esto ayuda

a tarar el GPS, teniendo la altura determinada como altura inicial. Como se muestra en la Figura No. 65.

La altura a la que se colocó el GPS fue de 1.58 metros, por lo que se prosiguió a la configuración del punto base. Para dicha configuración se utilizó la aplicación para el celular Trimble DL, la cual únicamente se encuentra disponible para el sistema operativo Android. Esta aplicación ayuda al usuario al usuario a poder almacenar el punto georreferenciado de las bases rover, además, de poder modificar temas como, altura de equipo, duración de recepción y envío de datos. Por ser el punto base este tuvo que estar actualizándose el tiempo total de la toma de puntos, ya que es el encargado de amarrar el polígono.



Figura 66: Configuración y toma de puntos de control Trimble DL app

Para la realización del presente levantamiento topográfico fue necesario movilizarse de punto a punto con vehículo, ya que era bastante extensa la urbanización, y con el paso de las horas la temperatura iba subiendo. Por lo que la constructora puso a la disposición un carro ATV Polaris para poder movilizarse con más facilidad dentro de toda la obra, como lo muestra la Figura No. 67.



Figura 67: Transporte para equipo geodésico, Polaris

Así fue el transporte por toda la urbanización donde se fueron tomando los puntos rover, que en total fueron 7 puntos de control. En cada uno de los puntos se tomó 10 minutos como mínimo de recepción de la señal. Dentro del apéndice aparece el reporte de cada uno de los puntos tomados y su ubicación respectiva.

En resumen, el primer vuelo de inspección se llevó a cabo en 10 minutos, revisando si la altura de vuelo si era adecuada, y si los puntos de control estaban visibles. El segundo vuelo, sin puntos de control, se demoró 45 minutos con el uso de tres baterías.

Y por último, el tercer vuelo georreferenciado duró 45 minutos, utilizando 3 baterías. A este procedimiento se le agregó 1 hora con 10 minutos para la toma de puntos base y rover de la obra. Por lo que en total, fueron 1 hora con 55 minutos el tiempo total que duró el levantamiento topográfico.

#### **4. Fase final**

En la presente fase final solamente se describe la metodología completa que se llevó a cabo para el procesamiento de datos del levantamiento fotogramétrico con puntos georreferenciados. Para este vuelo georreferenciado se utilizaron 2 softwares distintos, con la finalidad de hacer un análisis de precisión más exacto. No obstante, en el apartado de resultados y en el de los apéndices se encuentran los informes de cada uno de los vuelos, con su análisis correspondiente. Para el presente estudio se utilizó un ordenador marca Dell Alienware, con un procesador Core i7, con una memoria de 16 GB de RAM, y una tarjeta de video NVIDIA GeForce GTX 1080. Asimismo, los softwares utilizados fueron Pix4d y Agisoft Photoscan.

Etapas detalladas del procesamiento de datos:

##### **Extracción de imágenes**

Al finalizar el estudio de campo, se transportó todo el equipo para poder extraer la información necesaria del levantamiento. Al equipo aéreo se le extrajeron 750 imágenes del primer vuelo sin los puntos geodésicos, las cuales se guardaron dentro de una memoria externa.

Para el segundo vuelo se extrajeron 770 imágenes, y aparte se extrajeron los puntos de control de los equipos geodésicos para poder realizar el levantamiento georreferenciado. Luego, se procedió a verificar si todas las imágenes se encontraban en el formato requerido.

Además, se realizó una revisión previa de todas las imágenes, eliminando algunas que no tenían información necesaria para el levantamiento. Esto fue muy útil para la etapa posterior de limpieza del modelo.

##### **Software**

Como se indicó anteriormente, los softwares que se usaron en el presente estudio fueron Agisoft Photoscan versión 1.5.5 y PIX4D Mapper versión 4.4.12. Estos se pueden bajar

de forma gratuita y se puede habilitar la versión principiante que sirve para conocer los programas por completo, con un límite de 30 días de uso.

Primero, se llevó a cabo todo el levantamiento en Photoscan y luego se procesó en PIX4D, posteriormente se realizaron las comparaciones. Asimismo, se realizó el procesamiento de datos para cada uno de los vuelos realizados. Dentro del apéndice se encontrarán los informes de dichos procesos.

Por último, se utilizó Civil Cad de Autodesk para proyectar los modelos de elevación, las curvas de nivel, la nube de puntos, y el ortomosaico.

## Visión de mapa

Luego de la descarga e instalación de los programa se procede a la importación de las imágenes. Tanto Photoscan como PIX4D poseen la opción al inicio de la pantalla para agregar nuevos archivos. Al momento de agregar las fotografías, se tuvo que verificar que las mismas estuvieran dentro del mismo cuadro de estudio. Esto, ya que dentro del estudio se pudo haber tomado alguna imagen por error en el momento de despegue o aterrizaje del equipo.

Dentro del software tiene que aparecer la trayectoria que tuvo el UAV durante el levantamiento topográfico como se muestra en las figuras No. 68 y 69 .

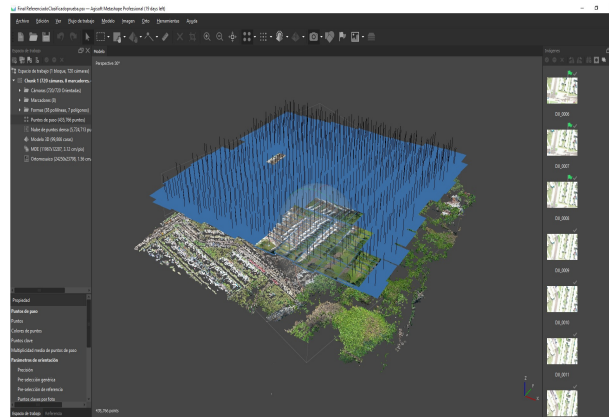


Figura 68: Mapa de trayectoria de levantamiento topográfico Agisoft photoscan

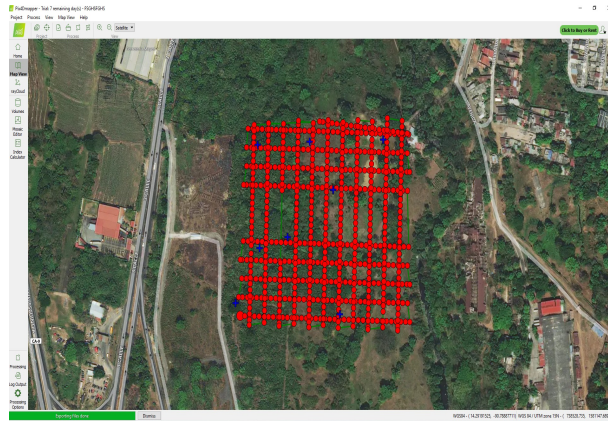


Figura 69: Mapa de trayectoria de levantamiento topográfico PIX4D

En el software Photoscan se puede realizar un análisis para determinar qué área del cuadro tomado contiene información de calidad para el presente estudio. Esto es útil al momento de definir el cuadro de estudio, ya que, normalmente las orillas del cuadro tomado tendrían que tener desperfectos respecto a las imágenes, tal y como se observa en la Figura No. 70.

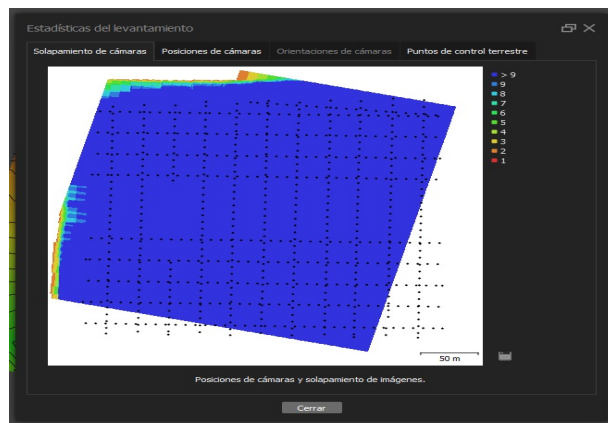


Figura 70: Análisis de solapamiento de cámaras Agisoft photoscan

El área azul muestra que en esos espacios se encuentran con información suficiente para tener resultados de calidad, en comparación al área amarilla y al área roja que son áreas deficientes, y que por lo tanto se tienen que eliminar del estudio.

### Orientación de fotos

Las imágenes extraídas de los equipos aéreos contienen información de ubicación, puesto que cada una de las tomas contiene coordenadas X,Y y Z. De manera que es importante conocer el sistema de coordenadas que se va a utilizar en el estudio, puesto que si no se toma en cuenta, al momento de organizar las imágenes, estas no concordaran con el modelo.

Dentro de nuestro estudio se utilizó el sistema de coordenadas UTM , (Universal Trans-

verse Mercator, por sus siglas en Inglés), específicamente el WGS84 en la región 15N. Por lo tanto, todas las coordenadas de las imágenes se convirtieron a este sistema, y esto se verificó con todos los softwares.

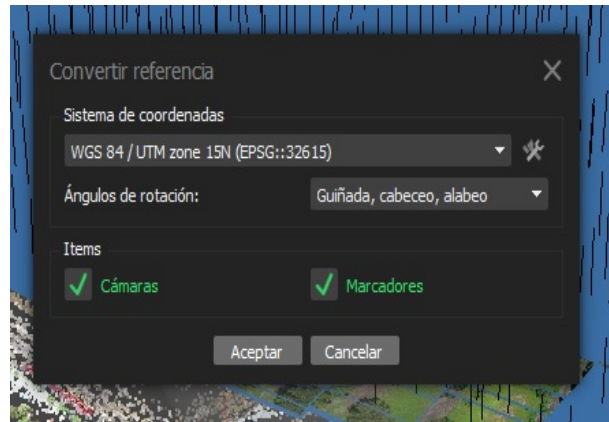


Figura 71: Conversión de imágenes Agisoft photoscan

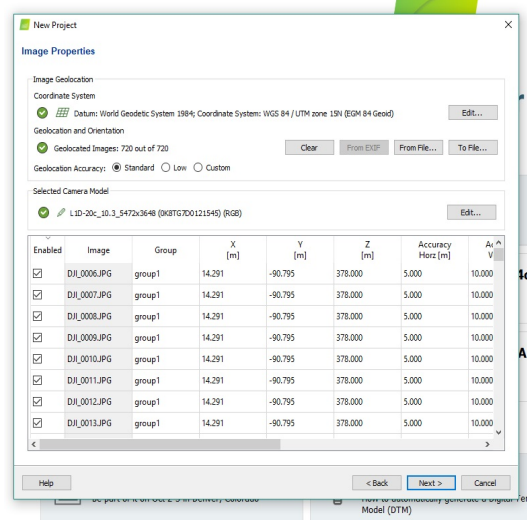


Figura 72: Conversión de imágenes Pix4d

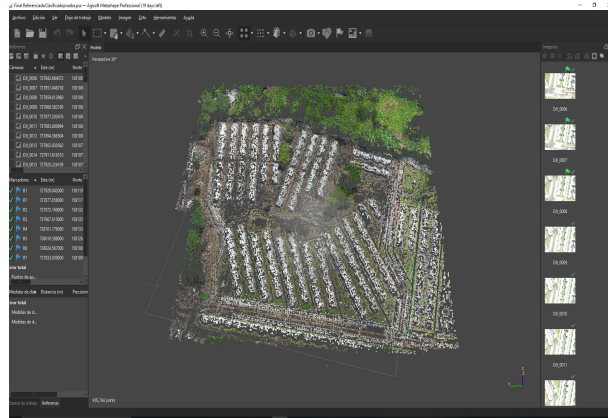


Figura 73: Nube de puntos inicial Agisoft photoscan

Luego de convertir las imágenes se procede a la orientación de las mismas, esto sirve para ubicar de nuevo el modelo, dependiendo del sistema geodésico elegido. Por lo que se tiene como resultado una nube de puntos que expresa el terreno de estudio. Como se puede ver en las figuras No. 73 y 74. En esta parte se modifica el cuadro de estudio, delimitando la nube de puntos.

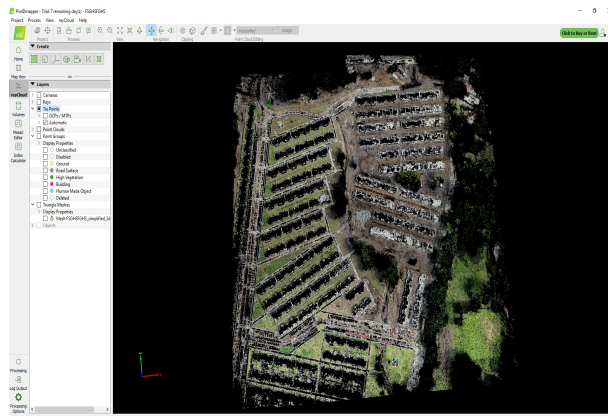


Figura 74: Nube de puntos inicial Pix4d

## Puntos de referencia

Los puntos de referencia se extrajeron del equipo geodésico utilizado en la fase de campo, y se guardaron tanto en el ordenador como en una memoria externa. Sin embargo, fue necesario acudir a la Universidad del Valle del Guatemala -UVG- para revelar estos puntos, y usar tanto el software Trimble Business Center, como la licencia adquirida por la universidad.

En este punto se agregan los puntos de referencia a la nube de puntos, los cuales normalmente deben estar guardados en formatos txt. o csv. Asimismo, tiene que tener un orden lógico, esto significa que deben expresar las coordenadas Norte, Este, Elevación, y descripción del punto.

En esta etapa se extrajeron los 8 puntos de control tomados durante la fase de campo, lo cual se puede observar en la Figura No. 75.



Figura 75: Modelo con puntos de referencia

Además, antes de agregar los puntos al modelo fue necesario verificar también el sistema de coordenadas utilizado por el equipo geodésico. Teniendo las imágenes y los puntos de referencia calibrados, se continuó con el siguiente paso que fue rectificar los puntos de referencia con los puntos de control visualizados en las imágenes.

Este proceso trata de ir filtrando las imágenes que contienen un punto de control en ellas, e ir ajustando el punto de referencia hacia el punto de control como se muestra en las figuras No. 76 y 77. Esto genera que el estudio sea más preciso y se disminuya la desviación.



Figura 76: Rectificación de puntos de control Agisoft photoscan



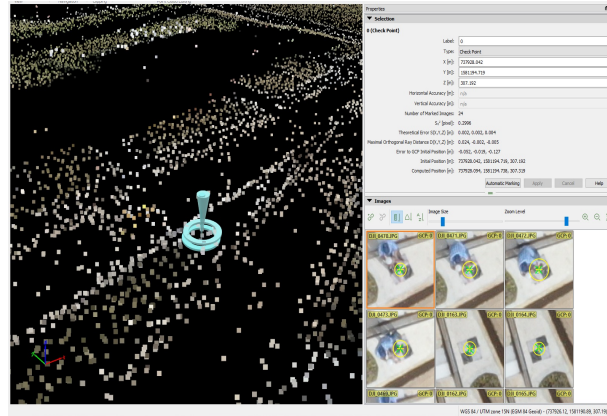


Figura 77: Rectificación de puntos de control Pix4d

## Nube de puntos densa

Luego de tener el modelo georreferenciado, se prosigue a una nueva orientación de imágenes para luego generar la nube de puntos densa. Esta nube es la acumulación de todas las imágenes para generar el nuevo modelo. En el modelo ya se puede observar todo el detalle del terreno, además de ser una representación tridimensional.

Se le llama nube densa ya que indica todos los puntos tomados por el RPAs. En el presente estudio se obtuvieron 40,000,000 puntos del terreno, por lo que, se sabe que el proceso es de larga duración. Como se muestra en la Figura No. 78.

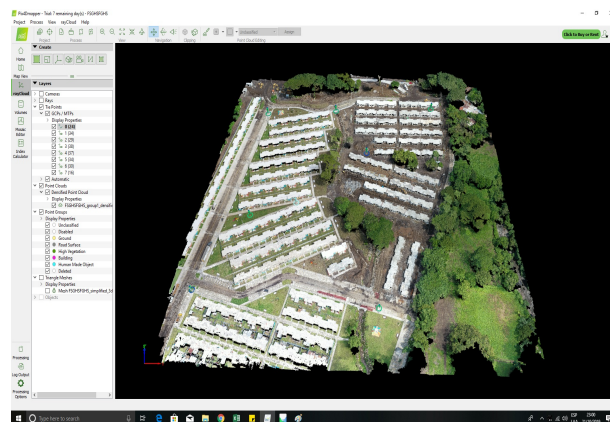


Figura 78: Creación de nube de puntos densa

Al saber que el modelo tiene como propósito obtener mediciones precisas, es necesaria entonces una nube de puntos densa de la más alta calidad. De manera que, todos los softwares poseen diferentes niveles de calidad, para que el usuario pueda determinar cuál es el que más le conviene.

## Clasificación de puntos

En algunos estudios, no es necesario tener una nube de puntos densa con tantos detalles, esto no significa tener una calidad alta, sino que esto hace referencia a los objetos presentes dentro del estudio. Objetos como por ejemplo: las estructuras de cemento, la alta vegetación como lo son los árboles, los drenajes, la maquinaria pesada, entre otros.

Cuando se trata de un estudio para obtener las curvas de nivel del terreno es necesario tener solamente el modelo de la superficie del terreno, es decir, sin ningún detalle extra. Por lo tanto, la clasificación de puntos es una herramienta que ayuda depurar objetos dentro del terreno que no son necesarios.

Dentro del presente estudio se utilizó para clasificar: vegetación, suelo, drenajes, entre otros. Como muestra la Figura No. 79. El software clasifica las imágenes por los colores que aparece en ellas, y estas se van agrupando.

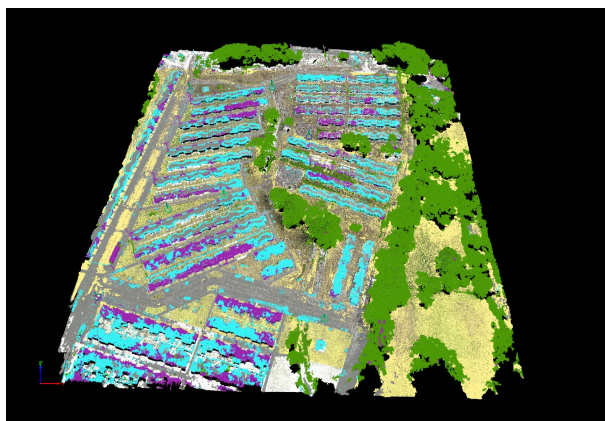


Figura 79: Clasificación de nube de puntos densa

## Limpieza de ruido

Además de la depuración de fotografías por medio de la clasificación de puntos, si el usuario deseara mayor filtración de imágenes, se debe realizar una limpieza de puntos de ruido manual. Esto significa que el usuario debe ir clasificando manualmente con el uso de polígonos los objetos que desea quitar.

En el presente estudio, se llevó a cabo una limpieza de puntos manual para los materiales de construcción que la clasificación de puntos no detectó por completo. Esto es útil puesto que deja solamente el terreno necesario para realizar las curvas de nivel.

## Creación de malla texturizada

La malla texturizada cierra por completo cualquier espacio que contenga el modelo, esto sirve al momento de tomar medidas, ya que se tiene un modelo completamente sólido y tridimensional como se muestra en la Figura No. 80.



Figura 80: Creación de malla texturizada

La malla se puede realizar respecto a la nube de puntos densa como muestra la figura o se puede crear respecto a la clasificación de puntos. Esto, por si solo se necesitara algunas de sus clasificaciones creadas dentro del modelo. Por ejemplo, si solo se necesitara la vegetación del terreno, el volumen de construcción, etc.

### Generación de DSM y DTM

Luego de la creación de la malla texturizada se procede a la generación de los modelos de elevación. Para el presente estudio, se usaron los dos tipos de modelos de elevación.

El primero, llamado DSM, que como se explicó anteriormente, es la representación de las elevaciones que contiene el terreno pero tomando en cuenta todos los detalles que exista en el modelo. Por lo tanto, sirve para determinar las alturas de las estructuras u objetos que se encuentren en el área. Figura No. 81.

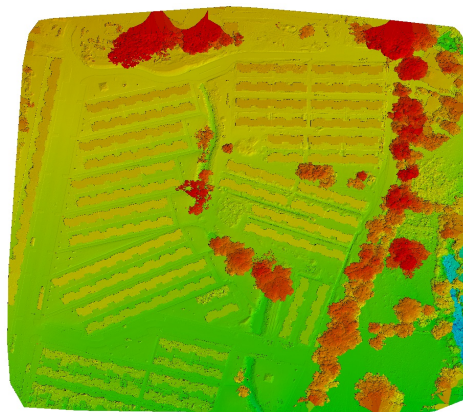


Figura 81: Generación de modelo de elevación detallada

El segundo conocido como DTM, que de igual forma como se explicó anteriormente, es la representación de las elevaciones existentes dentro del modelo estudiado. Generalmente,

esto sirve para la creación de las curvas de nivel, ya que, para realizar las curvas de nivel se tiene que tener un modelo que solo tome en cuenta las diferencias de altura de la superficie. En el presente estudio, se realizó una limpieza y una clasificación de materiales para sólo dejar el terreno y poder obtener de él, únicamente la representación gráfica como lo muestra la Figura No. 82.

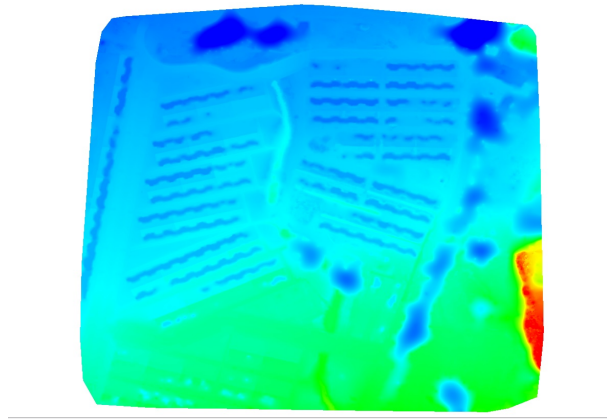


Figura 82: Generación de modelo de elevación del terreno

### Ortomosaico

Por último, la creación del ortomosaico para el presente levantamiento se realizó con el fin de demostrar la resolución final obtenida con la ayuda de los UAV. En ella se puede observar el detalle total del levantamiento. Como se puede observar en la Figura No. 83.



Figura 83: Creación de ortomosaico pix4d

Además, de utilizar el software PIX4D para el ortomosaico también se utilizó el software Agisoft Photoscan, con la finalidad de poder elaborar una comparación de las resoluciones del modelo. Los ortomosaicos se exportaron al programa Civil Cad de Autodesk, esto para demostrar compatibilidad con softwares que utiliza la Universidad del Valle de Guatemala -UVG- y la mayoría de empresas que trabajan dentro del área de construcción.

## Informes

Los informes generados por los dos softwares son parte importante para el estudio, ya que con ellos se encuentran todas las configuraciones del levantamiento, la precisión de las imágenes, la precisión de los puntos de control, etc.

Se realizaron informes correspondientes tanto con el programa Agisoft Photoscan, como con el programa PIX4D. Más adelante se explicará detalladamente cada parte de los informes, incluyendo sus respectivos resultados. Como se observa dentro de las figuras No. 84 y 85.



Figura 84: Reporte final Agisoft photoscan

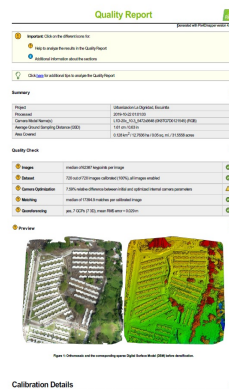


Figura 85: Reporte final Pix4d

## A. Primer levantamiento fotogramétrico

### 1. Características de vuelo

Como objetivo de este primer vuelo, se tuvo el de realizar el levantamiento fotogramétrico con el uso de Vehículos Aéreo No Tripulados sin el uso de puntos georreferenciados para determinar la precisión topográfica de los UAV's.

En el siguiente Cuadro No. 8 se encuentran las características del primer vuelo.

Características de vuelo	
No.	Vuelo 1
Fecha	25/09/19
Puntos GPS	No
UAV	Mavic pro 2
Área	8.90 hect
Tiempo vuelo	44m 42s
Baterías Requeridas	3
Cantidad de fotos	763
Velocidad Maxima	3.6 m/s
Altura de Vuelo	70 m
Tipo Rejilla	Doble

Cuadro 8: Características del primer levantamiento fotogramétrico sin puntos georreferenciados

## 2. Resultados de levantamiento con agisoft photoscan

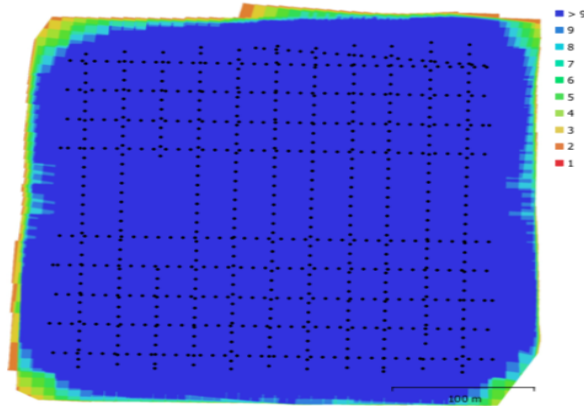


Figura 86: Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes

Número de imágenes	720
Altitud media de vuelo	72.6 m
Resolución en terreno	1.55 cm/pix
Imágenes alineadas	720
Puntos de paso	1,665,274
Proyecciones	412,366
Error de reproyección	1.93 pix
Área cubierta	0.13 km <sup>2</sup>

Cuadro 9: Características experimentales del levantamiento No. 1

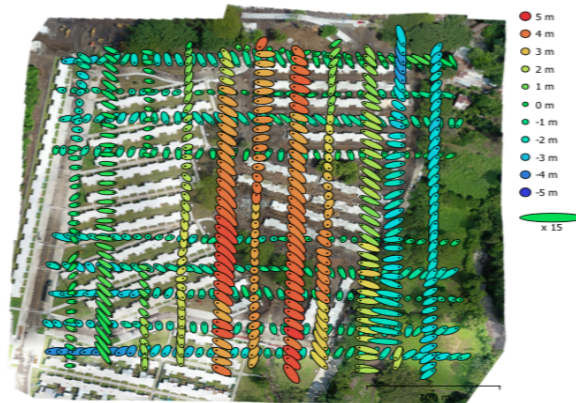


Figura 87: Posiciones de cámaras y estimadores de error

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
0.395673	0.392756	2.1422	0.557507	2.21355

Cuadro 10: Errores medios de las posiciones de cámaras

### 3. Resultados de levantamiento con PIX4D

Imágenes	media de 62,387 puntos clave por imagen
Set de Datos	720 de 720 imágenes calibradas (100 %), las imágenes disponibles
Optimización de cámara	1.11 % diferencia relativa respecto a optimización inicial y la optimización interna de la cámara
Matching	Media de 17,395.3 concidencias de imagen pre calibrada
Georreferenciado	Sí, no 3D GC

Cuadro 11: Chequeo general



Figura 88: Número de imágenes sobrepuestas

Número de puntos clave 2D	12,360,909.00
Número de puntos clave 3D	3,740,013.00
Error de proyeccion media [pixeles]	0.128

Cuadro 12: Cantidad de puntos claves dentro del levantamiento

Desviaciones de posicion de camara			
	X[m]	Y[m]	Z[m]
Media	0.083	0.084	0.136

Cuadro 13: Diferencia de la geolocalización de cámara

## B. Segundo levantamiento fotogramétrico

### 1. Características de vuelo

Como objetivo del segundo vuelo, se tuvieron el de realizar el levantamiento fotogramétrico con el uso de Vehículos Aéreo No Tripulados con el uso de 8 puntos georreferenciados para determinar la precisión topográfica de los UAV's.



En el siguiente Cuadro No. 14 se encuentran las características del segundo vuelo.

Características de vuelo	
No.	Vuelo 2
Fecha	6/10/19
Puntos GPS	Si
UAV	Mavic pro 2
Área	8.90 hect
Tiempo vuelo	44m 42s
Baterías Requeridas	3
Cantidad de fotos	763
Velocidad Maxima	3.6 m/s
Altura de Vuelo	70 m
Tipo Rejilla	Doble

Cuadro 14: Características del segundo levantamiento fotogramétrico con puntos georreferenciado

## 2. Resultados de levantamiento con agisoft photoscan

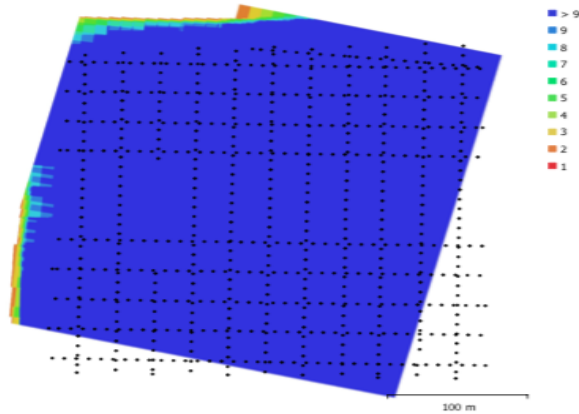


Figura 89: Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes

Número de imágenes	720
Altitud media de vuelo	75 m
Resolución en terreno	1.56 cm/pix
Imágenes alineadas	720
Puntos de paso	435,766
Proyecciones	2,704,025
Error de reproyección	0.602 pix
Área cubierta	0.093 km <sup>2</sup>

Cuadro 15: Características experimentales del levantamiento No. 2



Figura 90: Posiciones de cámaras y estimadores de error

No.	Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
8	0.395673	0.392756	2.1422	0.557507	2.21355

Cuadro 16: ECM de puntos de apoyo

Nombre	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
B1	-1.04953	7.72927	8.04728	2.215 (34)
R1	-5.67823	7.95451	10.3838	1.381 (24)
R2	-2.07705	-1.02962	3.3993	1.644 (30)
R3	-4.54224	-3.38734	5.96957	1.004 (42)
R4	2.13996	5.83138	6.47336	1.492 (39)
R5	8.91345	-10.6895	13.9459	1.184 (41)
R6	2.28808	-1.11333	5.29989	0.758 (30)
R7	0.00496431	-5.28887	5.36342	0.566 (17)
Total	4.29468	6.25531	8.00798	1.399

Cuadro 17: Puntos de apoyo georreferenciados

### 3. Resultados de levantamiento con PIX4D

Imágenes	media de 62,387 puntos clave por imagen
Set de Datos	720 de 720 imágenes calibradas (100 %), todas las imágenes disponibles
Optimización de cámara	7.59 % diferencia relativa respecto a optimización inicial y la optimización interna de la cámara
Matching	Media de 17,394.9 concidencias de imagen pre calibrada
Georreferenciado	Sí, 7 GCPs (7 3D) Error de orientación RMS = 0.029

Cuadro 18: Chequeo general del segundo levantamiento fotogramétrico

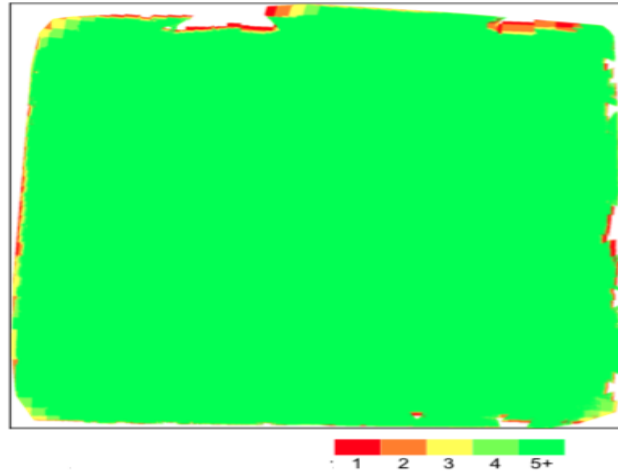


Figura 91: Número de imágenes sobrepuestas

Número de puntos clave 2D	12,360,271.00
Número de puntos clave 3D	3,739,862.00
Error de proyeccion media [pixeles]	0.130
Número de puntos clave	1,360,271.00
Número de puntos clave 2D	10,739,862.00
Error de proyeccion media [pixeles]	0.150

Cuadro 19: Cantidad de puntos claves dentro del levantamiento

GCP Nombre	Exactitud XY/Z [m]	ErrorX[m]	ErrorY[m]	ErrorZ[m]
1 (3D)	0.020/ 0.020	0.015	0.032	-0.094
2 (3D)	0.020/ 0.020	0	-0.015	0.01
3 (3D)	0.020/ 0.020	0.004	0.035	-0.003
4 (3D)	0.020/ 0.020	-0.006	0.011	-0.027
5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.009	-0.056	0.073
6 (3D)	0.020/ 0.020	0.008	0.004	-0.01
7 (3D)	0.020/ 0.020	-0.008	-0.008	0.062
Mean [m]		0.000534	0.000276	0.001542
Sigma [m]		0.008302	0.028889	0.052081
RMS Error [m]		0.00832	0.02889	0.052104

Cuadro 20: Diferencia de la geolocalización de cámara



Figura 92: Nube de puntos densa del levantamiento fotogramétrico No.2

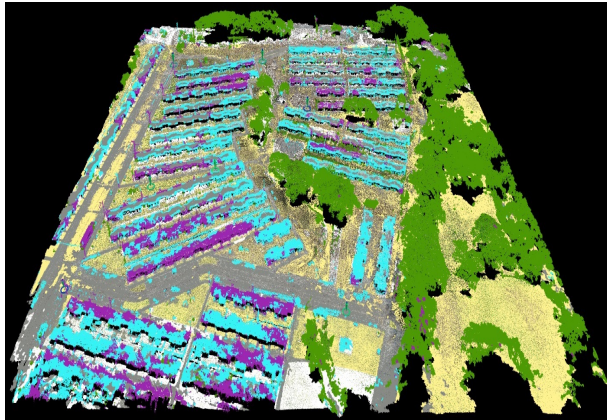


Figura 93: Nube de puntos densa clasificada



Figura 94: Malla tridimensional texturizada

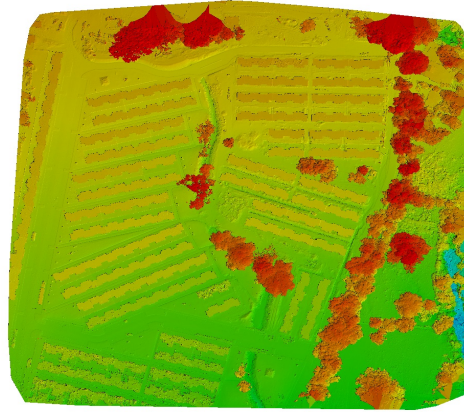


Figura 95: Modelo de elevación de superficie terrestre

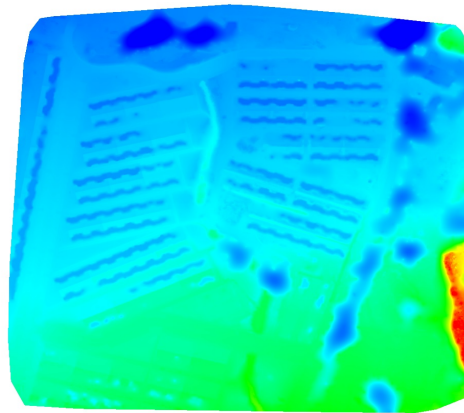


Figura 96: Modelo de elevación del perfil del terreno

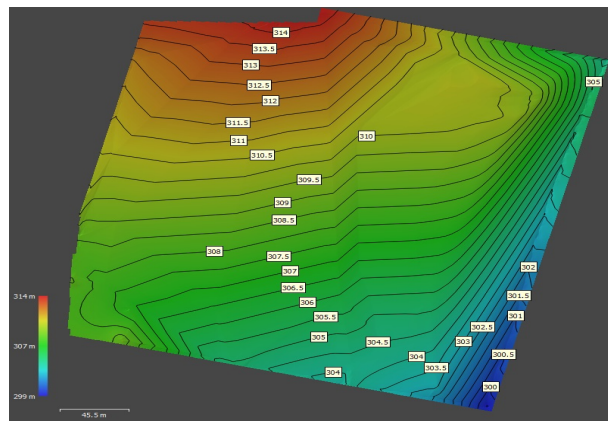


Figura 97: Curvas de nivel



Figura 98: Ortomosaico del levantamiento topográfico con GPS

#### 4. Puntos geodésicos

Sistema de coordenadas	
Nombre:	World wide/UTM
Datum:	WGS 1984
Zona:	15 North
Geoide:	EGM96 (Global)

Cuadro 21: Sistema de coordenadas utilizado

ID	Este (m)	Norte (m)	Elevación(m)	Código de característica
PB1	737928.042	1581194.719	307.192	DEFAULT
r1	737877.058	1581178.514	307.918	r1
r2	737872.169	1581326.399	310.931	r2
r3	737967.015	1581331.854	310.535	r3
r4	738101.176	1581336.142	310.757	r4
r5	738010.598	1581263.309	308.945	r5
r6	738024.567	1581085.042	303.946	r6
r8	737833.939	1581099.297	306.468	r8

Cuadro 22: Listado de puntos marcados durante el levantamiento

### C. Levantamiento topográfico con estación total

Por último, como objetivo para el tercer levantamiento topográfico, se tuvo el de realizar el estudio con el uso de una estación total. Esto será de utilidad para determinar la precisión de este procedimiento antiguo y compararlo con el levantamiento fotogramétrico.

En el siguiente Cuadro No. 23 muestra las características que se tuvieron en este proceso.

Características de levantamiento	
No.	Levantamiento No. 3
Fecha	11/10/19
Puntos GPS	Si
Equipo	ZTS-320/R
Área	8.90 hect
Tiempo procedimiento	5 horas
Cantidad de puntos	475
Prisma utilizado	ZTS-320/R sin reflector
Tipo	Poligonal

Cuadro 23: Características de levantamiento topográfico con estación total

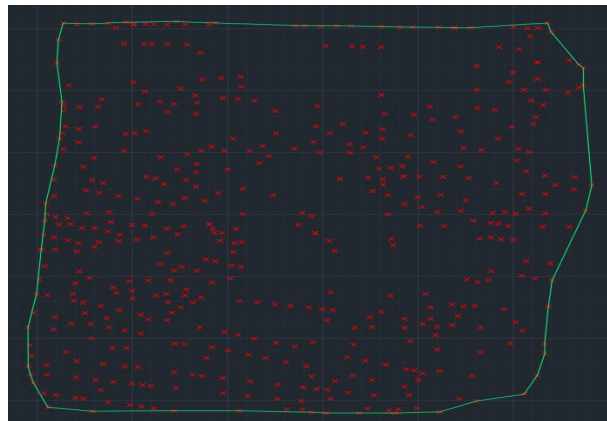


Figura 99: Nube de puntos tomados con la estación total



Figura 100: Ubicación de nube de puntos en civil cad

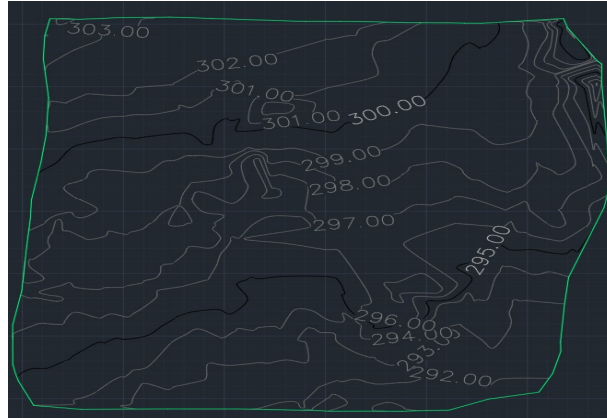


Figura 101: Curvas de nivel generado en civil cad

## D. Resultados generales

Datos levantamiento sin GPS		
Software	Agisoft Photoscan	Pix4D
GSD	1.55 cm/pix	1.59 cm/pix
Imágenes alineadas	720 de 720	720 de 720
Puntos clave por foto	50,000	62,387
Error de reproyección	1.93 píxeles	0.128 píxeles
Error X	0.3956 m	0.083 m
Error Y	0.392756 m	0.084 m
Error Z	2.14 m	0.136 m

Cuadro 24: Comparación de resultados del levantamiento fotogramétrico sin puntos geodésicos

Datos levantamiento con GPS			
Software	Agisoft Photoscan	Pix4D	ZTS-320R
GSD	1.56 cm/pix	1.61 cm/pix	-
Imágenes alineadas	720 de 720	720 de 720	-
Puntos clave por foto	50,000	62,387	450 puntos
Error de reproyección	0.602 píxeles	0.130 píxeles	-
Error X	2.56 cm	0.053 cm	0.24 cm
Error Y	4.29 cm	0.027 cm	0.24 cm
Error Z	6.25 cm	0.15 cm	0.21 cm

Cuadro 25: Comparación de resultados del levantamiento fotogramétrico con puntos geodésicos



Porcentaje de variación			
Metodo	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)
Precisión topografía sin GPS	8.3	8.4	13.6
Precisión topografía con GPS	0.053	0.027	0.15
Porcentaje de variación (%)	99 %	100 %	99 %

Cuadro 26: Porcentajes de variación del levantamiento fotogramétrico con GPS respecto a sin GPS

Porcentaje de variación				
Metodo	Error X (cm)	Error Y (cm)	Error Z (cm)	Tiempo (horas)
Precisión topografía antigua	0.34	0.34	0.31	5.25
Precisión topografía moderna	0.053	0.027	0.15	0.44
Porcentaje de variación (%)	84 %	92 %	52 %	92 %

Cuadro 27: Porcentajes de variación de la topografía moderna respecto a topografía antigua

El objetivo principal del presente estudio fue determinar la precisión del levantamiento topográfico con el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados, mayormente conocidos como “drones”, y compararla con el método antiguo usando una estación total. Este procedimiento tradicional es el más aceptado y utilizado en la Ingeniería Civil, ya que brinda a los usuarios resultados muy precisos en sus estudios. Sin embargo, es un método que requiere de una alta duración de trabajo de campo para poder llevar a cabo un solo levantamiento.

Hoy en día, con la evolución de nuevas tecnologías, los “drones” tienen un gran impacto en la sociedad, pues estos brindan soluciones eficientes a los desafíos cotidianos. Estos innovadores artefactos tienen cada vez más posibilidades de aplicaciones en el campo de la Ingeniería Civil, como también en otras ramas de la Ingeniería, por ejemplo, en la Ingeniería Ambiental, la Ingeniería Geológica y Minera, en la Gestión de Riesgos y Desastres, etc. Asimismo, uno de los usos más recientes y de mayor peso en la sociedad han sido los levantamientos fotogramétricos utilizando “drones.” De manera que, en el presente estudio se llevó a cabo una serie de procedimientos para analizar los resultados de este revolucionario método.

Para poder cumplir con los objetivos específicos, se realizaron tres levantamientos topográficos en una urbanización en proceso de construcción llamada “La Dignidad” situada en el Departamento de Escuintla. La urbanización consta de 1,000 casas, teniendo la obra una dimensión aproximadamente de 59 hectáreas en total, de las cuales, por cuestiones de derecho de paso, en el presente estudio solamente se utilizaron aproximadamente 9 hectáreas. Los tres levantamientos que se hicieron fueron los siguientes: 1) Levantamiento topográfico con drones y sin puntos georreferenciados; 2) Levantamiento topográfico con drones y con puntos georreferenciados; y 3) Levantamiento topográfico con estación total.

Respecto al primer levantamiento topográfico con el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados y sin puntos georreferenciados se utilizaron dos softwares para el procesamiento de datos, siendo estos: Agisoft Photoscan y PIX4D. Previamente, en el plan de vuelo se determinaron varias cuestiones importantes, como por ejemplo el GSD, el cual sería de 1.6 cm/pix, y la altura de vuelo, la cual sería de 70 metros. Estas características se pueden observar en el

Cuadro no. 8.

Posteriormente, una vez los softwares generaron los informes respectivos, estos se evaluaron con la finalidad de determinar la precisión final de los levantamientos topográficos. A continuación se iniciará con los resultados obtenidos del software Agisoft Photoscan.

En primer lugar se tienen los resultados de las posiciones de cámaras y el solapamiento de imágenes, como lo muestra la Figura No. 86. En esta figura se puede observar que el modelo tuvo, en su mayoría de área, más de 9 imágenes dentro de sus escenas. Teniendo un modelo con información suficiente para el procesamiento de datos.

Luego en el Cuadro No.9 se encuentran las características experimentales del levantamiento, en donde se puede observar lo siguiente: Que se obtuvieron 720 imágenes para el modelo, que se tuvo una altitud media de vuelo de 72.6 metros (que esto tuvo una variación con la altura teórica ya que el terreno no era totalmente plano), que se tuvo un GSD experimental de 1.55 cm/pix, que de 720 imágenes se alinearon en su totalidad las 720, que se encontraron 1,665,274 puntos 3D los cuales generaron 412,366 proyecciones, y que estas causaron que se tuviera un error de reproyección de 1.93 píxeles (siendo este muy alto para un levantamiento topográfico, ya que indica que la cámara no estaba correctamente calibrada).

En el Cuadro No. 10 se muestran los errores medios de las posiciones de la cámara utilizada. En el presente estudio se obtuvo un error en X de 39.56 centímetros, en Y de 39.27 centímetros, y en Z de 214.22 centímetros. Las incertidumbres se pueden observar gráficamente en la Figura No. 87, la cual muestra en qué áreas del modelo se produjeron mayores errores.

En segundo lugar, se tiene el informe generado por el software PIX4D, el cual se comparará con el informe anterior con la finalidad de determinar cuál de los dos es más apto para el procesamiento de datos según los resultados del levantamiento.

Dentro de la lista de detalles del informe se encuentran los siguientes: el modelo de la cámara que se utilizó, y el GSD que el programa determinó, siendo este de 1.59 cm/pix. Si se compara este resultado con el que se calculó anteriormente se puede ver que el mismo varía un poco. Esto se debe a que el terreno donde se realizó el estudio no era totalmente plano, causando que la distancia del terreno a la cámara sea mayor o menor a la distancia teórica y variando así el GSD. Generalmente, los terrenos no son totalmente planos, por lo que es correcto que se tenga un cierto rango en el GSD experimental. En consecuencia, el GSD que se obtuvo en el informe es una media de todas las imágenes tomadas.

Luego se tiene la revisión general del levantamiento, tal y como se muestra el Cuadro No. 11, en donde se pueden encontrar los datos más importantes a tomar en cuenta dentro del procesamiento de datos del estudio. El primer rubro de la tabla indica cuántos puntos clave ha encontrado el sistema por imagen. Estos puntos clave son las características de cada imagen, en el presente estudio se tienen aproximadamente 62,000 puntos clave por imagen. El número de puntos clave que se consiga por imagen, indicará qué tan buena resolución tienen las fotografías tomadas. Para una fotografía precisa es necesario obtener una cantidad mayor de 10,000 puntos clave.

En la segundo rubro se tiene la base de datos, esto se refiere a la cantidad de imágenes

que el software pudo calibrar, en otras palabras, cuántas imágenes se ha podido orientar correctamente. En este caso se obtuvo que de 720 imágenes se calibraron 720, es decir, el 100 % de las mismas. El tercer rubro indica la optimización de la cámara utilizada. Esta optimización describe la diferencia de los parámetros iniciales con los parámetros internos optimizados. Los parámetros de la cámara son: la dimensión del sensor, la distancia focal y las distorsiones concretas. El software al inicio, toma estos valores del tipo de cámara utilizada y las especificaciones que trae de fábrica. Sin embargo, la distancia focal nunca es igual a la teórica, puesto que existe una cierta tolerancia dentro de la producción de la cámara que hace que este valor varíe. Asimismo, las condiciones climáticas también pueden causar una diferencia entre los parámetros de la cámara. En el presente estudio se obtuvo una optimización de 1.11 % para obtener los parámetros reales, lo cual es aceptable para el procesamiento de datos.

En el cuarto rubro se obtiene el matching de fotografías. Esto quiere decir qué tantos puntos clave ha encontrado en dos o más imágenes diferentes. No basta, solamente encontrar muchos puntos clave, sino que realmente es necesario encontrar varios puntos clave en fotografías diferentes. De manera que, se obtuvo una media de 17,395.3 coincidencias que describen cómo las imágenes están sobrepuestas y de cómo estas están alineadas. Por último, se describe el rubro de georreferenciación, el cual describe qué tipo de método geodésico se utilizó en el levantamiento. En este caso, solamente se usó la georreferencia de los UAV's, dejando así aún lado, los puntos generados por GPS, como lo muestra el Cuadro No.11.

Finalmente, para evaluar la incertidumbre del presente levantamiento topográfico se analizó en el Cuadro No. 13. Se puede observar que se tuvo una desviación de posición de cámara en el eje X de 0.083 metros, en Y de 0.084 metros, y en Z de 0.136 metros; siendo Z el mayor error del primer vuelo. Generalmente, la elevación siempre tiende a ser menos precisa, puesto que, al estar todas las imágenes en el mismo plano es más difícil obtener la precisión concreta, utilizando solamente la georreferenciación del UAV.

Luego, se tiene la superposición, la cual ayuda a determinar si las escenas del modelo contienen suficientes imágenes para el procesamiento de datos, como lo muestra la Figura No.88. En el presente caso se puede observar que se tuvo un solapamiento casi del 100 %, ya que en la figura se observa que todo el modelo está de color verde, el cual significa que se tienen más de 5 imágenes sobrepuestas. En los únicos lugares que se tienen menos imágenes sobrepuestas son las zonas que están de color amarillo y rojo, las cuales consisten en las orillas del modelo. Estos resultados normalmente son de esta manera, ya que de las orillas no siempre se obtienen suficientes fotografías.

La cantidad de puntos clave dentro del levantamiento se puede observar en el Cuadro No. 12, el cual describe el número de puntos clave 2D, 3D y el error de proyección media del estudio. Para los puntos 2D encontrados, se obtuvieron 12,360,909 de puntos clave. Este dato se refiere a que dichos puntos se encontraron en más de dos imágenes. Para los puntos 3D encontrados, los cuales surgen a partir de los puntos 2D anteriormente descritos, se obtuvieron 3,740,013 de puntos clave. Estos resultados dependen directamente de la cantidad de fotografías, entre más fotografías se tengan mayor será el número de puntos 2D y 3D encontrados. Sin embargo, dichos puntos no afectan la resolución o calidad de imagen del modelo. De manera que, lo más importante en este cuadro es el error de reproyección, ya que dicho error es un buen indicador de la calidad de la calibración de la cámara. En el presente estudio se obtuvo un error de 0.128 píxeles. Este error se determina a partir de que

las fotos que contienen el mismo objeto en cada una, generan en cada imagen una dirección del objeto. Al momento de unir estas fotografías, se juntan los puntos 2D generando así el objeto 3D dentro del modelo. La acumulación de puntos 3D crea un punto medio, el cual, al compararlo con el punto inicial de cada imagen, se obtiene una cierta desviación. A esta desviación se le llama error de reproyección, y este parámetro ayuda a determinar el error del modelo sin necesidad de tener puntos de control.

Teniendo los informes de resultados de ambos softwares, se realizó el siguiente Cuadro No. 24, comparando así los errores, variaciones y precisiones del primer levantamiento topográfico sin el uso de puntos georreferenciados.

Dentro del cuadro se puede observar que la primera diferencia es en el GSD medio que se obtuvo, con Agisoft Photoscan se obtuvo un valor de 1.55 cm/pix, mientras que con PIX4D el valor obtenido fue de 1.59 cm/pix. El GSD teórico fue de 1.63 cm/pix. Por lo tanto, según los resultados se puede observar que el resultado obtenido por PIX4D está más apegado a la realidad, sin embargo, ambos valores son aceptables por ser menores a 5 cm/pix y por ser cercanos al valor teórico. Esta primera diferencia es consecuencia directa de la diferente determinación de altura de vuelo que los softwares generaron.

Luego se puede observar dentro de los puntos clave por foto que PIX4D utilizó una mayor cantidad que los usados por Agisoft Photoscan. Con esto se puede determinar que PIX4D obtuvo una mayor resolución en el modelo, y que esto se vió reflejado en el error de reproyección. PIX4D tuvo un error de 0.128 píxeles y Agisoft Photoscan de 1.93 píxeles.

Así mismo, para poder determinar finalmente que el presente modelo es el indicado para obtener una topografía precisa se deben de revisar las desviaciones que se obtuvieron en los ejes X, Y, y Z. Como muestra el Cuadro No. 24, con Agisoft Photoscan se obtuvo un error mayor de 2.14 metros en el eje Z y un error menor de 39.27 centímetros en el eje Y. Por otro lado, con PIX4D se obtuvo un error mayor de 13.6 centímetros en el eje Z y un error menor de 8.3 centímetros en el eje X. Con base a estos resultados, se puede establecer que el procesamiento de datos más certero fue el del software PIX4D. Sin embargo, cabe mencionar que utilizando dichos resultados en el levantamiento topográfico no se generaría un modelo preciso, ya que 13 centímetros de error es un valor muy alto respecto a las mediciones. Este valor no despreciable es consecuencia directa del sistema geodésico utilizado, por lo que, se realizó el siguiente levantamiento topográfico con drones y puntos georreferenciados.

Respecto al segundo levantamiento topográfico con el uso de Vehículos Aéreos No Tripulados y con puntos georreferenciados, las características del mismo se muestran en el Cuadro No. 14. En este cuadro se puede observar que se tuvo como altura media de vuelo 70 metros, un GSD de 1.63 cm/pix, y un área de 8.90 hectáreas. Para el procesamiento de datos se utilizaron los mismos dos softwares: Agisoft Photoscan y PIX4D.

Entre los resultados obtenidos por Agisoft Photoscan se tiene el primer parámetro que fue las posiciones de cámara y solapamiento de imágenes, como se muestra en la Figura No. 89. Aquí se puede observar que el modelo tiene suficiente cantidad de información para el procesamiento de datos. De manera que, se procedió a la siguiente etapa.

El segundo parámetro son las características experimentales del levantamiento, las cuales se pueden observar en el Cuadro No. 15. En el modelo se obtuvo un GSD experimental de 1.56 cm/pix, por lo que, teniendo en cuenta que este valor generalmente no es exacto con el teórico

de 1.63 cm/pix, se tomó como válido. Por otro lado, se encontraron 2,704,025 de puntos 3D, de los cuales surgieron 435,766 proyecciones que causaron un error de reproyección de 0.602 píxeles. Al ser este error bastante bajo se obtiene una buena calidad de imagen dentro del modelo.

El tercer parámetro fue las posiciones de cámara y estimadores de error, el cual se muestra en la Figura no. 90. Aquí se pueden observar las desviaciones que tuvieron las posiciones de la cámara al momento de realizar el levantamiento topográfico. En el Cuadro no. 16. se puede observar que se obtuvo un error medio en el eje X de 39.56 centímetros, en eje Y de 39.27 centímetros, y en eje Z de 2.14 metros. Estos resultados son bastante altos, por lo que causa que se tenga una mala precisión en las mediciones.

No obstante, este error se corrigió con el uso de puntos de control que se muestran en el Cuadro No. 17. En este cuadro se puede observar que el error de desviación se corrigió notablemente, teniendo así un error en X de 2.56 centímetros, en Y de 4.29 centímetros y en Z de 6.25 centímetros. Siendo estos errores más precisos a los resultados obtenidos por el solo uso de la georreferenciación de los drones.

Por consiguiente, en los resultados obtenidos en el informe generado por el software PIX4D, se tiene la revisión general, como se muestra en el Cuadro No. 18. En el primer rubro se puede observar que se obtuvo una media de 62,387 puntos clave por imagen. En el segundo rubro se describe la base de datos en la cual obtuvo un 100 % en la calibración de fotografías. Luego, en el tercer rubro se indica la optimización de cámara en la cual se obtuvo un 7.59 % de diferencia relativa respecto a la optimización inicial y la optimización interna de la cámara. Al este porcentaje muy alto para el estudio se tuvo que analizar la causa que lo origino, la cual se explicará más adelante.

Por último, en el cuarto rubro se obtuvo una media de 17,394.9 de puntos clave de coincidencias de imágenes pre calibradas, y en el quinto rubro que indica la revisión georreferenciada para este levantamiento, muestra que se usó tanto el sistema geodésicos del los UAV's, como también 7 puntos de control tomados con equipo GPS RTK.

Dentro del numero de imágenes sobrepuestas en la Figura no. 91 se muestra que el modelo tuvo una recaudación de imágenes del 100 %. De manera que se considera apto para el procesamiento de datos. Las orillas del modelo que representan áreas en donde no hay suficiente información para el procesamiento, las cuales constan de colores amarillos y rojos, se eliminaron con la finalidad de dejar solamente el área verde.

El modelo obtuvo un número total de puntos clave 2D de 12,360,271, y un número total de puntos clave 3D de 3,739,862. Como se muestra en el Cuadro No. 19. Esto genera un modelo bastante alto respecto a la calidad de imagen, ya que entre mayor cantidad de puntos clave se encuentren, mejor será la resolución del modelo. Los puntos 3D obtenidos causaron que el error medio de reproyección fuera de 0.130, de manera que, por ser este menor a 1 se considera que el modelo es preciso respecto a la orientación de las imágenes tomadas.

Al analizar los detalles geodésicos de este procedimiento, con el uso del Cuadro No. 20 se puede observar que se obtuvo una desviación media en X de 0.053 centímetros, en Y de 0.027 centímetros, y en Z de 0.15 centímetros. Siendo este el levantamiento topográfico más preciso en comparación a los anteriores. De modo que, al ser el más preciso, se procedió a la generación de malla texturizada como se muestra en la Figura No. 94, el modelo de elevación

detallada en la Figura No.95, el modelo de elevación del perfil del terreno en la Figura No. 96, las curvas de nivel en la Figura No. 97, y la ortomosaico del proyecto en la Figura No. 98.

Por último, respecto al tercer levantamiento topográfico con el uso de la estación total marca Gorwin se obtuvieron las siguientes características, las cuales se muestran en el Cuadro No. 23. Aquí se puede observar que el modelo del equipo utilizado fue ZTS-320/R, que el estudio tuvo una dimensión de 8.90 hectáreas, que la duración del trabajo de campo fue de 5 horas, y que el equipo tomó 475 puntos clave.

Con el tercer levantamiento se generó la nube de puntos en Civil Cad, como se puede ver en la Figura No.99. Con esto se realizó la ubicación de la nube de puntos y por último sus curvas de nivel. Dentro de las curvas de nivel, mostradas en la Figura No. 101, se puede observar que las mismas tuvieron unas ciertas irregularidades, debido a que los puntos que se tomaron con la estación total fueron tomando en cuenta área de construcción existente en el terreno.

Finalmente, en el Cuadro No. 25, se encuentra la comparación de resultados del levantamiento fotogramétrico con puntos geodésicos procesados en dos softwares diferentes con el levantamiento generado con la estación total. En el se puede observar que el GSD generado por Agisoft Photoscan fue de 1.56 cm/pix, y que el generado por PIX4D de 1.61 cm/pix. Lo cual, para este estudio fue más cercano al valor teórico de 1.63 cm/pix el dato obtenido con PIX4D.

Como segundo parámetro se tiene un número de puntos por imagen, Agisoft Photoscan obtuvo 50,000 puntos clave por imagen, PIX4D obtuvo 62,387 puntos clave por imagen, y por otro lado, la estación total obtuvo 450 puntos clave dentro del terreno. Por lo tanto, el mayor número de puntos se obtuvo con PIX4D. Estos puntos ayudan a tener mayor detalle del terreno y por ende mayor resolución de imagen.

Respecto al error de reproyección, con Agisoft Photoscan se obtuvo un error de 0.602 píxeles, y con PIX4D un error de 0.130 píxeles. Lo cual, PIX4D brinda una mayor orientación en las fotografías del estudio. Esta diferencia en el error fue causada por la cantidad de puntos clave obtenidos, ya que, entre mayor es el número de puntos clave, menor es el error de reproyección.

El siguiente parámetro de comparación es la desviación en los ejes. Agisoft Photoscan obtuvo una desviación mayor de 6.25 centímetros en el eje Z, y una desviación menor de 2.56 centímetros en el eje X. En cambio, con PIX4D se obtuvo una desviación mayor de 0.15 centímetros en el eje Z, y una desviación menor de 0.027 centímetros en el eje Y. Por otro lado, la estación total obtuvo una desviación mayor de 0.24 centímetros en el eje X y en el eje Y, y una desviación menor de 0.21 centímetros en el eje Z.

Tomando en cuenta los resultados obtenidos en el levantamiento topográfico sin el uso de puntos georreferenciados y el levantamiento topográfico con el uso de puntos georreferenciados, se puede establecer que se tiene una notable mejoría respecto a la precisión topográfica cuando se utilizan puntos de referencia. Esto fue así porque se tiene un porcentaje de variación de aproximadamente del 100% en la precisión del estudio, como se puede observar en el Cuadro No. 26. De manera que, se demuestra que los Vehículos Aéreos No Tripulados aún carecen de una georreferencia precisa.

En cuanto a los softwares utilizados, se puede observar que PIX4D obtuvo los mejores resultados entre los levantamientos. Esto fue así ya que, el software PIX4D tiene en sus configuraciones una herramienta de optimización de la cámara, mientras Agisoft Photoscan no posee tal extremo, como se ve reflejado en el Cuadro No. 18. Generalmente, los levantamientos fotogramétricos contienen un porcentaje de optimización de cámara menor al 2%. Sin embargo, en el presente estudio y tal como se puede observar en el cuadro, PIX4D tuvo una optimización de cámara de 7.59%. Este dato no implica que el procesamiento de datos sea incorrecto, sino que, los parámetros de la cámara se vieron afectados por las condiciones climáticas del lugar en donde se llevó a cabo el estudio. En el presente caso esta circunstancia fue la que afectó, ya que el levantamiento se realizó en una zona costera, y la temperatura en el lugar era de aproximadamente de 30 grados Celsius, causando así que la distancia focal de la cámara tuviera una diferencia notable. Por lo tanto, PIX4D por tomar en cuenta esta variable, lo vuelve la mejor opción para la generación de levantamientos topográficos precisos.

Por último, en el Cuadro No. 27 se pueden observar los porcentajes de variación de la topografía moderna con el uso de drones respecto a la topografía tradicional con el uso de la estación total. En este cuadro se muestra que la topografía moderna tuvo una variación del 84% de mejoría en el eje X, 92% de mejoría en el eje Y, 52% de mejoría en el eje Z, y 92% de mejoría en el tiempo del estudio. Esto demuestra que no solamente el levantamiento topográfico moderno fue más preciso, sino que además es más eficiente, ya que el usuario se tarda menos tiempo al momento de realizar el trabajo de campo. Este factor tiempo es importante hoy en día, ya que la gestión del tiempo es uno de los principales pilares de la productividad en los negocios.





- Según en la investigación hecha respecto a la regulación en Guatemala sobre los Vehículos Aéreos No Tripulados, también conocidos como UAVs (Unmanned Aerial Vehicles, por sus siglas en Inglés), se concluye que de conformidad con el “RAC 101: Regulación sobre Aeronaves No Tripuladas, Aeronaves de Modelismo y Fuegos Artificiales”, es necesario registrar el equipo aéreo en la Dirección General de Aeronáutica Civil de Guatemala (DGAC), antes de llevar a cabo cualquier práctica con los mismos. Además, es muy importante leer, entender y cumplir dicha regulación nacional ya que en ella se establecen ciertos límites, parámetros y condiciones que los usuarios deben respetar al momento de volar los drones, con el fin de evitar una posible sanción administrativa.
- Según a los resultados en el Cuadro No. 26, se establece que para obtener una precisión adecuada y satisfactoria al realizar un levantamiento topográfico es imprescindible el uso de puntos georreferenciados por medio de equipo GPS RTK, ya que la georreferenciación de los Vehículos Aéreos No Tripulados utilizados no brindan exactitud, certeza y por ende confianza en los resultados conseguidos.
- Los levantamientos fotogramétricos llevados a cabo en el presente estudio brindan una calidad muy alta en la resolución de las imágenes del modelo digital, esto debido a que los errores de reproyección obtenidos en los mismos no fueron mayores a 1 pixel. Dichos errores fueron mínimos porque la cámara utilizada dentro del estudio posee una gran cantidad de pixeles por fotografía. Causando que el procesamiento de datos sea apto para la creación de modelos tridimensionales del terreno (malla texturizada, modelo de elevación y ortomosaico).
- PIX4D, el software utilizado, obtuvo los resultados más precisos, tal y como se muestran en el Cuadro No. 25. De manera que para este estudio, fue el mejor programa para llevar a cabo la fase de procesamiento de datos de los levantamientos topográficos con uso de Vehículos Aéreos No Tripulados utilizando puntos georreferenciados. Por el contrario, la mayor carencia del software Agisoft Photoscan fue la falta de la optimización de cámara dentro del procesamiento de datos. georreferenciados.

- El eje con mayor desviación geodésica fue el eje Z, también llamado eje de elevación, dentro de los dos levantamientos fotogramétricos como lo muestra el Cuadro No. 24, ya que al tomar las imágenes con la cámara sin inclinación alguna, este realiza el estudio en una superficie plana. Sin embargo, el uso de los puntos geodésicos corrigió notablemente el error, como se observa en el Cuadro No. 25, debido que el equipo GPS RTK utilizado, tomó en cuenta las diferencias de alturas de los puntos de control. Además, de mejorar la eficiencia del trabajo de campo y la precisión de los resultados del levantamiento topográfico antiguo como se muestra en el Cuadro No. 27.

- Para la obtención de un preciso levantamiento topográfico con uso de drones y puntos georreferenciados, se recomienda utilizar más de 10 puntos de control en el terreno de estudio, y para el proceso de medición de puntos GPS, tener como mínimo 15 minutos de duración, por cada uno, para la correcta recepción de puntos GPS.
- Dentro de la fase de procesamiento de datos, se recomienda utilizar un software que tome en cuenta la optimización de cámara en sus procesos. Esta herramienta es importante porque corrige errores de fábrica de la cámara utilizada, así como también toma en cuenta los errores generados por las características físicas (por ejemplo, la distancia focal) de la cámara alteradas y modificadas por las condiciones climáticas del lugar.
- Para llevar a cabo un procesamiento de datos más eficiente se recomienda que al momento de extraer las imágenes del drone, se efectúe por medio de un disco duro externo al del ordenador, ya que, por ser las fotografías muy pesadas, la computadora se vuelve más tardada si se tienen las imágenes almacenadas en el disco duro interno de la misma.
- Se recomienda dentro de la planificación del levantamiento fotogramétrico con el uso de drones, delimitar el área de vuelo más allá de los límites de interés para así, poder tener un traslape de imágenes libre de distorsiones y ser adecuadas para el modelo topográfico.
- Se recomienda realizar un procesamiento de datos con características y detalles de estándar bajo previo al procesamiento de datos final, ya que la ejecución del modelo y la identificación de errores dentro del mismo serán más eficientes a la hora que sea necesario que se repita el estudio.
- Por último, se debe de tener en cuenta que para un levantamiento fotogramétrico ideal, es preferible que la toma de fotografías aéreas se lleve a cabo de las 10:00 a.m. hasta las 2 p.m., con la finalidad de evitar que algún objeto cause sombra en la toma de imágenes aéreas por la inclinación de la luz solar. Así mismo se recomienda trabajar en este lapso de tiempo para aprovechar la claridad del día y así, no tener problemas de visión a la hora de generar el modelo digital.

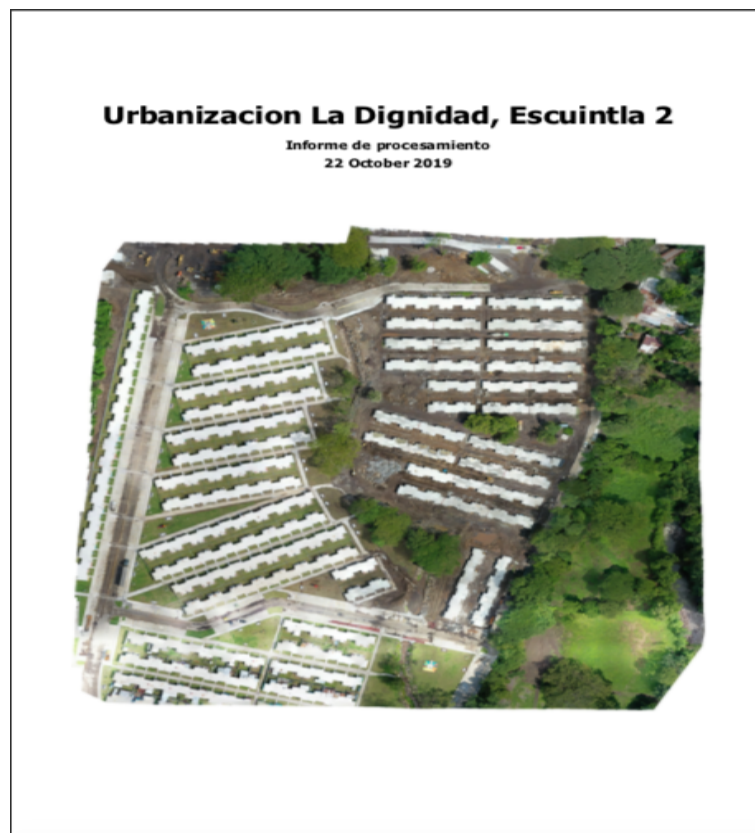


- 
- [1] F. García Márquez, *Curso Básico De Topografía*, Á. E. S.A, ed. México D.F., 1994, pág. 308, ISBN: 9684610033.
  - [2] R. E. M. Morales, *Texto para el curso de topografía I*, Guatemala.
  - [3] J. C. Castro-Moreira I y M. A. Vélez-Gilces II, “La importancia de la topografía en las ingenierías y arquitectura,” vol. 2, n.º 7, págs. 1071-1081, 2017. DOI: 10.23857/pc.v2i7.331. dirección: <http://polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es>.
  - [4] Rae, *planimetría / Definición de planimetría - «Diccionario de la lengua española» - Edición del Tricentenario*, 2019. dirección: <https://dle.rae.es/?id=TK9E54o> (visitado 20-09-2019).
  - [5] J. McCormac, *Topografía*, 526.9 M131t. México, MX: Limusa: Wiley, 2008.
  - [6] J. Urrutia, *Qué son los mapas topográficos / AristaSur*, 2019. dirección: <https://www.aristasur.com/contenido/que-son-los-mapas-topograficos> (visitado 20-09-2019).
  - [7] IGN, “Conceptos cartográficos,” *IGN & UPM-LatinGEO (Spain)*, vol. 1st, pág. 21, 2014, ISSN: 0036-8075. DOI: 10.1126/science.260.5109.794. dirección: [http://www.ign.es/web/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos%7B%5C\\_%7DCartograficos%7B%5C\\_%7Ddef.pdf](http://www.ign.es/web/resources/cartografiaEnsenanza/conceptosCarto/descargas/Conceptos%7B%5C_%7DCartograficos%7B%5C_%7Ddef.pdf).
  - [8] Academico, *Académico: Agrimensura y Topografía*, 2017. dirección: <http://ingenieria.uprm.edu/inci/mod/page/view.php?id=56> (visitado 20-09-2019).
  - [9] I. A. Luis Estrada José Sosa Gómez Mg Ing Roberto Corbella, “Universidad Nacional De Tucuman Contenido De La Asignatura,” pág. 92, 2012. dirección: <https://catedras.facet.unt.edu.ar/geofisica/wp-content/uploads/sites/4/2014/02/Geofisica-y-Geomorfologia.pdf>.
  - [10] I. Ibero, “Teoría-Geodesia,” vol. 1st, pág. 43, 2013. dirección: <http://www.ign.es>.
  - [11] A. Figueredo Morales, “Sistema de coordenadas geográficas utilizados en Colombia,” vol. 1st. 2015.
  - [12] J. Santamaría Peña, *La cartografía y las proyecciones cartográficas*, 1st, Universidad De La Rioja, ed. Madrid, 1998, ISBN: 84-930087-0-2.

- [13] J. Moises AJ, *Sistema de proyección gtm*, 2015. dirección: <https://es.slideshare.net/josemoisesaj/sistema-de-proyeccion-gtm> (visitado 20-09-2019).
- [14] E. Quirós, *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*, Universidad De Extremadura, ed. Cáceres, 2014, pág. 129, ISBN: 9788469713174.
- [15] CEFOCCA-UNSJ, “Fotogrametría,” págs. 1-15, 2016.
- [16] E. Soler Aleman, “Levantamiento Fotogramétrico y Modelización Tridimensional del Santuario De Nuestra Señora De La Fuensanta,” vol. 1st, 2013.
- [17] A. Bannister y S. Raymond, *Técnicas Modernas En Topografía*, México D.F., 1987.
- [18] J. A. Arévalo Valdéz, “Diseño De La Línea Pelo a Tierra o Preliminar De Caminos y Carreteras a Partir De La Información De Fotografías Aéreas Aplicando Fotogrametría,” vol. 1st, 2008.
- [19] K. Hori y A. Sakajiri, “La Cámara Fotogramétrica,” vol. 1st, 2010.
- [20] L. García, “Drones, el cielo está al alcance de todos,” vol. 1ST, pág. 65, 2017. dirección: [https://www.edubcn.cat/rcs%7B%5C\\_%7Dgene/treballs%7B%5C\\_%7Drecerca/2015-2016-03-1-TR.pdf](https://www.edubcn.cat/rcs%7B%5C_%7Dgene/treballs%7B%5C_%7Drecerca/2015-2016-03-1-TR.pdf).
- [21] Anónimo, *Drones*, 2015. dirección: <http://www.dgac.gob.gt/index.php/drones> (visitado 02-10-2019).
- [22] J. A. Pérez Álvarez, “Apuntes de Fotogrametría III,” vol. 1st, pág. 246, 2001.
- [23] Anónimo, *Agisoft Photoscan*, 2006. dirección: <https://www.agisoft.com/features/professional-edition/> (visitado 02-10-2019).
- [24] —, *Pix4Dmapper: professional drone mapping and photogrammetry software | Pix4D*, 2011. dirección: <https://www.pix4d.com/product/pix4dmapper-photogrammetry-software> (visitado 02-10-2019).
- [25] —, *Plataforma de mapeo de drones y UAV | DroneDeploy*, 2013. dirección: <https://www.dronedeploy.com/> (visitado 02-10-2019).
- [26] Autodesk, *ReCap Características | Funciones del software de escaneo 3D | Autodesk*, 2011. dirección: <https://www.autodesk.com/products/recap/features> (visitado 02-10-2019).
- [27] D. G. d. A. C. de Guatemala, “Sistema de Revisiones,”

## A. Informes levantamiento topográfico sin puntos GPS

### 1. Agisoft photoscan





## Datos del levantamiento

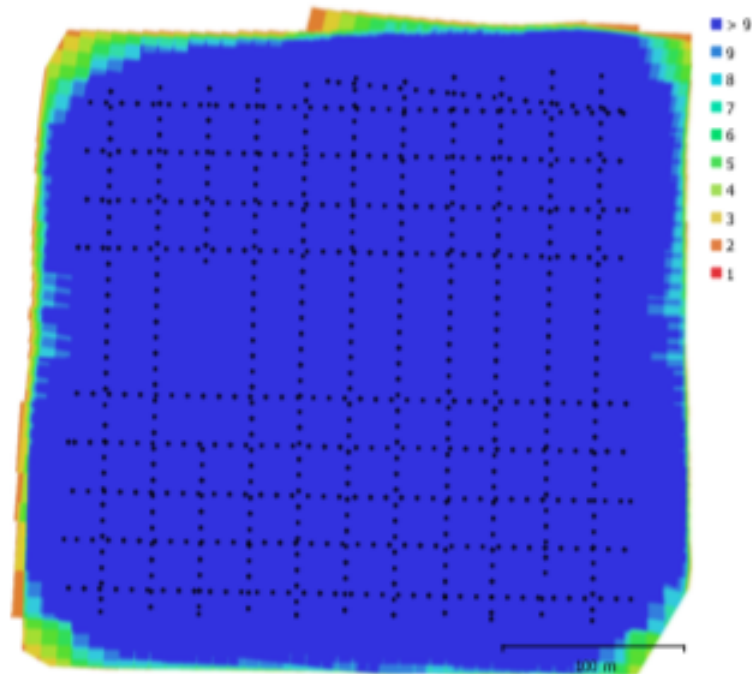


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 720	Imágenes alineadas: 720
Altitud media de vuelo: 72.6 m	Puntos de paso: 412,366
Resolución en terreno: 1.55 cm/pix	Proyecciones: 1,625,274
Área cubierta: 0.13 km <sup>2</sup>	Error de reproyección: 1.93 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
L1D-20c (10.26mm)	5472 x 3648	10.26 mm	2.41 x 2.41 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

## Calibración de cámara

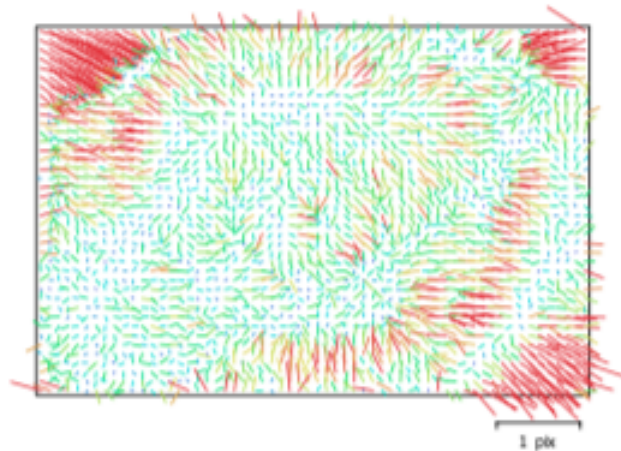


Fig. 2. Gráfico de residuos para L1D-20c (10.26mm).

### L1D-20c (10.26mm)

720 imágenes, rolling-shutter

Tipo **Cuadro**      Resolución **5472 x 3648**      Distancia focal **10.26 mm**      Tamaño de píxel **2.41 x 2.41 micras**

	Valor	Error	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	P1	P2
<b>F</b>	<b>4256</b>										
<b>Cx</b>	<b>-28.052</b>	0.065	1.00	-0.01	-0.05	-0.23	-0.05	0.01	-0.02	0.66	-0.03
<b>Cy</b>	<b>-66.765</b>	0.099		1.00	0.20	-0.02	-0.05	-0.02	0.02	0.02	0.47
<b>B1</b>	<b>-8.56158</b>	0.0092			1.00	-0.01	-0.03	-0.03	0.05	-0.05	0.10
<b>B2</b>	<b>0.643229</b>	0.0087				1.00	-0.05	-0.01	0.00	-0.13	-0.06
<b>K1</b>	<b>0.00890426</b>	0.0015					1.00	-0.40	0.38	-0.34	0.45
<b>K2</b>	<b>0.0218123</b>	0.0028						1.00	-0.98	-0.00	0.04
<b>K3</b>	<b>-0.022592</b>	0.0033							1.00	-0.01	-0.03
<b>P1</b>	<b>-0.00159356</b>	4.8e-006								1.00	-0.20
<b>P2</b>	<b>-0.00382091</b>	4.1e-006									1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

## Posiciones de cámaras

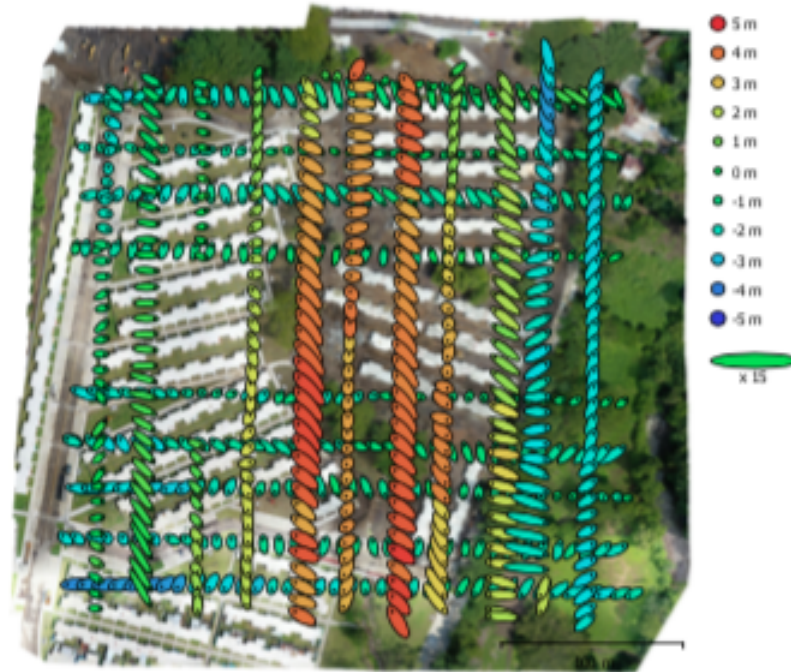


Fig. 3. Posiciones de cámaras y estimadores de error.

El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.  
Posiciones estimadas de las cámaras se indican con los puntos negros.

Error en X (m)	Error en Y (m)	Error en Z (m)	Error en XY (m)	Error combinado (m)
0.395673	0.392756	2.1422	0.557507	2.21355

Tabla 3. Errores medios de las posiciones de cámaras.  
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

## Modelo digital de elevaciones

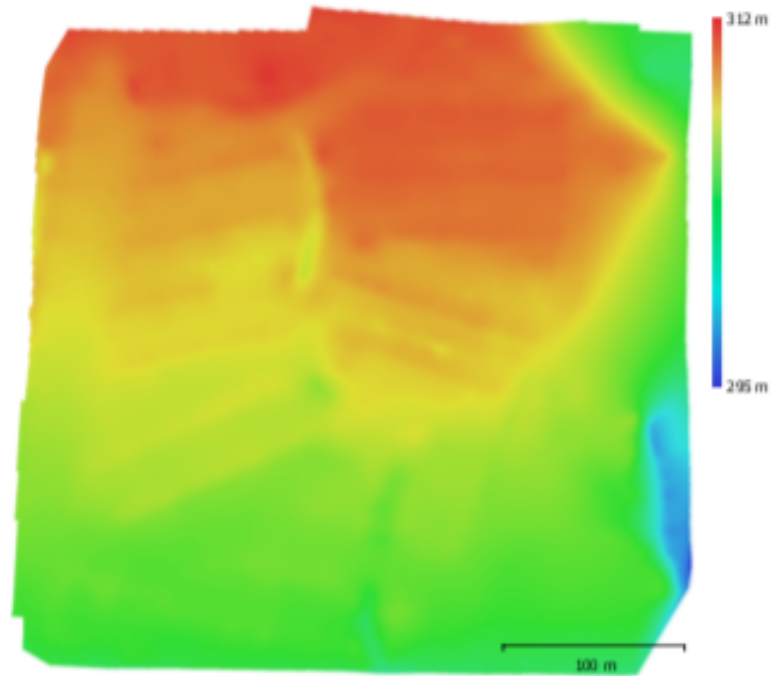


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 12.4 cm/pix  
Densidad de puntos: 65 puntos/m<sup>2</sup>

# Parámetros de procesamiento

<b>Generales</b>	
Cámaras	720
Cámaras orientadas	720
<b>Formas</b>	
Políneas	69
Polígonos	35
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG:32615)
Ángulo de rotación	Guñada, cabeceo, alabeo
<b>Nube de puntos</b>	
Puntos	412,366 de 463,307
RMS error de reproyección	0.121928 (1.92834 pix)
Error de reproyección máximo	0.466822 (52.1635 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	14.1407 pix
Colores de puntos	3 bandas, uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	4.62656
<b>Parámetros de orientación</b>	
Predión	Baja
Pre-selección genérica	Sí
Pre-selección de referencia	No
Puntos claves por foto	50,000
Puntos de paso por foto	4,000
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de emparejamientos	4 minutos 7 segundos
Tiempo de orientación	11 minutos 31 segundos
<b>Parámetros de optimización</b>	
Parámetros	b1, b2, cx, cy, k1-k3, p1, p2
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo de optimización	19 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097
<b>Mapas de profundidad</b>	
Número	720
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Baja
Nivel de filtrado	Leve
Tiempo de procesamiento	17 minutos 33 segundos
<b>Nube de puntos densa</b>	
Puntos	12,330,237
Colores de puntos	3 bandas, uint8
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Baja
Nivel de filtrado	Leve
Tiempo de procesamiento	17 minutos 33 segundos
<b>Parámetros de generación de la nube densa</b>	
Tiempo de procesamiento	19 minutos 25 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097
<b>Modelo</b>	
Caras	44,814
Vértices	23,342
Colores de vértices	3 bandas, uint8

**Generales****Parámetros de obtención de mapas de profundidad**

Calidad	Baja
Nivel de filtrado	Leve
Tiempo de procesamiento	17 minutos 33 segundos

**Parámetros de reconstrucción**

Tipo de superficie	Bajorelieve / terreno
Datos fuente	Nube de puntos densa
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	23 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

**Modelo digital de elevaciones**

Tamaño	5,131 x 5,216
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG:32615)

**Parámetros de reconstrucción**

Datos fuente	Maía
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	25 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

**Ortomosaico**

Tamaño	24,287 x 23,927
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG:32615)
Colores	3 bandas, uint8

**Parámetros de reconstrucción**

Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Tiempo de procesamiento	23 minutos 34 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097

**Software**



Versión	1.5.5 build 9097
Plataforma	Windows 64


## 2. PIX4D

### Quality Report

Generated with PIX4Dmapper version 4.4.12

**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	FSGHSGHS
Processed	2019-10-10 13:32:36
Camera Model Name(s)	L1D-20c_10.3_5472x3648 (DK8TG7D0121545) (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.59 cm / 0.63 in
Area Covered	0.125 km <sup>2</sup> / 12.4981 ha / 0.05 sq. mi. / 30.8996 acres
Time for Initial Processing (without report)	01h:41m:53s

#### Quality Check

 Images	median of 62387 keypoints per image	
 Dataset	720 out of 720 images calibrated (100%), all images enabled	
 Camera Optimization	1.11% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
 Matching	median of 17396.3 matches per calibrated image	
 Georeferencing	yes, no 3D GCP	

#### Preview



Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details



Number of Calibrated Images	720 out of 720
Number of Geolocated Images	720 out of 720

### Initial Image Positions

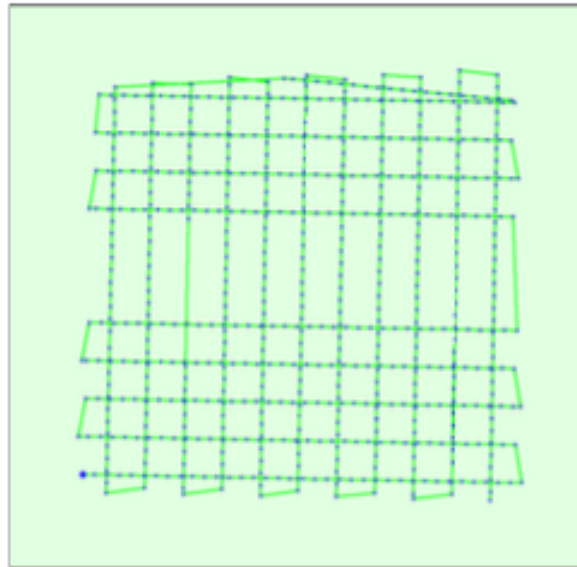
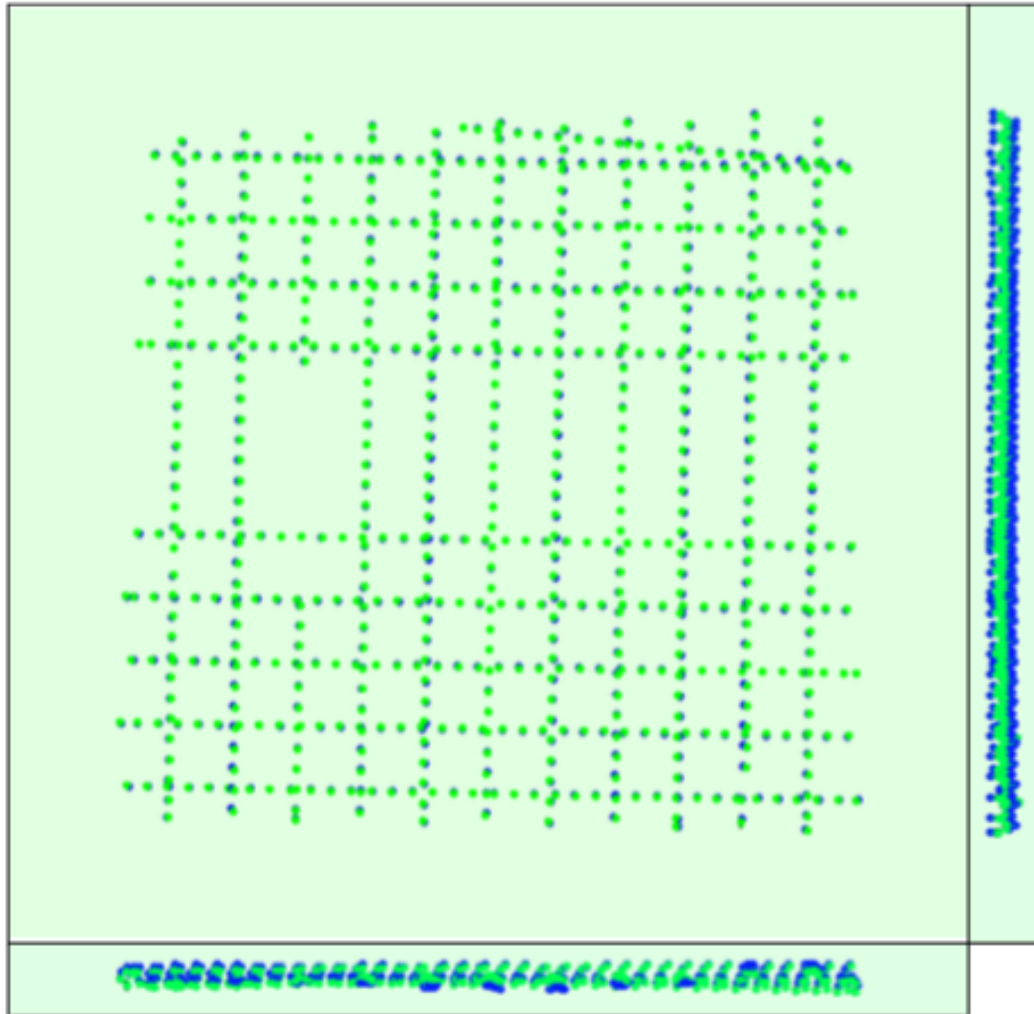


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

### Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions







Uncertainty ellipses 10x 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). 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	0.083	0.084	0.136	0.043	0.042	0.024	0.003	0.003	0.015
Sigma	0.014	0.014	0.011	0.009	0.009	0.000	0.001	0.001	0.006

### 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

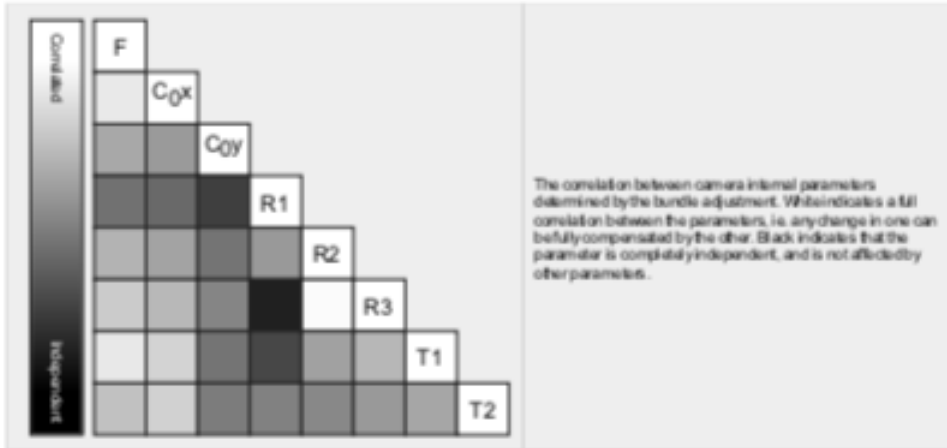
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	12360909
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3740013
Mean Reprojection Error [pixels]	0.128

### Internal Camera Parameters

L1D-20c\_10.3\_5472x3648 (0K8TG7D0121545) (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	4420.959 [pixel] 10.362 [mm]	2705.618 [pixel] 6.341 [mm]	1756.184 [pixel] 4.116 [mm]	0.013	0.027	-0.031	-0.004	-0.002
Uncertainties (Sigma)	12.685 [pixel] 0.030 [mm]	0.261 [pixel] 0.001 [mm]	0.612 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000



### 2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per image	Number of Matched 2D Keypoints per image
Median	62387	17395
Min	37341	3306
Max	82340	29212
Mean	62485	17198

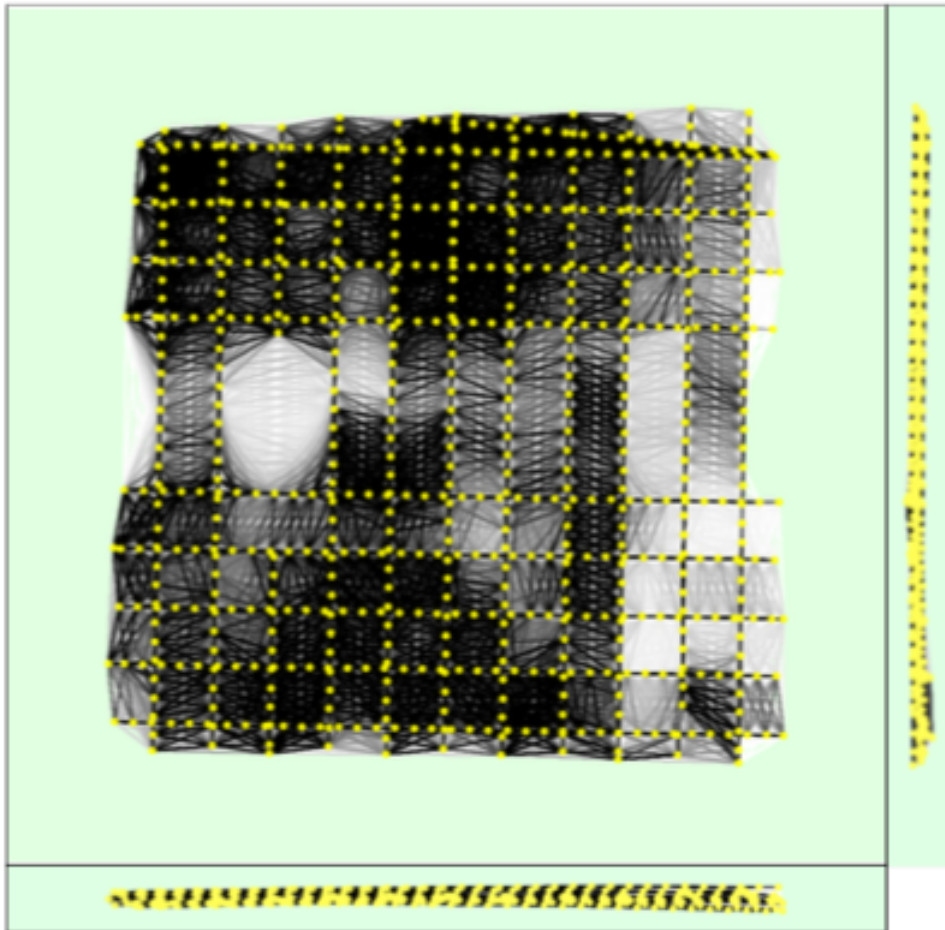
### 3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In2 Images	2109198
In3 Images	715973
In4 Images	340679
In5 Images	188876
In6 Images	119924
In7 Images	75434
In8 Images	39772
In9 Images	28899
In10 Images	22294
In11 Images	17212
In12 Images	13044
In13 Images	11261
In14 Images	8955
In15 Images	6946
In16 Images	5598
In17 Images	4772
In18 Images	4232
In19 Images	3557
In20 Images	3005
In21 Images	2664
In22 Images	1983
In23 Images	1755

In24 Images	1626
In25 Images	1439
In26 Images	1381
In27 Images	1190
In28 Images	1008
In29 Images	890
In30 Images	800
In31 Images	702
In32 Images	661
In33 Images	599
In34 Images	482
In35 Images	470
In36 Images	404
In37 Images	349
In38 Images	297
In39 Images	215
In40 Images	172
In41 Images	151
In42 Images	148
In43 Images	98
In44 Images	42
In45 Images	32
In46 Images	36
In47 Images	20
In48 Images	21
In49 Images	16
In50 Images	10
In51 Images	4
In52 Images	7
In53 Images	3
In54 Images	5
In55 Images	2

2D Keypoint Matches





Number of matches: 25 222 444 666 888 1111 1333 1555 1777 2000

Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The thickness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual fix points or more images.

## Geolocation Details

### 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	0.00	16.81
-3.00	0.00	55.42	49.44	20.28
0.00	3.00	44.58	50.56	57.22
3.00	6.00	0.00	0.00	5.89
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
<b>Mean [m]</b>		0.000000	0.000003	0.000440
<b>Sigma [m]</b>		0.414627	0.419140	2.405069
<b>RMS Error [m]</b>		0.414627	0.419140	2.405069

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between 4.5 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.

### 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
<b>Mean of Geolocation Accuracy [m]</b>	5.000000	5.000000	10.000000
<b>Sigma of Geolocation Accuracy [m]</b>	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	1.281
Phi	1.225
Kappa	4.230

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

### Rolling Shutter Statistics

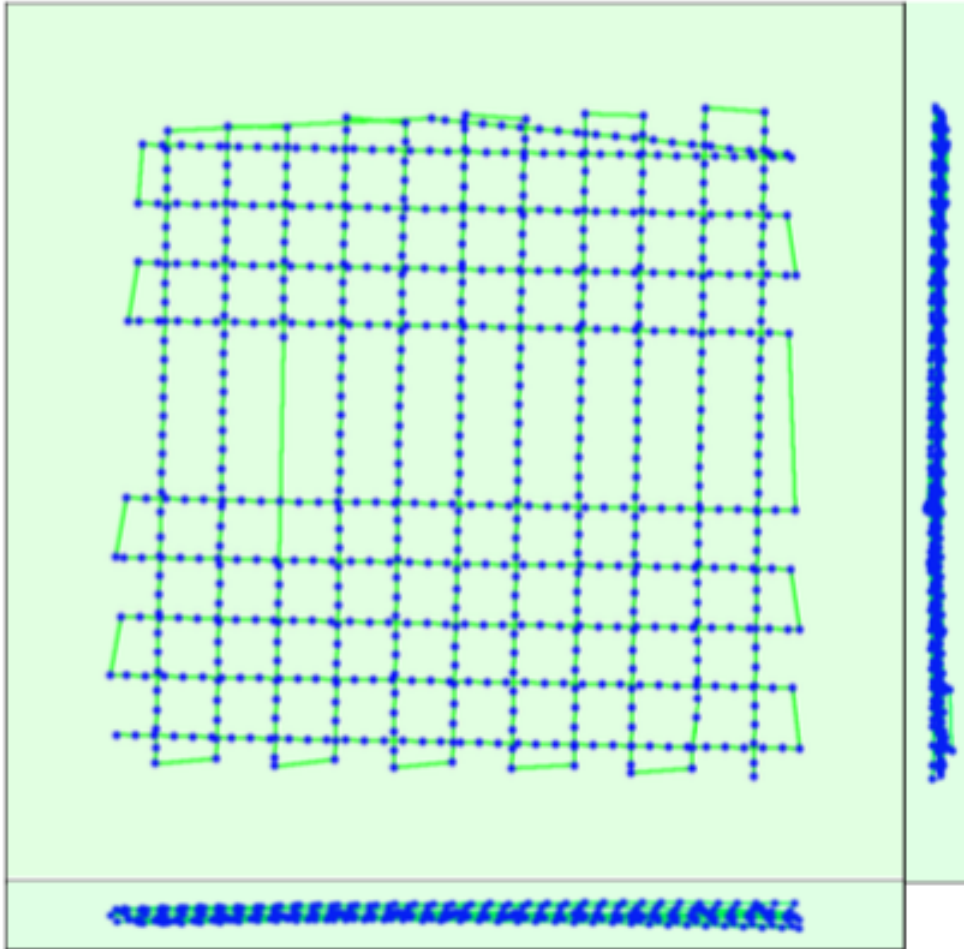


Figure 6: Camera movement estimated by the rolling shutter camera model. The green line follows the computed image positions. The blue dots represent the camera position at the start of the exposures. The blue lines represent the camera motion during the rolling shutter readout, re-scaled by a project dependent scaling factor for better visibility.

Median Camera Speed	2.1396 [m/s]
Median Camera Displacement During Sensor Readout	0.1821 [m]
Median Rolling Shutter Readout Time	88.9854 [ms]

## Initial Processing Details

### System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz RAM: 16GB GPU: NVIDIA GeForce GTX 1070 (Driver: 361.21_14.3.153), Intel(R) HD Graphics 530 (Driver: 20.19.15.4649)
Operating System	Windows 10 Home, 64-bit

### Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS84 (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS84 / UTM Zone 15N (EGM96 Geoid)

## B. Informes levantamiento topográfico con puntos GPS

### 1. Agisoft photoscan

---

#### **Urbanizacion La Dignidad, Escuintla Final**

Informe de procesamiento  
22 October 2019





## Datos del levantamiento

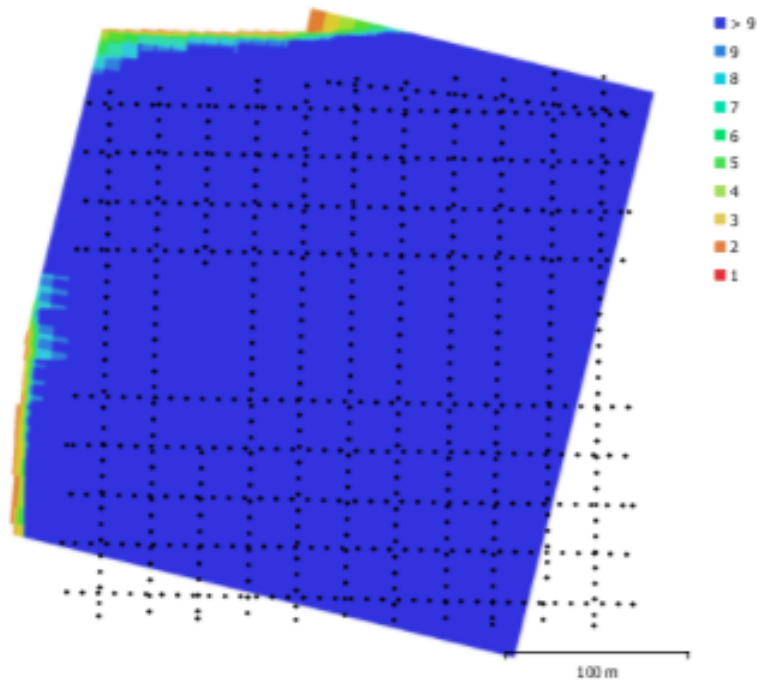


Fig. 1. Posiciones de cámaras y solapamiento de imágenes.

Número de imágenes: 720	Imágenes alineadas: 720
Altitud media de vuelo: 75 m	Puntos de paso: 435,766
Resolución en terreno: 1.56 cm/pix	Proyecciones: 2,704,025
Área cubierta: 0.093 km <sup>2</sup>	Error de reproyección: 0.602 pix

Modelo de cámara	Resolución	Distancia focal	Tamaño de píxel	Precalibrada
L1D-20c (10.26mm)	5472 x 3648	10.26 mm	2.41 x 2.41 micras	No

Tabla 1. Cámaras.

## Calibración de cámara

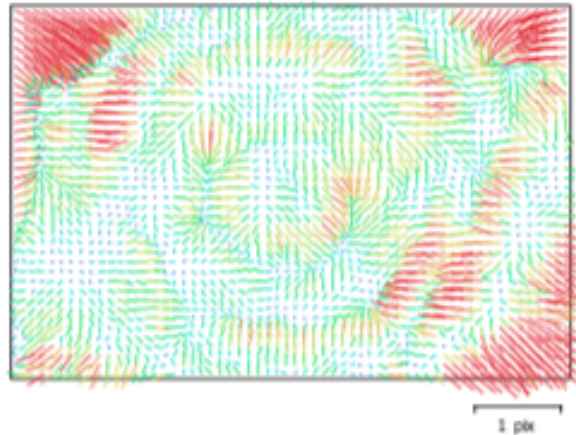


Fig. 2. Gráfico de residuales para L1D-20c (10.26mm).

### L1D-20c (10.26mm)

720 imágenes

Tipo **Cuadro**      Resolución **5472 x 3648**      Distancia focal **10.26 mm**      Tamaño de píxel **2.41 x 2.41 micras**

	Valor	Error	F	Cx	Cy	B1	B2	K1	K2	K3	K4	P1	P2
F	4388.07	2	1.00	-0.87	0.97	-0.64	0.43	0.20	0.21	-0.15	0.05	-0.58	-0.86
Cx	-30.3327	0.041		1.00	-0.85	0.55	-0.50	-0.17	-0.18	0.13	-0.04	0.76	0.75
Cy	-61.6244	0.079			1.00	-0.56	0.42	0.19	0.20	-0.14	0.04	-0.57	-0.76
B1	-8.45028	0.003				1.00	-0.28	-0.10	-0.17	0.12	-0.05	0.34	0.61
B2	0.687297	0.0024					1.00	0.08	0.09	-0.06	0.02	-0.38	-0.38
K1	0.00671605	3.5e-005						1.00	-0.89	0.86	-0.84	-0.12	-0.17
K2	0.0290352	0.00025							1.00	-0.98	0.94	-0.12	-0.18
K3	-0.0390374	0.00071								1.00	-0.99	0.09	0.13
K4	0.00940764	0.00067									1.00	-0.03	-0.04
P1	-0.00153403	1.4e-006										1.00	0.49
P2	-0.00387998	1.8e-006											1.00

Tabla 2. Coeficientes de calibración y matriz de correlación.

## Puntos de control terrestre



Fig. 3. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores.  
 El color indica el error en Z mientras el tamaño y forma de la elipse representan el error en XY.  
 Las posiciones estimadas de puntos de apoyo se marcan con puntos o cruces.

Número	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Error en XY (cm)	Total (cm)
8	2.5602	4.29468	6.25531	4.99989	8.00798

Tabla 3. ECM de puntos de apoyo.  
 X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

Nombre	Error en X (cm)	Error en Y (cm)	Error en Z (cm)	Total (cm)	Imagen (pix)
B1	1.97881	-1.04953	7.72927	8.04728	2.215 (34)
R1	-3.50823	-5.67823	7.95451	10.3838	1.381 (24)
R2	2.48616	-2.07705	-1.02962	3.3993	1.644 (30)
R3	1.87879	-4.54224	-3.38734	5.96957	1.004 (42)
R4	1.82209	2.13996	5.83138	6.47336	1.492 (39)
R5	0.880141	8.91345	-10.6895	13.9459	1.184 (41)
R6	-4.64909	2.28808	-1.11333	5.29989	0.758 (30)
R7	-0.891154	0.00496431	-5.28887	5.36342	0.566 (17)
<b>Total</b>	<b>2.5602</b>	<b>4.29468</b>	<b>6.25531</b>	<b>8.00798</b>	<b>1.399</b>

Tabla 4. Puntos de apoyo.  
X - Este, Y - Norte, Z - Altitud.

## Modelo digital de elevaciones

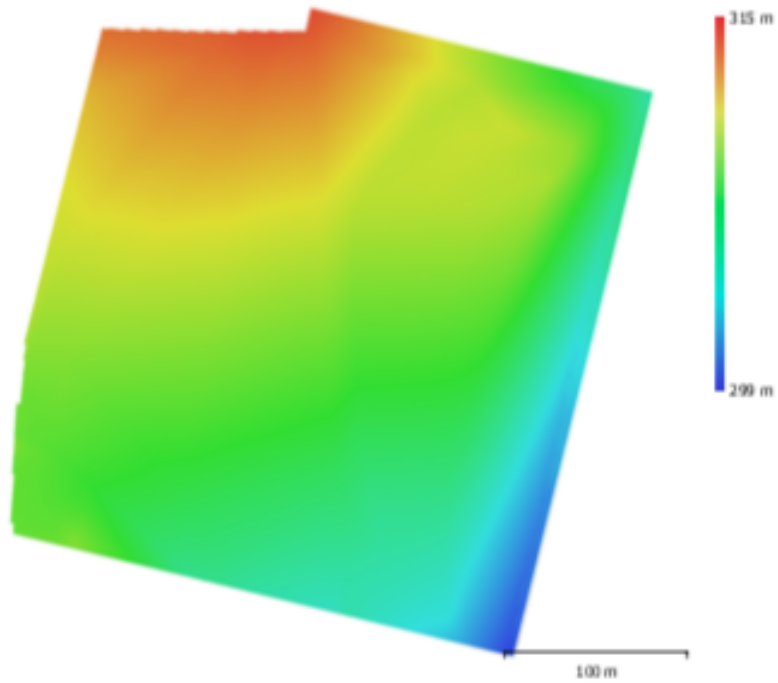


Fig. 4. Modelo digital de elevaciones.

Resolución: 3.12 cm/pix  
Densidad de puntos: 0.103 puntos/cm<sup>2</sup>

# Parámetros de procesamiento

<b>Generales</b>	
Cámaras	720
Cámaras orientadas	720
Marcadores	8
<b>Formas</b>	
Polilíneas	38
Polígonos	7
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG::32615)
Ángulo de rotación	Guñada, cabeceo, alabeo
<b>Nube de puntos</b>	
Puntos	435,766 de 509,260
RMS error de reproyección	0.251453 (0.601976 pix)
Error de reproyección máximo	3.02442 (30.7864 pix)
Tamaño promedio de puntos característicos	2.38171 pix
Colores de puntos	3 bandas uint8
Puntos clave	No
Multiplicidad media de puntos de paso	7.71356
<b>Parámetros de orientación</b>	
Precisión	Máxima
Pre-selección genérica	No
Pre-selección de referencia	Sí
Puntos claves por foto	50,000
Puntos de paso por foto	5,000
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo búsqueda de emparejamientos	49 minutos 3 segundos
Tiempo de orientación	18 minutos 40 segundos
<b>Parámetros de optimización</b>	
Parámetros	f, b1, b2, cx, cy, k1-k4, p1-p4
Ajuste adaptativo del modelo de cámara	Sí
Tiempo de optimización	35 segundos
<b>Nube de puntos densa</b>	
Puntos	5,724,713
Colores de puntos	3 bandas uint8
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Alta
Nivel de filtrado	Moderado
Tiempo de procesamiento	4 horas 32 minutos
<b>Parámetros de generación de la nube densa</b>	
Tiempo de procesamiento	13 horas 11 minutos
<b>Modelo</b>	
Caras	99,866
Vértices	49,953
Colores de vértices	3 bandas uint8
<b>Parámetros de obtención de mapas de profundidad</b>	
Calidad	Alta
Nivel de filtrado	Moderado
Tiempo de procesamiento	4 horas 32 minutos
<b>Parámetros de reconstrucción</b>	
Tipo de superficie	Bajorelieve / terreno
Datos fuente	Nube de puntos densa

<b>Generales</b>	
Interpolación	Habilitada
Máscaras volumétricas estrictas	No
Tiempo de procesamiento	1 minuto 8 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097
<b>Modelo digital de elevaciones</b>	
Tamaño	11,967 x 12,287
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG::32615)
<b>Parámetros de reconstrucción</b>	
Datos fuente	Mala
Interpolación	Habilitada
Tiempo de procesamiento	2 minutos 10 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097
<b>Ortomosaico</b>	
Tamaño	24,250 x 23,798
Sistema de coordenadas	WGS 84 / UTM zone 15N (EPSG::32615)
Colores	3 bandas uint8
<b>Parámetros de reconstrucción</b>	
Modo de mezcla	Mosaico
Superficie	Modelo digital de elevaciones
Permitir el cierre de agujeros	Sí
Tiempo de procesamiento	31 minutos 4 segundos
Versión del programa	1.5.5.9097
<b>Software</b>	
Versión	1.5.5 build 9097
Plataforma	Windows 64

## 2. PIX4D

### Quality Report



Generated with Pix4Dmapper version 4.4.12

**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	FSGH5FGH6
Processed	2019-10-10 17:49:38
Camera Model Name(s)	L10-20c_10.3_5472x0648 (981037D0121545) (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	1.61 cm / 0.63 in
Area Covered	0.126 km <sup>2</sup> / 12.7636 ha / 0.05 sq. mi. / 31.5558 acres

#### Quality Check

Images	median of 62387 keypoints per image	
Dataset	720 out of 720 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	7.59% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 17394.9 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 7 GCPs (7.3D), mean RMS error = 0.029 m	

#### Preview

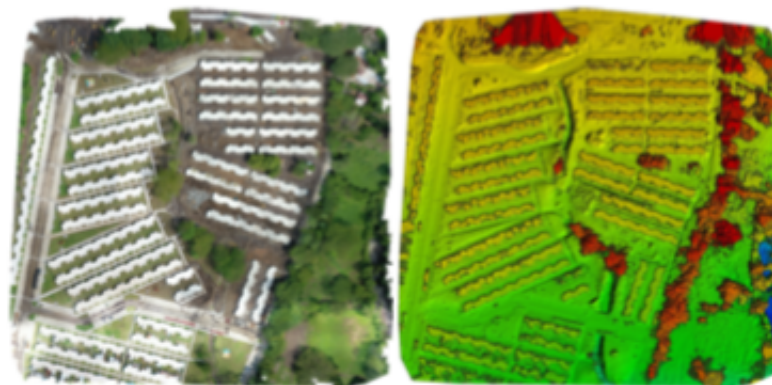


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

#### Calibration Details



Number of Calibrated Images	720 out of 720
Number of Geolocated Images	720 out of 720

Initial Image Positions

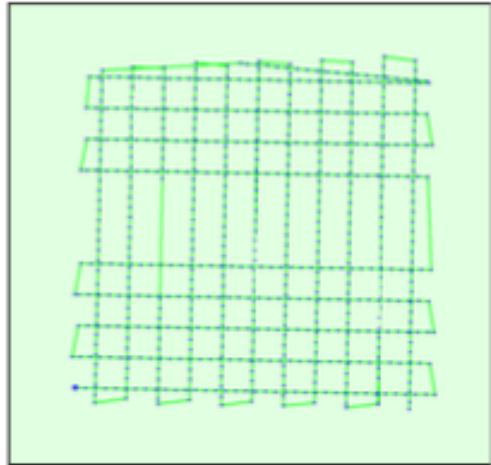
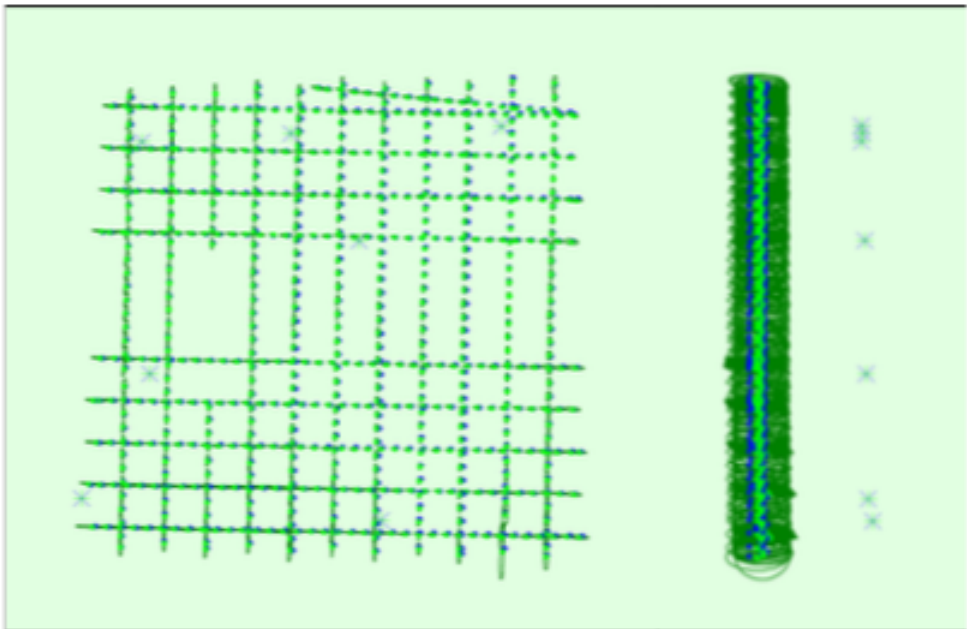
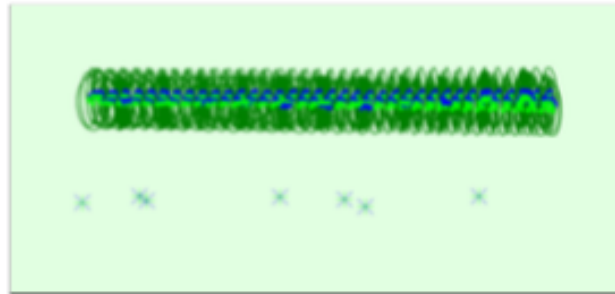


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

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). 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	0.021	0.023	0.176	0.019	0.018	0.003	0.002	0.002	0.016
Sigma	0.018	0.018	0.007	0.015	0.016	0.001	0.001	0.001	0.007

### Overlap



Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthoreosaic. 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

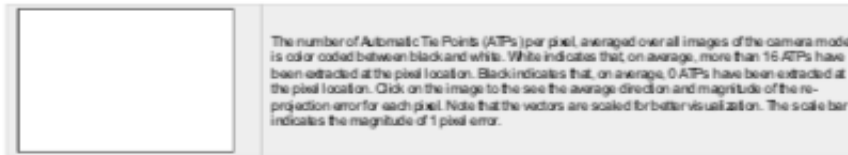
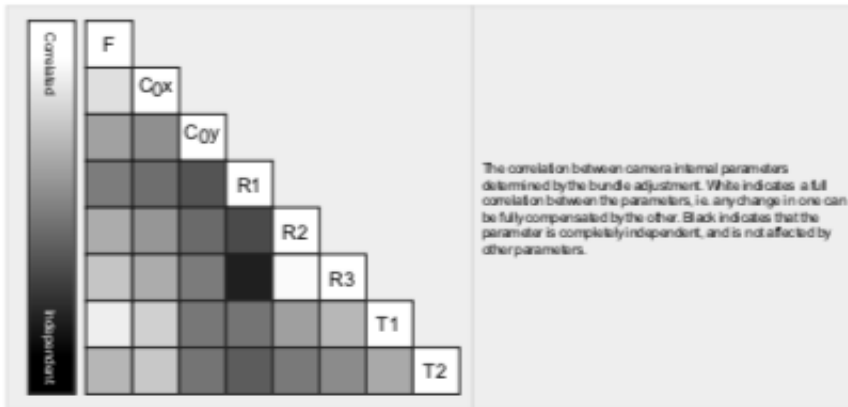
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	12360271
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	3736862
Mean Reprojection Error [pixels]	0.130

Internal Camera Parameters

L1D-20c\_10.3\_5472x3648 (0K8TG7D0121545) (RGB). Sensor Dimensions: 12.825 [mm] x 8.550 [mm]

EXIFID L1D20c\_10.3\_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	4470.830 [pixel] 10.475 [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	4131.247 [pixel] 9.683 [mm]	2711.303 [pixel] 6.395 [mm]	1747.844 [pixel] 4.097 [mm]	0.007	0.020	-0.020	-0.004	-0.001
Uncertainties (Sigma)	10.880 [pixel] 0.025 [mm]	0.217 [pixel] 0.001 [mm]	0.531 [pixel] 0.001 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



2D Keypoints Table

	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	62367	17395
Min	37341	3396
Max	82340	29212
Mean	62485	17167

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	210907
In 3 Images	719951
In 4 Images	340859
In 5 Images	188889
In 6 Images	119918
In 7 Images	75428
In 8 Images	39758
In 9 Images	28899

In 10 Images	2260
In 11 Images	17208
In 12 Images	13940
In 13 Images	11260
In 14 Images	8955
In 15 Images	6647
In 16 Images	5598
In 17 Images	4771
In 18 Images	4233
In 19 Images	3556
In 20 Images	3006
In 21 Images	2663
In 22 Images	1982
In 23 Images	1756
In 24 Images	1625
In 25 Images	1439
In 26 Images	1381
In 27 Images	1160
In 28 Images	1010
In 29 Images	888
In 30 Images	799
In 31 Images	702
In 32 Images	661
In 33 Images	599
In 34 Images	482
In 35 Images	470
In 36 Images	404
In 37 Images	350
In 38 Images	296
In 39 Images	215
In 40 Images	172
In 41 Images	151
In 42 Images	148
In 43 Images	98
In 44 Images	42
In 45 Images	32
In 46 Images	36
In 47 Images	20
In 48 Images	21
In 49 Images	16
In 50 Images	10
In 51 Images	4
In 52 Images	7
In 53 Images	3
In 54 Images	5
In 55 Images	2

2D Keypoint Matches



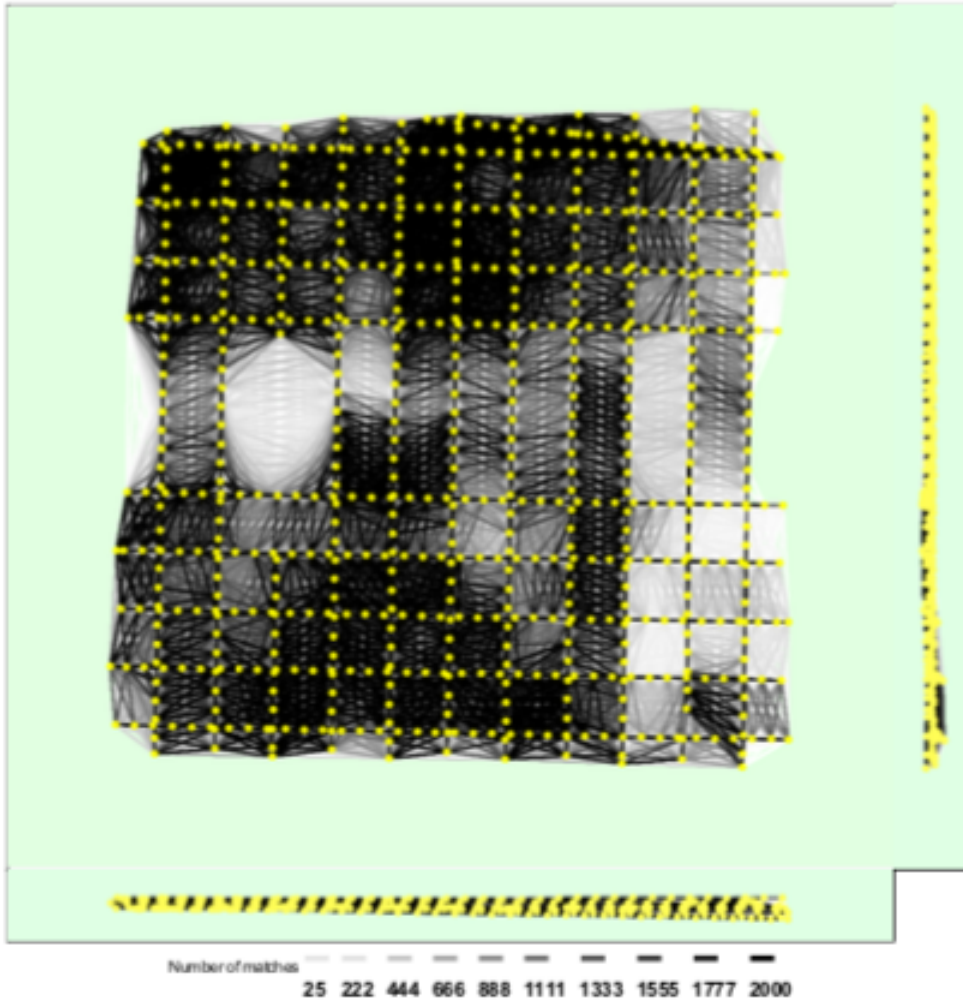


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual 6+ points or more images.

## Geolocation Details

### Ground Control Points

GCPName	Accuracy XYZ [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Validated/Marked
1 (3D)	0.020/0.020	0.015	0.032	-0.094	0.376	34 / 34
2 (3D)	0.020/0.020	-0.000	-0.015	0.010	0.554	29 / 29
3 (3D)	0.020/0.020	0.004	0.035	-0.003	0.207	38 / 38
4 (3D)	0.020/0.020	-0.006	0.011	-0.027	0.321	37 / 37
5 (3D)	0.020/0.020	-0.009	-0.096	0.073	0.308	34 / 34
6 (3D)	0.020/0.020	0.008	0.004	-0.010	0.434	30 / 30
7 (3D)	0.020/0.020	-0.008	-0.008	0.062	0.326	16 / 16
<b>Mean [m]</b>		0.000534	0.000276	0.001542		
<b>Sigma [m]</b>		0.008302	0.028869	0.052061		

<b>RMS Error [m]</b>		0.008320	0.028890	0.052104		
0 out of 1 check points have been labeled as inaccurate.						
<b>Check Point Name</b>	<b>Accuracy XYZ [m]</b>	<b>Error X [m]</b>	<b>Error Y [m]</b>	<b>Error Z [m]</b>	<b>Projection Error [pixel]</b>	<b>Verified/Marked</b>
0		-0.0518	-0.0189	-0.1274	0.6155	24 / 24

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

<b>Min Error [m]</b>	<b>Max Error [m]</b>	<b>Geolocation Error X [%]</b>	<b>Geolocation Error Y [%]</b>	<b>Geolocation Error Z [%]</b>
-	-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	0.00	11.67
-3.00	0.00	54.72	53.61	35.28
0.00	3.00	45.28	46.39	45.56
3.00	6.00	0.00	0.00	7.50
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
<b>Mean [m]</b>		0.763989	0.357264	1.531345
<b>Sigma [m]</b>		0.429804	0.419212	2.182559
<b>RMS Error [m]</b>		0.876590	0.550035	2.868274

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.

<b>Geolocation Bias</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
<b>Translation [m]</b>	0.763989	0.357264	1.531314

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

### Relative Geolocation Variance

<b>Relative Geolocation Error</b>	<b>Images X [%]</b>	<b>Images Y [%]</b>	<b>Images Z [%]</b>
{-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
<b>Mean of Geolocation Accuracy [m]</b>	5.000000	5.000000	10.000000
<b>Sigma of Geolocation Accuracy [m]</b>	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

<b>Geolocation Orientational Variance</b>	<b>RMS [degrees]</b>
Omega	0.900
Psi	0.820
Kappa	4.293

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

### Rolling Shutter Statistics

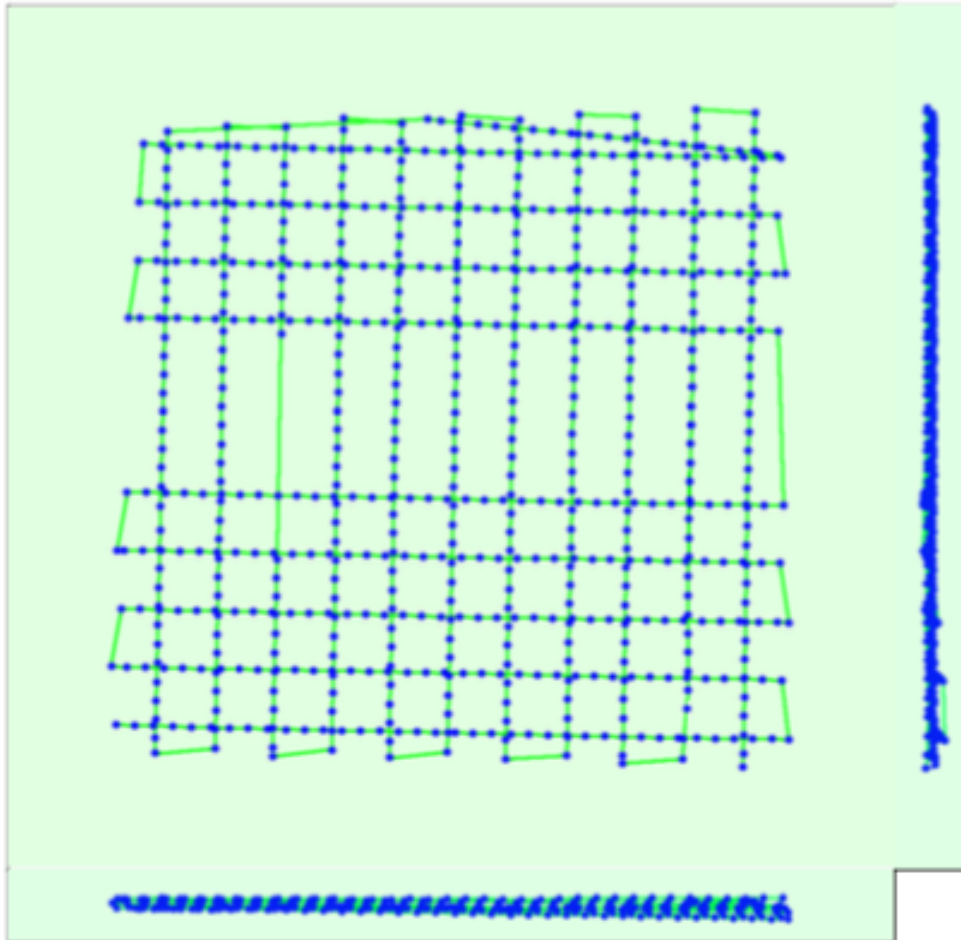


Figure 6: Camera movement estimated by the rolling shutter camera model. The green line follows the computed image positions. The blue dots represent the camera position at the start of the exposure. The blue lines represent the camera motion during the rolling shutter readout, re-scaled by a project dependent scaling factor for better visibility.

Median Camera Speed	2.1405 [m/s]
Median Camera Displacement During Sens or Readout	0.1523 [m]
Median Rolling Shutter Readout Time	75.8304 [ms]

## Initial Processing Details

### System Information

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-6700HQ CPU @ 2.60GHz RAM 16GB GPU: Intel(R) HD Graphics 530 (Driver: 20.19.15.4548), NVIDIA GeForce GTX 1070 (Driver: 26.21.14.3153)
Operating System	Windows 10 Home, 64-bit

### Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM84 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 15N (EGM84 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTM zone 15N (EGM84 Geoid)

## C. Informe de puntos geodesicos

Datos del archivo del proyecto		Sistema de coordenadas	
Nombre:	C:\Users\santi\Desktop\hfiore\trimble levantamiento escuinfla.vce	Nombre:	World wide/UTM
Tamaño:	55 KB	Datum:	WGS 1984
Modificado/a:	7/10/2019 4:54:52 p. m. (UTC:-6)	Zona:	15 North
Zona horaria:	Hora estándar, América Central	Geode:	EGM96 (Global)
Número de referencia:		Datum vertical:	
Descripción:		Obra calibrada:	
Comentario 1:			
Comentario 2:			
Comentario 3:			

### Informe de procesamiento de líneas base

#### Procesando resumen

Observación	De	A	Tipo de solución	Prec. H. (Metro)	Prec. V. (Metro)	Acl. geod.	Dist. elip (Metro)	ΔAltura (Metro)
PB1 -- r1 (B1)	PB1	r1	Fija	0.003	0.003	252°54'44"	53.480	0.723
PB1 -- r2 (B2)	PB1	r2	Fija	0.003	0.003	337°33'11"	143.000	3.748
PB1 -- r3 (B3)	PB1	r3	Fija	0.003	0.003	16°24'35"	142.523	3.356
PB1 -- r4 (B4)	PB1	r4	Fija	0.003	0.003	51°18'05"	223.486	3.584
PB1 -- r5 (B5)	PB1	r5	Fija	0.003	0.003	50°49'26"	107.300	1.762
PB1 -- r6 (B6)	PB1	r6	Fija	0.003	0.003	139°11'39"	146.060	-3.250
PB1 -- r8 (B7)	PB1	r8	Fija	0.003	0.003	225°08'45"	133.977	-0.735

#### Resumen de aceptación

Procesado	Pasado	Indicador	Fallida
7	7	0	0





- Agisoft Photoscan:** Es un software de escritorio para procesar imágenes digitales y, mediante la combinación de técnicas de fotogrametría digital y visión por computador, generar una reconstrucción 3D del entorno.. 92
- Distancia focal:** Es la distancia que existe, expresada en milímetros, entre el sensor (plano focal) y el centro óptico del lente.. 87
- DSM:** Se refiere a la superficie de la tierra e incluye todos los objetos que esta contiene.. 94
- DTM:** Representa la superficie de suelo desnudo y sin ningún objeto, como la vegetación o los edificios.. 94
- GPS:** Es un sistema de navegación por satélite compuesto por una red de 24 satélites colocados en órbita por el Departamento de Defensa de Estados Unidos.. 85
- GSD:** Es la distancia entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos en el suelo.. 84
- Malla texturizada:** Captura compatible con entornos de modelado 3D como 3Dmax o Blender y también para plataforma sketchfab.. 94
- Nube de puntos densa:** Es un conjunto de vértices en un sistema de coordenadas tridimensional.. 93
- Ortomosaico:** Es la presentación fotográfica de una zona de la superficie terrestre, en la que todos los elementos están en la misma escala, libre de errores y deformaciones, con la misma validez de un plano cartográfico.. 95
- PIX4D:** Es el software líder en fotogrametría y cartografía a partir de drones, que ofrece soluciones profesionales para topografía, ingeniería geomántica, seguridad pública, construcción, agricultura, sector inmobiliario y educación superior.. 92

**Puntos de control:** Los puntos de control son marcas sobre el terreno, y visibles a las fotografías tomadas con el dron.. 84

**RAM:** Es la memoria principal de un dispositivo donde se almacena programas y datos informativos. Las siglas RAM significan “Random Access Memory” traducido al español es “Memoria de Acceso Aleatorio”.. 91

**Rolling Shutter:** Efecto que genera un desplazamiento vertical cuando hay un movimiento relativo entre cámaras y objetos durante la adquisición de imágenes.. 85

**Rpas:** Remotely Piloted Aircraft (aeronave pilotada a distancia).. 86

**Software:** Es el conjunto de instrucciones que una computadora debe seguir, es decir, todas aquellas indicaciones sobre lo que tiene que hacer y cómo.. 92

**Trimble DL:** Es una herramienta sencilla para realizar un levantamiento GNSS Fast-estático o estático, gestionar archivos de datos en el receptor y enviar por correo electrónico archivos de datos brutos a la oficina.. 111

**UAV:** Una aeronave que vuela sin tripulación, la cual ejercer su función remotamente. Un VANT es un vehículo sin tripulación, reutilizable, capaz de mantener de manera autónoma un nivel de vuelo controlado y sostenido, y propulsado por un motor de explosión, eléctrico o de reacción.. 85

**UTM:** Es un sistema de coordenadas basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace secante a un meridiano.. 114

**WGS84:** Es un sistema de coordenadas geográficas mundial que permite localizar cualquier punto de la Tierra (sin necesitar otro de referencia) por medio de tres unidades dadas. WGS84 son las siglas en inglés de World Geodetic System 84 (que significa Sistema Geodésico Mundial 1984).. 115