

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



**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍA GPS
Y SENSORES REMOTOS PARA PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL**

TEMA DESARROLLADO:

**RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DE
POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL
SALVADOR MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS
AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV)**

PRESENTADA POR:

MARVIN ALEXANDER ALVARENGA SÁNCHEZ

JOSÉ MAURILIO MENJÍVAR Crespín

ADRIANA EUNICE REYES MORALES

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

INGENIERO CIVIL

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR :

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO :

Ph.D. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO :

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL

DIRECTOR :

ING. FREDY FABRICIO ORELLANA CALDERÓN

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

Curso de Especialización previo a la opción al Grado de:

INGENIERO CIVIL

Título

:

**CURSO DE ESPECIALIZACIÓN EN TECNOLOGÍA GPS
Y SENSORES REMOTOS PARA PROYECTOS DE
INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA DESARROLLADO:
RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA DE
POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL
SALVADOR MEDIANTE EL USO DE VEHÍCULOS
AÉREOS NO TRIPULADOS (UAV)**

Presentado por

:

MARVIN ALEXANDER ALVARENGA SÁNCHEZ

JOSÉ MAURILIO MENJÍVAR Crespín

ADRIANA EUNICE REYES MORALES

Curso de Especialización Aprobado por:

Docente Asesor

:

ING. WILFREDO AMAYA ZELAYA

San Salvador, noviembre de 2022

Curso de Especialización aprobado por:

Docente Asesor :

Ing. Wilfredo Amaya Zelaya

ÍNDICE GENERAL.

I. INTRODUCCIÓN.	XIX
II. SIGLAS Y ACRÓNIMOS.	XX
CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.	1
1.1. ANTECEDENTES.....	1
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.3. OBJETIVOS.....	3
1.3.1. GENERAL:.....	3
1.3.2. ESPECÍFICOS:.....	3
1.4. ALCANCES.	4
1.5. LIMITACIONES.	4
1.6. JUSTIFICACIÓN.....	5
CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.	6
2.1. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO.	6
2.2. ELIPSOIDE.....	8
2.3. GEOIDE.....	10
2.3.1. ONDULACIÓN GEOIDAL.	11
2.4. MODELOS GRAVITACIONALES DE LA TIERRA.....	13
2.4.1. MODELO DE GEOIDE LOCAL.	14
2.5. DATUM.....	15
2.5.1. DATUM LOCAL HORIZONTAL.....	15
2.5.2. DATUM GLOBAL HORIZONTAL.	17
2.5.3. DATUM VERTICAL.	17
2.6. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS.	19
2.7. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO MODERNO.....	24
2.8. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO LAMBERT SIRGAS ES- 2007.08.....	25
2.9. SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN SATELITAL (GNSS).....	26
2.9.1. SEGMENTO ESPACIAL.	28
2.9.2. SEGMENTO CONTROL.	29
2.9.3. SEGMENTO USUARIO.	30
2.9.4. FUENTES DE ERRORES GPS.	31
2.10. TÉCNICAS DE MEDICIÓN CON GPS.	32
2.10.1. MEDICIÓN EN TIEMPO REAL (RTK).....	33
CAPÍTULO 3: FOTOGRAMETRÍA CON DRONES.	34
3.1. HISTORIA DE LA FOTOGRAMETRÍA.	34
3.1.1. LA FOTOGRAMETRÍA ANALÓGICA.....	34

3.1.2.	LA FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA.....	35
3.1.3.	LA FOTOGRAMETRÍA DIGITAL.....	36
3.2.	CLASIFICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.....	38
3.3.	FOTOGRAMETRÍA MEDIANTE EL USO DE DRONES.....	40
3.4.	CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE DRONES.....	41
3.5.	PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.....	43
3.5.1.	CAPTURA DE IMÁGENES.....	43
3.5.2.	IMAGEN DIGITAL.....	44
3.5.3.	TIPOS DE SENSORES.....	46
3.6.	FACTORES PARA LA REALIZACIÓN DE UN LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO CON DRONES.....	49
3.6.1.	EVALUACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.....	49
3.6.2.	PUNTOS DE CONTROL.....	49
3.6.3.	PLAN DE VUELO.....	50
3.6.4.	EJECUCIÓN DEL VUELO.....	50
3.6.5.	PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.....	51
3.6.6.	PRESENTACIÓN.....	51
3.7.	DISTANCIA DE MUESTREO TERRESTRE (GSD).....	52
3.8.	TIPOS DE MISIONES PARA FOTOGRAMETRÍA.....	53
3.8.1.	CUADRÍCULA (GRID).....	54
3.8.2.	CUADRÍCULA DOBLE (DOUBLE GRID).....	54
3.8.3.	POLÍGONO (POLYGON).....	55
3.8.4.	CIRCULAR.....	56
3.8.5.	VUELO LIBRE (USUARIOS AVANZADOS).....	56
3.9.	TIPOS DE TRASLAPES.....	57
3.10.	SOFTWARE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICOS.....	58
3.10.1.	AGISOFT METASHAPE.....	58
3.10.2.	PIX4DMAPPER.....	59
3.10.3.	DRONEDEPLOY.....	59
3.10.4.	OPEN DRONE MAP.....	60
3.11.	PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.....	60
3.12.	RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.....	64
CAPÍTULO 4:	DATOS OBTENIDOS EN CAMPO.....	65
4.1.	OBTENCIÓN DE COORDENADAS PARA LOS PUNTOS DE CONTROL FOTOGRAMÉTRICOS MEDIANTE LA TÉCNICA GNSS.....	65
4.2.	TÉCNICA DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL (RTK).....	66
4.3.	PARÁMETROS PARA LA MEDICIÓN.....	66
4.4.	DELIMITACIÓN DEL ÁREA A RESTITUIR.....	66
4.5.	INSTALACIÓN DE LA BASE EN EL PUNTO CON COORDENADAS CONOCIDAS.....	67

4.6. CONFIGURACIÓN DEL COLECTOR PARA LA TOMA DE LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS.....	69
4.7. PLAN DE VUELO FOTOGRAMÉTRICO.....	78
CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS EN CAMPO.....	90
5.1. PASOS PARA PROCESAR UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO CON EL SOFTWARE PIX4D MAPPER.....	90
5.1.1. CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO.....	90
5.1.2. SELECCIÓN DE IMÁGENES.....	91
5.1.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS.....	94
5.1.4. PROCESAMIENTO.....	96
5.1.5. PROCESAMIENTO INICIAL.....	96
5.1.6. PUNTOS DE PASO.....	99
5.1.7. PUNTOS DE CONTROL.....	102
5.1.8. NUBE DE PUNTOS Y MALLA.....	105
5.1.9. MDS, ORTOMOSAICO E ÍNDICES.....	109
5.2. PASOS PARA TRANSFORMAR UN ARCHIVO RASTER GEORREFERENCIADO A UN ARCHIVO VECTORIAL GEORREFERENCIADO.....	113
CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	124
CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	133
CONCLUSIONES.....	133
RECOMENDACIONES.....	134
BIBLIOGRAFÍA.....	135
ANEXOS.....	137

ÍNDICE DE FIGURAS.

FIGURA 2.1.1: COORDENADAS GEODÉSICAS Y GEOCÉNTRICAS.....	7
FIGURA 2.2.1: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE UN ELIPSOIDE.....	8
FIGURA 2.3.1: RELACIÓN GRAFICA ENTRE EL GEOIDE, EL ELIPSOIDE Y UNA ESFERA.....	11
FIGURA 2.3.1.1: RELACIÓN GRAFICA ENTRE EL GEOIDE, EL ELIPSOIDE Y LA SUPERFICIE TERRESTRE.....	12
FIGURA 2.3.1.2: REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA ONDULACIÓN GEOIDAL EN EL SALVADOR.....	12
FIGURA 2.4.1: MODELO GRAVITACIONAL DE LA TIERRA EGM2008.....	14
FIGURA 2.4.1.1: MODELO DE GEOIDE LOCAL, ESGEOIDE.....	15
FIGURA 2.5.2.1: SISTEMA DE REFERENCIA WGS-84.....	17
FIGURA 2.5.3.1: ILUSTRACIÓN DEL NMM UTILIZADO COMO SUPERFICIE DE REFERENCIA.....	18
FIGURA 2.5.3.2: ILUSTRACIÓN DE UN BANCO DE MARCA (BM).....	18
FIGURA 2.5.3.3: RED DE NIVELACIÓN GEODÉSICA DE EL SALVADOR.....	19
FIGURA 2.6.1: PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS SEGÚN TIPO DE SUPERFICIE Y ORIENTACIÓN.....	22
FIGURA 2.6.2: PROYECCIÓN CÓNICA CONFORME LAMBERT EN CUADRANTE CARTOGRÁFICO.....	23
FIGURA 2.7.1: ILUSTRACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO QUE CONFORMAN EL ITRF.....	25
FIGURA 2.8.1: ILUSTRACIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA LAMBERT SIRGAS ES-2007.08.....	26
FIGURA 2.9.2.1: UBICACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO DEL SISTEMA GPS.....	29

FIGURA 2.9.3.1: ILUSTRACIÓN DE RECEPTOR DE NAVEGACIÓN, GPS GEODÉSICO DE UNA FRECUENCIA, GPS GEODÉSICO DE DOBLE FRECUENCIA.	30
FIGURA 3.1.1.1: FOTOGRAMETRÍA ANALÓGICA.	35
FIGURA 3.1.2.1: FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA.	36
FIGURA 3.1.3.1: FOTOGRAMETRÍA DIGITAL CON AYUDA DE LA AVIACIÓN.	36
FIGURA 3.1.3.2: FOTOGRAMETRÍA DIGITAL CON CÁMARAS MODERNAS.	37
FIGURA 3.2.1: FOTOGRAMETRÍA AÉREA CON DRONES.	38
FIGURA 3.2.2: FOTOGRAMETRÍA TERRESTRE.	39
FIGURA 3.2.3: SISTEMA FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.	39
FIGURA 3.3.1: FOTOGRAMETRÍA CON EL USO DE DRONES.	40
FIGURA 3.4.1: DRON DE ALA FIJA.	42
FIGURA 3.4.2: DRON DE ALA ROTATORIA.	42
FIGURA 3.4.3: DRON DE ALA FIJA Y ROTATORIA.	43
FIGURA 3.5.2.1: IMÁGENES DIGITALES.	44
FIGURA 3.5.3.1: CÁMARA DE TIPO RGB.	46
FIGURA 3.5.3.2: REPRESENTACIÓN DE LA DISTANCIA FOCAL.	47
FIGURA 3.5.3.4: CÁMARA TÉRMICA.	48
FIGURA 3.5.3.5: CÁMARA CON LIDAR.	48
FIGURA 3.6.2.1: PUNTOS DE CONTROL FOTOGRAMÉTRICOS (PCF) PARA EL LEVANTAMIENTO.	50
FIGURA 3.7.1: DISTANCIA DE MUESTREO TERRESTRE (GSD).	52
FIGURA 3.7.2: DISTANCIA DE MUESTREO TERRESTRE (GSD).	53
FIGURA 3.8.1.1: MISIÓN CUADRICULAR PARA UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	54
FIGURA 3.8.2.1: MISIÓN CUADRICULAR DOBLE PARA UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	54

FIGURA 3.8.3.1: MISIÓN POLIGONAL PARA UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	55
FIGURA 3.8.4.1: MISIÓN CIRCULAR PARA UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	56
FIGURA 3.8.5.1: MISIÓN LIBRE PARA UN VUELO FOTOGRAMÉTRICO..	56
FIGURA 3.9.1 TRASLAPE LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL EN PIX4DCAPTURE.	57
FIGURA 3.10.1.1: SOFTWARE AGISOFT METASHAPE.	58
FIGURA 3.10.2.1: SOFTWARE PIX4DMAPPER.	59
FIGURA 3.10.3.1: SOFTWARE DRONEDEPLOY.	60
FIGURA 3.10.4.1: SOFTWARE OPEN DRONE MAP.	60
FIGURA 3.11.1: NUBE DE PUNTOS A PARTIR DE LAS FOTOGRAFÍAS...	62
FIGURA 3.11.2: MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE.	63
FIGURA 3.11.3: MODELO DIGITAL DE TERRENO.	63
FIGURA 3.11.4: ORTOFOTO GENERADA A PARTIR DEL PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO.	64
FIGURA 3.12.1: RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.	65
FIGURA 4.4.1: DELIMITACIÓN DEL ÁREA A ANALIZAR.	67
FIGURA 4.5.1: PUNTO CON COORDENADAS CONOCIDAS EN LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.	67
FIGURA 4.5.2: INSTALACIÓN DE LA BASE EN EL PUNTO CON COORDENADAS CONOCIDAS.	68
FIGURA 4.5.3: MEDICIÓN DE LA ALTURA DE LA BASE.	68
FIGURA 4.5.4: ARRANQUE DE LA BASE.	69
FIGURA 4.6.1: CONFIGURACIÓN DEL COLECTOR.	69
FIGURA 4.6.2: NOMBRAMIENTO DEL NUEVO TRABAJO EN EL COLECTOR.	70
FIGURA 4.6.3: CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA PARA EL PROYECTO..	70
FIGURA 4.6.4: CONFIGURACIÓN DE LA BASE GNSS.	71

FIGURA 4.6.5: SELECCIÓN DEL FABRICANDO SEGÚN EL MODELO QUE ESTEMOS UTILIZANDO.....	71
FIGURA 4.6.6: CONFIGURACIÓN DE LA ALTURA DEL RECEPTOR BASE.	72
FIGURA 4.6.7: CONFIGURACIÓN DE LAS COORDENADAS DEL PUNTO BASE.....	72
FIGURA 4.6.8: ARRANQUE DE LA BASE.....	73
FIGURA 4.6.9: ALMACENAMIENTO DE LOS PARÁMETROS EN EL.....	73
FIGURA 4.6.10: CONFIGURACIÓN DEL RECEPTOR MÓVIL GNSS.....	74
FIGURA 4.6.11: TIPO DE CONEXIÓN ENTRE EL RECEPTOR Y EL COLECTOR.....	74
MANUAL DE OPERACIÓN EQUIPO GPS CARLSON.....	74
FIGURA 4.6.12: CONFIGURACIÓN DE LA ALTURA DEL RECEPTOR ROVER.....	75
FIGURA 4.6.13: SELECCIÓN DEL TIPO DE ANTENA DEL ROVER.	75
FIGURA 4.6.14: CONFIGURACIÓN DEL LEVANTAMIENTO.....	76
FIGURA 4.6.15: PANTALLA PRINCIPAL DEL LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO.....	76
FIGURA 4.6.16: MEDICIÓN DE LOS PCF PARA EL VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	77
FIGURA 4.6.17: PROCESO PARA GRABAR UN PUNTO.....	77
FIGURA 4.7.1: DRON PHANTOM 4.....	78
FIGURA 4.7.2: CONTROL DEL DRON CON UNA PORTÁTIL.	79
FIGURA 4.7.3: SELECCIÓN DE LA APLICACIÓN DJI GO 4.....	79
FIGURA 4.7.4: CONFIGURACIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL DRON. ...	80
FIGURA 4.7.5: SELECCIÓN DE CONFIGURACIÓN.....	80
FIGURA 4.7.6: SELECCIÓN DE SENSORES.....	81
FIGURA 4.7.7: SELECCIÓN DE CALIBRACIÓN DE IMU.....	81
FIGURA 4.7.8: SELECCIÓN DE INICIO PARA CALIBRACIÓN.....	81

FIGURA 4.7.9: POSICIONES DEL DRONE PARA LA CALIBRACIÓN DEL IMU.	82
FIGURA 4.7.10: MENSAJE DE FINALIZACIÓN DE CALIBRACIÓN.....	82
FIGURA 4.7.11: SELECCIÓN DE COMPASS.....	83
FIGURA 4.7.12: POSICIONES PARA LA CALIBRACIÓN DEL COMPASS..	83
FIGURA 4.7.13: FINALIZACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DE COMPASS.	84
FIGURA 4.7.14: PANTALLA PRINCIPAL DE LA APLICACIÓN DJI GO 4	84
FIGURA 4.7.15: SELECCIÓN PARA LA CALIBRACIÓN DEL GIMBAL.....	85
FIGURA 4.7.16: SELECCIÓN PARA LA AUTO CALIBRACIÓN DEL GIMBAL.	85
FIGURA 4.7.17: INICIO DEL PROCESO PARA LA CALIBRACIÓN DEL GIMBAL.....	85
FIGURA 4.7.18: PROCESO DE CALIBRACIÓN DEL GIMBAL.....	86
FIGURA 4.7.19: FINALIZACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL GIMBAL.....	86
FIGURA 4.7.20: PANTALLA DE LA APLICACIÓN DJI GO 4.	87
FIGURA 4.7.21: SELECCIÓN DE LA APLICACIÓN PIX4DCAPPTURE.....	87
FIGURA 4.7.22: SELECCIÓN EL TIPO DE VUELO.....	88
FIGURA 4.7.23: DELIMITACIÓN DEL ÁREA PARA EL VUELO.....	88
FIGURA 4.7.24: PARÁMETROS DEL DRON.....	89
FIGURA 4.7.25: EJECUCIÓN DEL VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	89
FIGURA 4.7.26: FINALIZACIÓN DEL VUELO FOTOGRAMÉTRICO.	90
FIGURA 5.1.1.1: CREACIÓN DE NUEVO PROYECTO PIX4DMAPPER.	91
FIGURA 5.1.1.2: SELECCIÓN DE IMÁGENES.....	91
FIGURA 5.1.1.3: SELECCIONAR IMÁGENES.....	92
FIGURA 5.1.1.4: SELECCIÓN DE CARPETA QUE CONTIENE LAS IMÁGENES.....	92
FIGURA 5.1.1.5: VISTA PREVIA DE IMÁGENES SELECCIONADAS.....	93
FIGURA 5.1.1.6: PROPIEDADES DE IMÁGENES.	93

FIGURA 5.1.3.1: SELECCIÓN DE SISTEMA DE COORDENADAS DE SALIDA.....	94
FIGURA 5.1.3.2: PLANTILLA DE OPCIONES DE PROCESAMIENTO.	95
FIGURA 5.1.3.3: PROYECTO CREADO EN PIX4DMAPPER.	95
FUENTE: PROPIA.....	95
FIGURA: 5.1.5.1: PROCESAMIENTO INICIAL.	96
FIGURA 5.1.5.2: OPCIONES DE PROCESAMIENTO INICIAL.	97
FIGURA 5.1.5.3: REALIZACIÓN DEL PROCESAMIENTO INICIAL.	97
FIGURA 5.1.5.4: INFORME DE REPORTE DE CALIDAD DEL PROCESAMIENTO INICIAL.....	98
FIGURA 5.1.5.5: NUBE DE PUNTOS GENERADA LUEGO DEL PROCESAMIENTO INICIAL.....	98
FIGURA 5.1.5.6: DESACTIVACIÓN DE CÁMARAS.	99
FIGURA 5.1.6.1: SELECCIÓN DE PUNTOS DE PASO.....	100
FIGURA 5.1.6.2: REEMPAREJANDO Y OPTIMIZANDO PUNTOS DE PASO.	101
FIGURA 5.1.6.3: PROPIEDADES DE VISUALIZACIÓN DE PUNTOS DE PASO.....	101
FIGURA 5.1.7.1: GESTOR GCP/MTP.....	102
FIGURA 5.1.7.2: IMPORTACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.....	103
FIGURA 5.1.7.3: VISUALIZACIÓN DE PUNTOS DE CONTROL IMPORTADOS.	103
FIGURA 5.1.7.4: GEORREFERENCIACIÓN DE PROYECTO CREADO EN PIX4DMAPPER.	104
FIGURA 5.1.7.5: GEORREFERENCIACIÓN DE NUBE DE PUNTOS.	104
FIGURA 5.1.7.6: SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL.	105
FIGURA 5.1.8.1: OPCIONES DE PROCESAMIENTO DE NUBE DE PUNTOS Y MALLA.	105

FIGURA 5.1.8.2: OPCIONES DE PROCESAMIENTO DE NUBE DE PUNTOS.	106
FIGURA 5.1.8.3: OPCIONES DE PROCESAMIENTO DE MALLA 3D CON TEXTURA.....	106
FIGURA 5.1.8.4: INICIO DE PROCESAMIENTO 2.....	107
FIGURA 5.1.8.5: INFORME DE REPORTE DE CALIDAD DE PROCESAMIENTO 2.	107
FIGURA 5.1.8.6: SELECCIÓN DE CAPAS.	108
FIGURA 5.1.9.1: OPCIONES DE PROCESAMIENTO DE MDS Y ORTOMOSAICO.	109
FIGURA 5.1.9.2: OPCIONES DE PROCESAMIENTO DE RESULTADOS ADICIONALES.	110
FIGURA 5.1.9.3: INICIO DE PROCESAMIENTO 3.....	111
FIGURA 5.1.9.4: INFORME DE REPORTE DE CALIDAD DEL PROCESAMIENTO 3.	111
FIGURA 5.1.9.5: ORTOMOSAICO GENERADO EN PIX4DMAPPER.	112
FIGURA 5.1.9.6: MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE (DSM) GENERADO EN PIX4DMAPPER.	112
FIGURA 5.1.9.7: MODELO DIGITAL DE TERRENO (MDT) GENERADO EN PIX4DMAPPER.	113
FIGURA 5.1.9.8: CARPETAS CREADAS DEL PROYECTO.....	113
FIGURA 5.2.1: ENTORNO DE TRABAJO DEL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.	115
FIGURA 5.2.1: ENTORNO DE TRABAJO DEL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.	115
FIGURA 5.2.2: ORTOFOTO GEORREFERENCIADA DEL POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, CARGADO EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.	115

FIGURA 5.2.2: ORTOFOTO GEORREFERENCIADA DEL POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, CARGADO EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	115
FIGURA 5.2.3: EJEMPLO PARA SELECCIONAR LA OPCIÓN “EXPORT” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	116
FIGURA 5.2.3: EJEMPLO PARA SELECCIONAR LA OPCIÓN “EXPORT” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	116
FIGURA 5.2.4: VENTANA EMERGENTE “SELECT EXPORT FORMAT” DONDE SE SELECCIONA EL FORMATO DE CONVERSIÓN “. ECW” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	116
FIGURA 5.2.4: VENTANA EMERGENTE “SELECT EXPORT FORMAT” DONDE SE SELECCIONA EL FORMATO DE CONVERSIÓN “. ECW” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	116
FIGURA 5.2.5: VENTANA EMERGENTE “ECW EXPORT OPTIONS” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	117
FIGURA 5.2.5: VENTANA EMERGENTE “ECW EXPORT OPTIONS” EN EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	117
FIGURA 5.2.6: CONVERSIÓN DEL ARCHIVO “.TIF” A “. ECW” POR EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	117
FIGURA 5.2.6: CONVERSIÓN DEL ARCHIVO “.TIF” A “. ECW” POR EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	117
FIGURA 5.2.7: VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	118
FIGURA 5.2.7: VENTANA PRINCIPAL DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	118
FIGURA 5.2.8: SELECCIÓN DEL MODO DE TRABAJO “PLANIFICACIÓN Y ANÁLISIS” DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	118
FIGURA 5.2.8: SELECCIÓN DEL MODO DE TRABAJO “PLANIFICACIÓN Y ANÁLISIS” DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	118

FIGURA 5.2.9: SELECCIÓN DE LA OPCIÓN “IMAGEN” DEL MODO DE TRABAJO “PLANIFICACIÓN Y ANÁLISIS” DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.....	119
FIGURA 5.2.9: SELECCIÓN DE LA OPCIÓN “IMAGEN” DEL MODO DE TRABAJO “PLANIFICACIÓN Y ANÁLISIS” DEL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.....	119
FIGURA 5.2.10: BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE LA ORTOFOTO EN FORMATO “. ECW”.....	119
FIGURA 5.2.10: BÚSQUEDA Y SELECCIÓN DE LA ORTOFOTO EN FORMATO “. ECW”.....	119
FIGURA 5.2.11: VENTANA EMERGENTE “CORRELACIÓN DE IMAGEN”.	120
FIGURA 5.2.11: VENTANA EMERGENTE “CORRELACIÓN DE IMAGEN”.	120
FIGURA 5.2.12: ORTOFOTO GEORREFERENCIADA PROVENIENTE DEL ARCHIVO “. ECW” ENLAZADA AL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	120
FIGURA 5.2.12: ORTOFOTO GEORREFERENCIADA PROVENIENTE DEL ARCHIVO “. ECW” ENLAZADA AL SOFTWARE AUTOCAD CIVIL3D.	120
FIGURA 5.2.13: GUARDADO DE ARCHIVO CON INSERTADO DE ORTOFOTO EN FORMATO “.DWG”.	121
FIGURA 5.2.13: GUARDADO DE ARCHIVO CON INSERTADO DE ORTOFOTO EN FORMATO “.DWG”.	121
FIGURA 5.2.14: RESULTADO FINAL DE LA VECTORIZACION DE LA ORTOFOTO DEL POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	121
FIGURA 5.2.14: RESULTADO FINAL DE LA VECTORIZACION DE LA ORTOFOTO DEL POLIDEPORTIVO DE LA UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR.....	121

FIGURA 5.2.15: SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA DEL ARCHIVO “.DWG”.....	122
FIGURA 5.2.15: SELECCIÓN DEL SISTEMA DE REFERENCIA DEL ARCHIVO “.DWG”.....	122
FIGURA 5.2.16: CONVERSIÓN DE ARCHIVO “.DWG” A “.KMZ” CON EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	122
FIGURA 5.2.16: CONVERSIÓN DE ARCHIVO “.DWG” A “.KMZ” CON EL SOFTWARE GLOBAL MAPPER.....	122
FIGURA 5.2.17: ABRIENDO ARCHIVO “.KMZ” EN GOOGLE EARTH.....	123
FIGURA 5.2.17: ABRIENDO ARCHIVO “.KMZ” EN GOOGLE EARTH.....	123
FIGURA 5.2.18: POLIDEPORTIVO DE LA UES EN FORMATO VECTORIAL VERIFICADO EN GOOGLE EARTH.	123
FIGURA 5.2.18: POLIDEPORTIVO DE LA UES EN FORMATO VECTORIAL VERIFICADO EN GOOGLE EARTH.	123

ÍNDICE DE TABLAS.

TABLA 2.2.2: ELIPSOIDES DE REFERENCIA MÁS UTILIZADOS.	9
TABLA 2.5.1.1: DATUM MÁS UTILIZADOS, ELIPSOIDE ASOCIADO Y UBICACIÓN.....	16
TABLA 4.3.1: PARÁMETROS A UTILIZAR EN LA TÉCNICA DE MEDICIÓN RTK.	66

I. INTRODUCCIÓN.

En el presente trabajo de investigación, daremos a conocer un poco acerca de los conocimientos adquiridos durante el Curso de Especialización en Tecnología GPS y Sensores Remotos Aplicados a Proyectos de Ingeniería Civil. En donde explicaremos los diferentes sistemas geodésicos de referencias globales y locales utilizados en la topografía. Además de conocer los modelos gravitaciones de la tierra que se usan en la mayoría de los programas para representar la superficie del terreno.

Debido a los avances tecnológicos en los últimos años, la fotogrametría ha sufrido una importante evolución, involucrando la tecnología de Drones para poder realizar vuelos fotogramétricos en los diversos campos de la ingeniería civil que luego se vectorizan para hacer una restitución digital, en comparación al pasado este proceso se hace en menor tiempo y obtenemos resultados confiables con márgenes de error dentro de los parámetros permitidos.

También se describe parte de la historia de la fotogrametría, las etapas en las que se conforma y la clasificación de la fotogrametría. Además, conocer las características y los tipos de drones que se usan en la actualidad para la restitución fotogramétrica. Con los conocimientos básicos que adquirimos durante el curso, detallaremos los procesos realizados para la toma de las coordenadas de los puntos de Control Fotogramétrico utilizados para el plan de vuelo fotogramétrico, que posteriormente se utilizaran para la georreferenciación del ortomosaico.

Finalmente, se explica el procedimiento seguido para el procesamiento de las fotografías tomadas con el Dron mediante el software Pix4Dmapper y posteriormente la vectorización del ortomosaico mediante el software de dibujo AutoCAD Civil 3D.

II. SIGLAS Y ACRÓNIMOS.

WGS 84: World Geodetic System 1984.

EGM: Modelos Gravitacionales de la Tierra.

NGA: Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial.

GNSS: Sistema Global de Navegación por Satélite.

NAD27: Datum norteamericano de 1927.

NMM: Nivel Medio del Mar.

IAGS: Servicio Geodésico Interamericano.

ITRS: Sistema Internacional de Referencia Terrestre.

ITRF: Marco de Referencia Terrestre Internacional.

SIRGAS: Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas.

NAVSTAR: NAVigation System by Timing And Ranging.

GDOP: Geometric Dilution Of Precision.

PDOP: Posicion Dilution Of Precision.

MDT: Modelos Digitales del Terreno.

MDS: Modelos Digitales de Superficie.

GCP: Ground Control Points.

CAPÍTULO 1: GENERALIDADES.

1.1. ANTECEDENTES.

La palabra Fotogrametría comenzó a tener uso general en los Estados Unidos cerca del año 1934, cuando se fundó la Sociedad Americana de Fotogrametría, pero el término ya se usaba en Europa algunas décadas atrás. La palabra Fotogrametría deriva de 3 palabras griegas; "Photos" que significa luz, "Gramma" que significa dibujo o escritura y "metrón" que significa medir. Si aplicamos la etimología de la palabra original nos proporciona una definición "medir gráficamente por medio de la luz".

Desde sus inicios, hasta la actualidad, la fotogrametría ha evolucionado a la par con la tecnología, empezando desde la fotogrametría analógica, pasando posteriormente a la fotogrametría analítica y llegando a lo que conocemos actualmente como fotogrametría digital.

El manejo de información geográfica y los sistemas que permitan su administración presenta en nuestro país un bajo desarrollo a diferencia de lo que ocurre en otros países, lo que ha impedido una mejor administración de recursos y mejores proyectos de planificación. A lo anterior se agrega que el creciente auge de las herramientas de código abierto de libre uso es casi desconocido, esto en parte debido a que, a diferencia de otros países la situación económica de los últimos años permite que, tanto a instituciones públicas como privadas, en la mayoría de los casos, cuenten con recursos para adquirir licencias comerciales. Estos dos hechos han comenzado a cambiar tímidamente, lo que ha permitido su complementación e integración, pero a un número limitado de usuarios, principalmente a profesionales en el área.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Actualmente, el uso de la estación total nos permite realizar levantamientos topográficos muy precisos, pero resulta ser un proceso que para su ejecución requiere de una considerable demanda de trabajadores y largas jornadas laborales, también se pueden presentar situaciones donde el acceso de los topógrafos al terreno resulta inclusive riesgoso.

Esto supone un problema, pues la importancia de los datos obtenidos a partir de los levantamientos topográficos es de gran importancia para la formulación y ejecución de proyectos y existe la necesidad que la obtención de estos datos se dé en el menor tiempo posible y que estos sean confiables.

La demanda de estos datos topográficos es grande debido a la constante ejecución de proyectos de obra civil que requieren del conocimiento de la topografía del terreno. La elaboración de estudios preliminares, trazado de caminos, cálculos volumétricos, definición de curvas de nivel en zonas con difícil acceso, así como obtener una base de datos topográficos que cumpla con las exigencias de cada proyecto se facilita con la integración de nuevas tecnologías, como el uso de vehículos aéreos no tripulados o drones para aplicar técnicas fotogramétricas. Sin embargo, en el país hay poco conocimiento sobre el uso de estas aeronaves y su uso en conjunto con los programas informáticos actualmente utilizados para hacer análisis fotogramétricos.

1.3. OBJETIVOS.

1.3.1. GENERAL:

- ❖ Realizar la restitución fotogramétrica del Polideportivo de la Universidad de El Salvador, mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados, aplicando los conocimientos teóricos y prácticos adquiridos en el curso de especialización.

1.3.2. ESPECÍFICOS:

- ❖ Explicar en qué consiste la fotogrametría.
- ❖ Ubicar puntos de control de forma estratégica de modo que estos puedan ser visibles en las fotografías a tomar.
- ❖ Realizar el plan de vuelo sobre el terreno y sus alrededores con vehículos aéreos no tripulados para la obtención de fotografías aéreas georreferenciadas por medio de la aplicación Pix4Dcapture.
- ❖ Realizar el procesamiento de los datos obtenidos en campo utilizando el software Pix4Dmapper.

1.4. ALCANCES.

Realizar la planificación y ejecución del proyecto de vuelo sobre el Polideportivo de la Universidad de El Salvador poniendo en práctica los conocimientos que fueron adquiridos a lo largo del tiempo que duró el curso de especialización, explicando detalladamente los procedimientos realizados en campo, los cuidados y las consideraciones que se deben tener al realizar fotogrametría utilizando vehículos aéreos no tripulados (drones), para la obtención de fotografías aéreas.

Generar un modelo digital de la superficie del terreno, resultante del estudio, para cotejar con la base de datos topográficos existente de la facultad.

A partir del modelo digital de superficie resultado del procesamiento de las fotografías se creará un plano topográfico del Polideportivo de la Universidad de El Salvador, sede central.

1.5. LIMITACIONES.

- La aplicación práctica de esta metodología se realizará en el campus de la Universidad de El Salvador.
- El equipo UAV a utilizar será el proporcionado por el docente asesor del curso de especialización ya que la Universidad no cuenta con dicho recurso.
- Debido a la copa de los árboles no se pueden percibir correctamente los objetos o elementos que se encuentran a nivel de suelo, siendo necesario implementar técnicas o procedimientos alternativos ajenos al vuelo con UAV requiriendo más tiempo y recursos en el levantamiento.
- Para obtener una ortofoto de alta calidad se debe de hacer en horas del día donde la posición del sol sea tal que los rayos de luz que emite no generen sombras de gran tamaño.

1.6. JUSTIFICACIÓN.

En ingeniería civil la topografía es una etapa importante en el diseño y ejecución de los proyectos, ya que es necesario conocer la planimetría y altimetría del terreno en el que se ubicarán. Según sean las características de cada proyecto siempre se presentan limitaciones de tiempo y recursos y la elección del equipo y metodología de trabajo son claves en el éxito del mismo.

La fotogrametría es el conjunto de métodos y procedimientos mediante los cuales podemos deducir de la fotografía de un objeto, la forma y dimensiones del mismo; el levantamiento fotogramétrico es la aplicación de la fotogrametría a la topografía.

La aplicación de vehículos aéreos no tripulados (Unmanned Aerial Vehicle, UAV) en la ejecución de vuelos fotogramétricos es una técnica novedosa que ha incrementado de forma constante su popularidad y accesibilidad para el público. El uso de drones para trabajos civiles tiene un mayor uso en países desarrollados conforme pasa el tiempo, sin embargo, en El Salvador el uso de esta tecnología es aún desconocido para muchos y gran parte de los profesionales de la ingeniería civil dedicados al área de la topografía no conocen el procedimiento que se lleva a cabo para la obtención y procesamiento de datos que permitan analizar la superficie del terreno por medio de fotografías aéreas obtenidas con este equipo.

Con la ejecución de este trabajo de grado se demostrarán las ventajas del uso de vehículos aéreos no tripulados para un levantamiento fotogramétrico, también se creará una guía para que el lector conozca cuál es el procedimiento que se lleva a cabo en campo y los softwares a utilizar para el procesamiento de las fotografías obtenidas con drones para realizar una restitución fotogramétrica.

CAPÍTULO 2: FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

2.1. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO.

Un Sistema de Referencia es una definición conceptual de teorías, hipótesis y constantes que permiten situar una tripleta de ejes coordenados en el espacio, definiendo su origen y orientación, siendo un recurso matemático que permite asignar coordenadas a puntos sobre la superficie terrestre, utilizando en la actualidad un elipsoide de revolución definido por su semieje mayor (a), semieje menor (b) y aplanamiento (f) para generar la aproximación de la forma de la tierra donde el centro del elipsoide coincide con el centro del sistema de referencia, es decir, con el geocentro y el semieje menor coincide con el eje de rotación terrestre quedando así constituido el sistema de coordenadas geodésico y geocéntrico que cuenta con las siguientes características:

- La vertical geodésica en un punto de la superficie del elipsoide de revolución coincide con la dirección del vector normal al elipsoide en dicho punto y, por tanto, no pasa por el centro del elipsoide.
- Latitud geodésica es el ángulo que forma la vertical geodésica del punto con el plano ecuador geodésico.
- Longitud geodésica es el ángulo formado por el meridiano geodésico del punto de cálculo y el meridiano geodésico origen.
- La longitud geocéntrica será igual a la geodésica, pero la latitud geocéntrica (β), será el ángulo entre la línea que une el centro del elipsoide y un punto sobre el elipsoide y el ecuador geodésico.

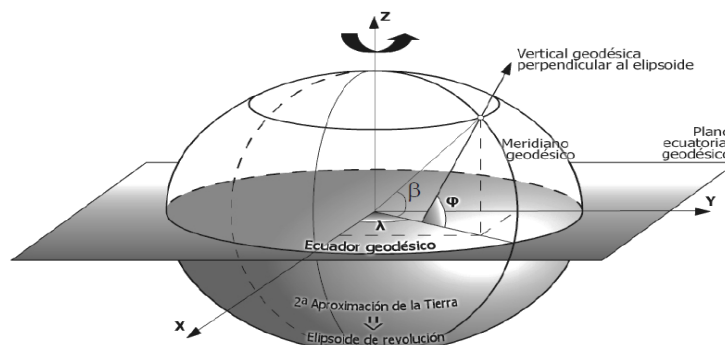


Figura 2.1.1: Coordenadas geodésicas y geocéntricas.
Fuente: Sistema Y Marco De Referencia Terrestre
Sistemas De Coordenadas/Ángel Martín Furones/2011.

Estos sistemas son utilizados en geodesia, navegación, cartografía y sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) para la correcta georreferenciación de elementos en la superficie terrestre, estos sistemas son necesarios dado que la tierra no es una esfera perfecta.

Los sistemas de referencia geodésicos se dividen en “Sistemas Locales” que utilizan para su definición un elipsoide determinado y un Datum y los “Sistemas Globales” cuyos parámetros están dados por una terna rectangular (X, Y, Z) cuyo origen se encuentra en el geocentro terrestre, para definir las coordenadas geodésicas (longitud y altura) cuentan con un elipsoide de revolución asociado en la realidad tanto el centro como los ejes son inaccesibles en la práctica, ejemplo de los sistemas antes mencionados son:

- SISTEMAS GLOBALES DE REFERENCIA:
 - Elipsoide (Superficie de Referencia)
 - Datum (Punto Fundamental)
- SISTEMAS LOCALES DE REFERENCIA:
 - Elipsoide (Superficie de Referencia)
 - Datum Horizontal (Punto Fundamental)
 - Datum Vertical
 - Proyección Cartográfica

2.2. ELIPSOIDE.

Un elipsoide es, en esencia, una esfera imperfecta. El nombre proviene de la palabra "elipse", que se utiliza para describir una alteración similar a un círculo. A diferencia de las esferas, la longitud, anchura y altura de un elipsoide no todos tienen que ser idénticos. Sin embargo, cualquier plano transversal de la forma debe seguir siendo una elipse o un círculo. Según la Enciclopedia Británica, esto se explica a través de una ecuación matemática que tiene en cuenta tres ejes perpendiculares diferentes que todos se cruzan en el centro de la forma:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1$$

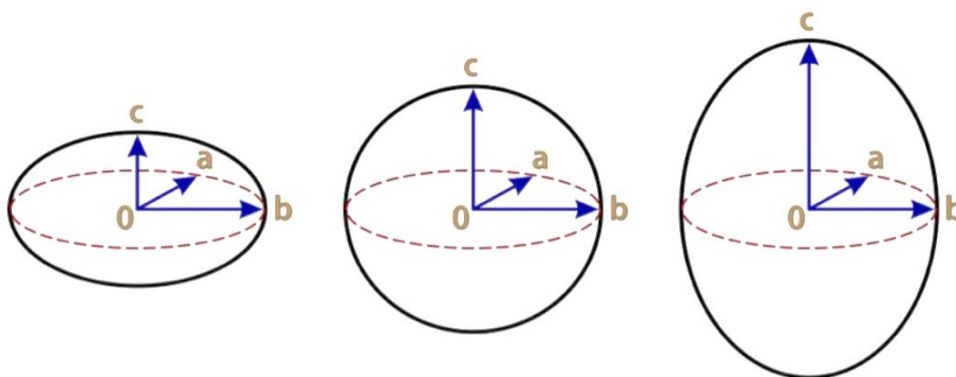


Figura 2.2.1: Representación gráfica de un elipsoide.
Fuente: <https://djiarsmadrid.com/es/blog/dji-news/geoide-vs-elipsoide-cual-es-la-diferencia-y-por-que-es-importante>.

Si a , b y c son todos iguales, la forma es una esfera. Si dos de los tres valores son iguales, la forma es un esferoide, a veces también conocido como elipsoide de revolución, porque cualquier plano transversal de la forma sería una elipse. Los esferoides se dividen en dos categorías. Si los dos valores iguales son mayores que el tercero, la forma es un esferoide de oblato. Mientras tanto, si el valor único del esferoide es mayor que los dos iguales, la forma es un esferoide prolato.

Científicos y matemáticos utilizan el modelo elipsoide para definir con mayor precisión la forma de la Tierra y otros planetas. Un elipsoide que ofrece una aproximación cercana de un planeta se conoce como elipsoide de referencia, según el Consorcio NAVSTAR universitario (UNAVCO). Las mediciones específicas utilizadas para modelar la Tierra se conocen como elipsoide de la tierra.

Aunque la Tierra puede parecer una esfera perfecta en las fotografías satelitales, este no es el caso. En cambio, el planeta es mucho más ancho en el ecuador y aplana cuanto más cerca estás de cada polo, o tiene un solo eje más corto. En otras palabras, la Tierra es una aproximación cercana de un elipsoide esferoide oblato. Aunque no es perfecto, el elipsoide de tierra tiene muchos usos, incluyendo el trazado de coordenadas GPS y rutas de vuelo.

Existen diferentes modelos de elipsoides utilizados en geodesia, denominados elipsoides de referencia, algunos de los elipsoides más utilizados son los siguientes:

Elipsoide	a	F
Airy 1830	6.377.563,396	299,3249646
Bessel 1841	6.377.397.155	299.1528128
Clarke 1866	6.378.206,4	294,9786982
Clarke 1880	6.378.249,145	293,465
Everest 1830	6.377.276,345	300,8017
Fischer 1960 (Mercury)	6.378.166	298,3
Fischer 1968	6.378.150	298,3
G R S 1967	6.378.160	298,247167427
G R S 1975	6.378.140	298,257
G R S 1980	6.378.137	298,257222101
Hough 1956	6.378.270	297,0
Hayford o Internacional	6.378.388	297,0
Krassovsky 1940	6.378.245	298,3
South American 1969	6.378.160	298,25
WGS 60	6.378.165	298,3
WGS 66	6.378.145	298,25
WGS 72	6.378.135	298,26
WGS 84	6.378.137	298,257223563

Tabla 2.2.2: Elipsoides de referencia más utilizados.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya
Sistemas de referencia geodésicos/Modulo 4.

En nuestro país el elipsoide de referencia utilizado desde el año 1962 es el elipsoide de Clarke de 1866. Mientras que el elipsoide de referencia más utilizados actualmente es el descrito en el sistema denominado World Geodetic System 1984 (WGS 84 desarrollado por el Departamento de Defensa de los EEUU, y que tiene como origen el centro de masas de la Tierra, Su popularidad se debe a que es el utilizado por el sistema de posicionamiento global por satélite GPS.

2.3. GEOIDE.

Se denomina Geoide al cuerpo definido por la superficie equipotencial del campo gravitatorio terrestre. Es decir, que cualquier cuerpo que se encuentre sobre él siente la misma atracción terrestre. De manera gráfica, el Geoide sería la forma que tomarían los mares de la tierra si pudieran atravesar los continentes.

Aunque cualquier superficie de equipotencial gravitatorio puede ser definida como geoide, por convención se toma como geoide de origen al que más se aproxima a la superficie de los océanos.

La forma del geoide se puede determinar por medio de las siguientes técnicas:

- Medidas de la anomalía gravitatoria a través de mediciones de la intensidad de la gravedad en diversos puntos de la tierra.
- Mediciones astronómicas.
- Medición de las deformaciones producidas en las órbitas de los satélites debido a que la distribución de gravedad no es uniforme.

Ya que el Geoide es una superficie perpendicular a todo punto de dirección vertical, decimos que sirve para definir la dirección de la fuerza de gravedad.

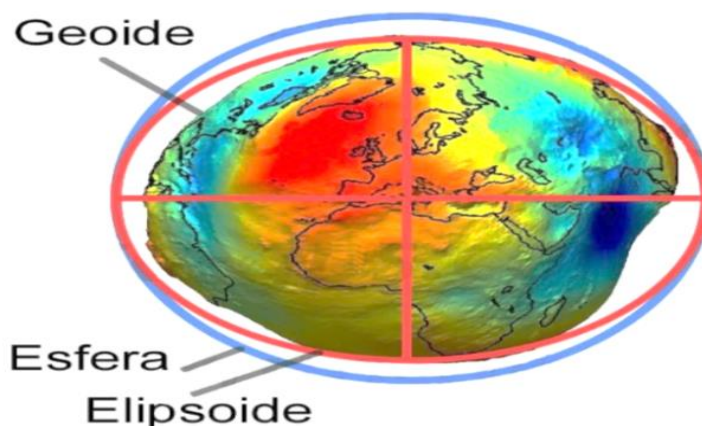


Figura 2.3.1: Relación grafica entre El Geoide, El Elipsoide y una esfera.
Fuente: <https://alfageomatics.com/2019/10/que-es-el-geoide-y-el-elipsoide/>.

2.3.1. ONDULACIÓN GEOIDAL.

Definimos ondulación geoidal (N) a la distancia que existe entre el Geoide y el Elipsoide, siendo esta distancia perpendicular al elipsoide, para la Geodesia, la ondulación geoidal se define como la diferencia entre el geoide y un elipsoide de referencia. Esta variable permite corregir una altura geometría a una altura física o real.

$$H = h - N$$

Donde:

Variable:	Representa:	Descripción
H	Altura ortométrica	Es la altura de la superficie equipotencial hacia la superficie topográfica, esta es perpendicular al geoide,
h	Altura elipsoidal	Es la elevación por encima o por debajo del elipsoide de referencia de nuestro receptor GPS
N	Altura geoide / ondulación	Es el desplazamiento entre las referencias de geoide y elipsoide; encontramos N en el modelo de geoide

El elipsoide es una superficie matemática y por tanto es perfecta, el geoide por el contrario está influenciado por la gravedad y por tanto es deformable y difícil de modelizar.

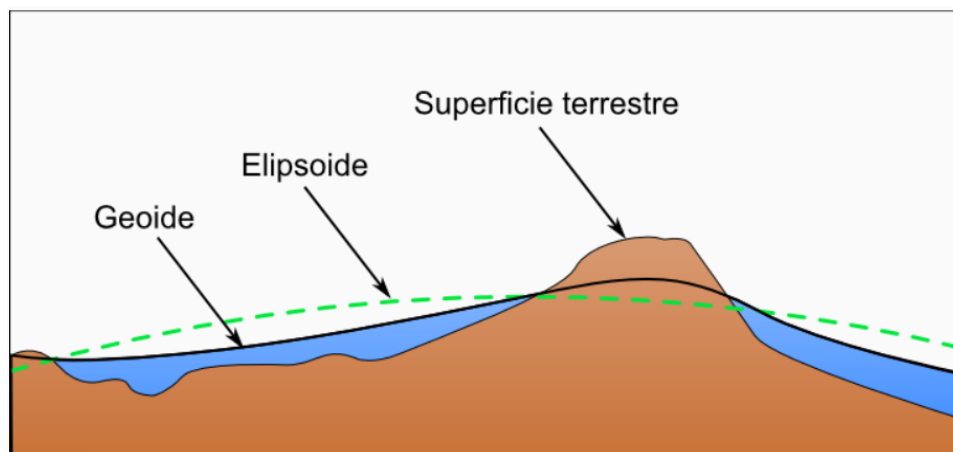


Figura 2.3.1.1: Relación gráfica entre El Geoide, El Elipsoide y La Superficie Terrestre.

Fuente: <https://alfageomatics.com/2019/10/que-es-el-geoide-y-el-elipsoide/>.

La siguiente imagen muestra gráficamente la ondulación geoidal para El Salvador:

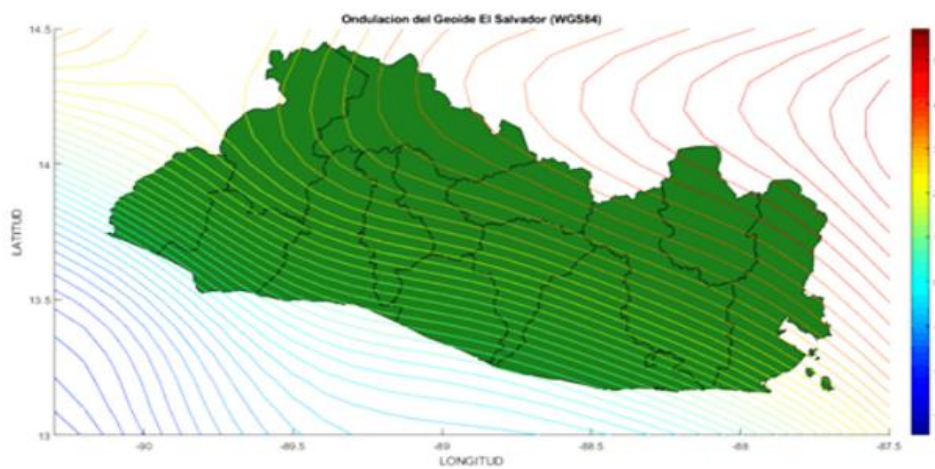


Figura 2.3.1.2: Representación gráfica de la Ondulación Geoidal en El Salvador.

Fuente: <https://alfageomatics.com/2019/10/que-es-el-geoide-y-el-elipsoide/>.

Los valores de ondulación geoidal que son cercanos a cero se encuentran cerca de la línea de costa sur del país, congruente con el hecho de que el geoide representa es superficie equipotencial idealizada por el nivel del mar y es mayor hacia el norte donde se encuentran los macizos montañosos de Chalatenango.

2.4. MODELOS GRAVITACIONALES DE LA TIERRA.

Los Modelos Gravitacionales de la Tierra (EGM) son una serie de modelos geopotenciales de la Tierra publicados por la Agencia Nacional de Inteligencia Geoespacial (NGA). Se utilizan como referencia geoidal en el Sistema Geodésico Mundial La NGA proporciona los modelos en dos formatos:

- Como la serie de coeficientes numéricos para los armónicos esféricos que definen el modelo.
- Como conjunto de datos que da la altura del geoide en cada coordenada a una resolución determinada.

Se han publicado tres versiones del modelo: EGM84 con $n = m = 180$, EGM96 con $n = m = 360$ y EGM2008 con $n = m = 2160$, n y m son el grado y los órdenes de los coeficientes armónicos; cuanto más altos son, más parámetros tienen los modelos y más precisos son.

EGM2008 es el modelo a escala mundial más completo y preciso obtenido hasta el momento, disponible en forma de malla de $1' \times 1'$ y de $2.5' \times 2.5'$, hasta en formato GIS de ESRI, con valores de ondulación sobre el sistema WGS.84.

Un test con datos GPS/nivelación de más de 12.000 puntos a nivel global ha demostrado que la precisión de EGM2008 en desviación estándar se encuentra en el orden del decímetro y mucho mejor en precisión relativa, esto representa una mejora significativa en los modelos globales que había hasta el momento.

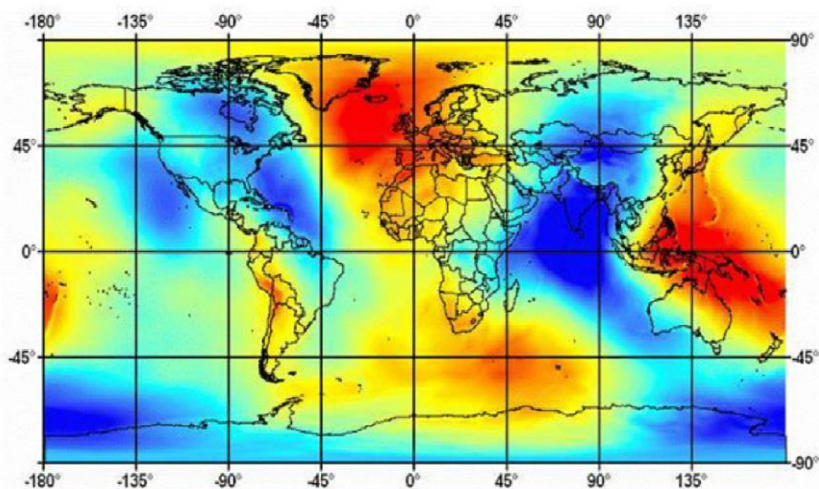


Figura 2.4.1: Modelo Gravitacional de la Tierra EGM2008.
Fuente:http://guiadigital.uam.es/SCUAM/documentacion/fundamentos_alti.php.

Si se cuenta con estos modelos que proporcionan valores de ondulación del geoide con una gran precisión, podrían determinarse altitudes ortométricas con las mejores precisiones, como lo requieren en su mayoría los trabajos que realizan las Instituciones cartográficas y de Ingeniería Civil.

2.4.1. MODELO DE GEOIDE LOCAL.

Son modelos de alta resolución, utilizados en áreas pequeñas por lo que hay gran densidad de datos, comprenden las longitudes de onda corta del campo de gravedad terrestre.

Disponer de una superficie equipotencial de referencia como datum altimétrico preciso o geoide local es de gran importancia puesto que nos permite determinar las altitudes ortométricas de forma eficiente a partir de las altitudes elipsoidales proporcionadas por el Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).

En nuestro país, “para lograr obtener valores de elevación ortométricas con precisión centimétrica, el Instituto Geográfico Nacional, ha desarrollado un

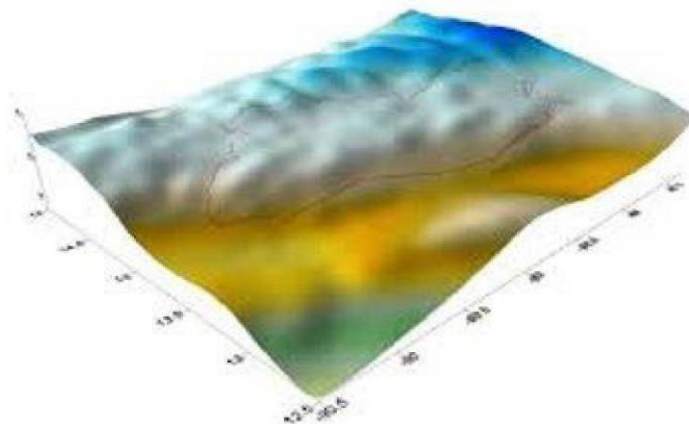


Figura 2.4.1.1: Modelo de Geoide local, ESGeoides.
Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2020)
Modelos Gravitacionales De La Tierra.

modelo geoidal del país en base a la Red Geodésica Básica Nacional SIRGAS_ES2007, denominado ESGeoides. Establecida dicha red y tomando como referencia la Red Nacional de Niveles, se les dio elevación a todos y cada uno de los vértices geodésicos de la red SIRGAS_ES2007.

2.5. DATUM.

Un Datum Geodésico es un sistema de referencia espacial que describe la forma y el tamaño de la tierra y establece un origen para los sistemas de coordenadas, existen dos tipos principales de Datums los horizontales y los verticales. Los Datum horizontales se utilizan para referenciar y ubicar puntos de interés a través de coordenadas (X e Y) y los Datum verticales describen la posición en la dirección vertical y a menudo se basan en la altura sobre el nivel medio del mar.

2.5.1. DATUM LOCAL HORIZONTAL.

Es el Sistema Geodésico que se usa oficialmente en una región emplea un elipsoide determinado que pasa por un punto específico del cual se conocen con exactitud su deflexión astronómica y su gravedad, es decir un punto del

elipsoide coincide con un punto de la superficie terrestre, por ejemplo, el Datum Norteamericano de 1927 (NAD27) cruza la superficie terrestre en el Rancho Meades en Kansas.

El Datum NAD27 fue designado como base para las redes de triangulación de Estados Unidos, México y Canadá desde 1913. El Salvador adoptó en 1962 definitivamente este Datum asociado al Elipsoide de Clarke 1866 y toda la información Geodésica y Cartográfica antigua está referida a dicho Datum.

Existe un gran número de DATUM, se detallan a continuación los más empleados, su zona de aplicación y su elipsoide asociado.

Datum	Area	Nombre del Punto	Latitud ω	Ξ	Longitud λ	η	Elipsoide
Norte América 1927	Norte América	Meades Ranch	39 13 26.686 N	-1.32	98 32 30.506 W	1.93	Clarke 1866
Old Hawaiian	Hawaii	Janu west Base Astro	21 18 13.89 N	0.00	157 50 55.79 W	0.00	Clarke 1866
Qornog	Greenland	Station 7008	64 31 06.27 N	0.00	51 12 24.86 W	0.00	Internacional
Hjorsey 1955	Iceland	Hjorsey	64 31 29.260 N	0.00	22 22 05.840 W	0.00	Internacional
Provisional South American 1956	Venezuela, Ecuador, Peru, Bolivia, Chile	La Canoa	08 34 17.17 N	2.42	63 51 34.88 W	-0.55	Internacional
Corrego Alegre	Brazil	Corrego Alegre	19 50 15.14 S	0.00	48 57 42.75 W	0.00	Internacional
Chua Astro	Paraguay	Chua Astro	19 45 41.16 S	0.00	48 06 07.56 W	0.00	Internacional
Campo Inchauspe	Argentina	Campo Inchauspe	35 58 16.56 S	0.00	62 10 12.03 W	0.00	Internacional
Yacare	Uruguay	Yacare	30 35 53.68 S	0.00	57 25 01.30 W	0.00	Internacional
European 50	Europe	Potsdam, Helmertturm	52 22 51.446 N	3.36	13 03 58.741 E	1.78	Internacional
Odnance Survey of Great Britain 1936	Great Britain: Northern Ireland	Royal Greenwich Observatory, Herstmonceux	50 51 55.271 N	-1.14	00 20 45.882 E	-2.2	Airy
Ireland 1965	Ireland	Royal Greenwich, Herstmonceux	50 51 55.271 N	-1.14	00 20 45.882 E	-2.2	Modified Airy
Merchich	Morocco	Merchich	33 26 59.672 N	0.00	07 33 27.295 W	0.00	Clarke 1860
Voirol	Algeria	Voirol Observatory	36 45 07.9 N	0.00	03 02 49.45 E	0.00	Clarke 1860

Tabla 2.5.1.1: Datum más utilizados, elipsoide asociado y ubicación.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2020)

Sistemas de referencia geodésicos/Modulo 4.

2.5.2. DATUM GLOBAL HORIZONTAL.

Un DATUM geodésico mundial está definido por el tamaño, forma y orientación de un elipsoide y la ubicación del centro de éste con respecto al centro de la tierra, los datum globales más utilizados y precisos son el WGS84 y el GRS80 ambos son geocéntricos, es decir su origen es el centro de masa de la tierra.

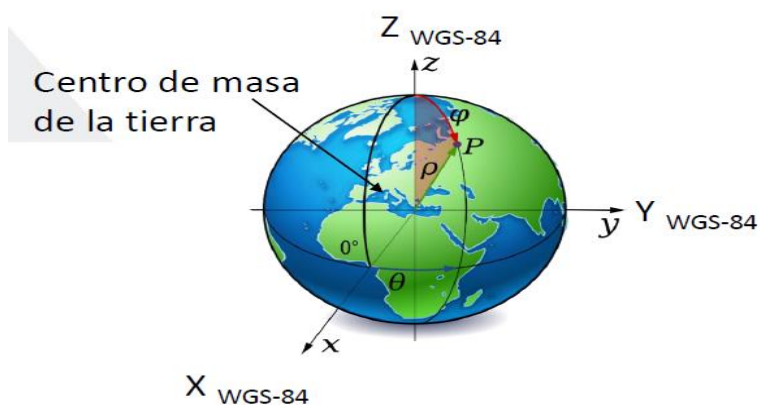


Figura 2.5.2.1: Sistema de referencia WGS-84.
Fuente: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Datumdem.svg>.

2.5.3. DATUM VERTICAL.

Un datum vertical es una superficie de elevación cero a la que se refieren las alturas de varios puntos. Tradicionalmente, los datum verticales han utilizado métodos topográficos clásicos para medir las diferencias de altura (es decir, la nivelación geodésica) para adaptarse mejor a la superficie de la tierra.

El Nivel Medio del Mar NMM es la superficie de referencia que se adopta como Datum, la Altura de cada banco de nivel o banco de Marca (se define como la distancia vertical entre ésta y la superficie de referencia).

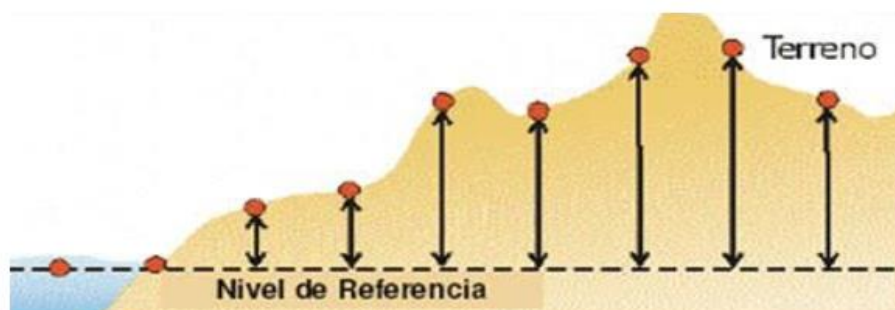


Figura 2.5.3.1: Ilustración del NMM utilizado como superficie de referencia.
Fuente: https://www.inegi.org.mx/temas/rgnp_vertical/.

Sobre los Bancos de Nivel se realizan nivelaciones de precisión para determinar su Altura con respecto a una superficie de referencia (Datum Vertical).



Figura 2.5.3.2: Ilustración de un banco de marca (BM).
Fuente: <https://idi.com.gt/topografia-y-geodesia/>.

El Datum Vertical se define como la altura cero y es representado por las aguas marinas en reposo y continuadas por debajo de los continentes; para su determinación precisa son necesarias observaciones mareográficas continuas de la fluctuación de las mareas en estaciones mareográficas durante un periodo de casi 20 años.

El Sistema de Referencia Vertical para El Salvador, fue establecido como parte de un Ajuste realizado por el Servicio Geodésico Interamericano IAGS que incluyó desde el sur de México, cubriendo Guatemala, Honduras y El Salvador y se basó en observaciones tomadas en la Estación mareográfica localizada en el antiguo Puerto de Cutuco en el departamento de La Unión en 1960 por lo que es conocido como Datum La Unión y a partir de este se crea la Red de Nivelación Geodésica de El Salvador.



Figura 2.5.3.3: Red de Nivelación Geodésica de El Salvador.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya

Centro Nacional de Registros /Instituto Geográfico y Del Catastro Nacional.

2.6. PROYECCIONES CARTOGRÁFICAS.

En geografía, una proyección cartográfica es una manera de representar visualmente una porción de la corteza terrestre, que realiza una equivalencia entre la curvatura natural del planeta y la superficie plana de un mapa. Consiste, fundamentalmente, en “proyectar” una representación tridimensional a una bidimensional, distorsionando lo menos posible las proporciones originales para construir una representación espacial que sea fiel a las proporciones de la curvatura del planeta convirtiendo las coordenadas geográficas (Latitud y Longitud) en coordenadas planas (X, Y). La proyección no puede hacerse sin un

cierto margen de error, de modo que las proyecciones se estudian con el fin de disminuir la distorsión en la medida de lo posible y preservar, sobre todo, los tres aspectos fundamentales de un mapa: la distancia, la superficie y la forma.

Existen distintas proyecciones cartográficas, es decir, distintos métodos y procedimientos para representar bidimensionalmente las dimensiones de la Tierra o de una porción de su superficie, las proyecciones cartográficas presentan rasgos característicos que tienen que ver con el tipo de transformación o el procedimiento geométrico empleado para hacerla, las proyecciones cartográficas pueden tener una o dos de las siguientes tres propiedades:

- **Equidistancia:** La proyección es fiel a las distancias del original, es decir, no las agranda ni las achica, sino que mantiene su proporción en la escala correspondiente.
- **Equivalencia:** La proyección es fiel a las áreas de las superficies del original, es decir, no distorsiona los tamaños y las dimensiones de las superficies.
- **Conformidad:** La proyección es fiel a las formas y los ángulos del original, es decir, no distorsiona la silueta o la apariencia de la superficie representada.

En cada proyección se busca cumplir con estas tres propiedades fundamentales, aunque se sacrifique alguna más que otra, para clasificar las proyecciones cartográficas, generalmente se utiliza el criterio de la figura geométrica que la inspira, esto es, si la proyección es cilíndrica, cónica, acimutal o si combina aspectos de estas tres categorías.

- **Proyecciones Cilíndricas:** Como su nombre lo indica, son las proyecciones que emplean un cilindro imaginario como superficie del mapa. Ubicado de manera secante o tangente a la superficie esférica del planeta, este cilindro cuenta con buena conformidad (respeto las formas), pero a medida que nos alejamos del ecuador, se produce una mayor y más notoria distorsión en cuanto a distancias y superficies. Aun así, al preservar la perpendicularidad entre meridianos y paralelos, es un tipo de proyección sencilla y útil, muy empleada en la navegación.
- **Proyecciones Cónicas:** De manera similar a las cilíndricas, estas proyecciones se obtienen al ubicar la esfera terrestre dentro de la curvatura interior de un cono tangente o secante imaginario, sobre el cual se proyectarán los paralelos y los meridianos. Este tipo de proyecciones tienen la virtud de tornar los meridianos en líneas rectas que parten del polo, y los paralelos en circunferencias concéntricas dentro del cono. El mapa obtenido es ideal para representar las latitudes medias, porque presenta mayor distorsión a medida que se avanza hacia los polos.
- **Proyecciones Azimutales o Planas:** Se obtienen colocando la esfera terrestre sobre un plano imaginario, tangente a la esfera misma, sobre el cual se proyectan los meridianos y los paralelos. Estas proyecciones son idóneas para conservar la relación entre los polos y los hemisferios, por lo que son fieles en las regiones de altas latitudes; pero presentan una creciente distorsión cuanto mayor sea la distancia entre el punto tangencial del plano y de la esfera, de modo que no son idóneas para representar fielmente la región ecuatorial.

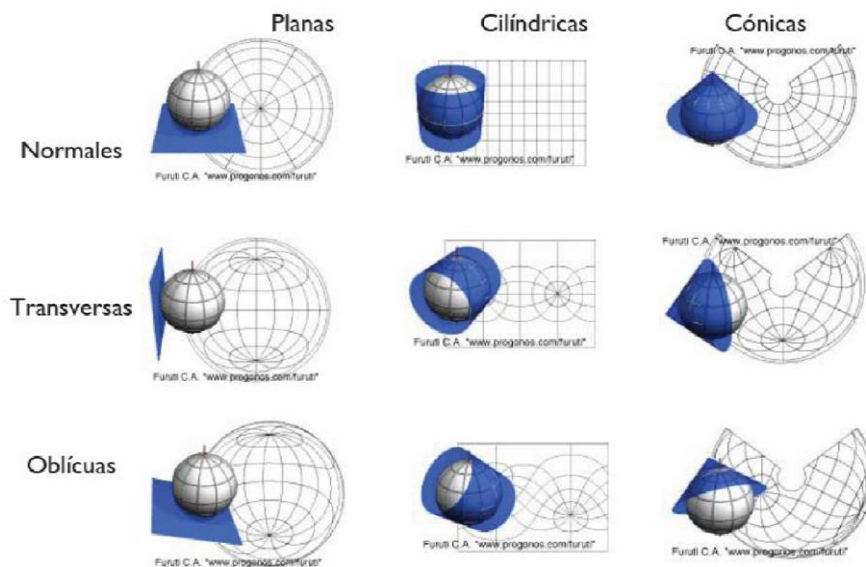


Figura 2.6.1: Proyecciones cartográficas según tipo de superficie y orientación.

Fuente: <https://losmapasmolanmil.wordpress.com/2018/05/30/proyeccion-es-cartograficas/>.

Las principales y más conocidas proyecciones cartográficas de la Tierra son:

- **La Proyección de Mercator:** Creada por el geógrafo y matemático alemán Gerardus Mercator (1512-1594) en 1569, es una de las proyecciones terrestres más utilizadas de la historia, sobre todo en la confección de mapas para la navegación durante el siglo XVIII. Es una proyección de tipo cilíndrica, práctica y sencilla, pero que deforma las distancias entre los meridianos y paralelos terrestres al convertirlos en líneas paralelas, lo que aumenta la distancia entre uno y otro conforme se avanza hacia el polo.

La proyección UTM toma como base la proyección de Mercator y esta corresponde a un sistema de proyección cilíndrico transversal, con características de conformal a nivel local. En este sistema el globo se divide

en 60 zonas o husos, cada una abarcando 6 de Longitud Cada zona tiene su meridiano central Los límites en el eje ordenado se establecen en 84 N y 80 S. En la práctica la UTM es un sistema secante con líneas (de distancia verdadera a ambos lados del meridiano central 180 Km a cada lado).

- **La Proyección de Lambert:** También llamada “Proyección conforme de Lambert” para distinguirla de otras proyecciones realizadas por el físico, filósofo y matemático Franco Alemán Johann Heinrich Lambert (1728-1777), se trata de una proyección cónica creada en 1772. Se obtiene utilizando dos paralelos de referencia que intersecan al globo terrestre y hacen las veces de lados del cono, lo que permite una nula distorsión a lo largo de los paralelos, aunque esta distorsión aumenta al alejarse de ellos. Los meridianos, en cambio, se convierten en líneas curvas de gran exactitud.

En El Salvador, se utiliza la Proyección Cónica Conforme Lambert asociada al elipsoide de Clarke 1866.

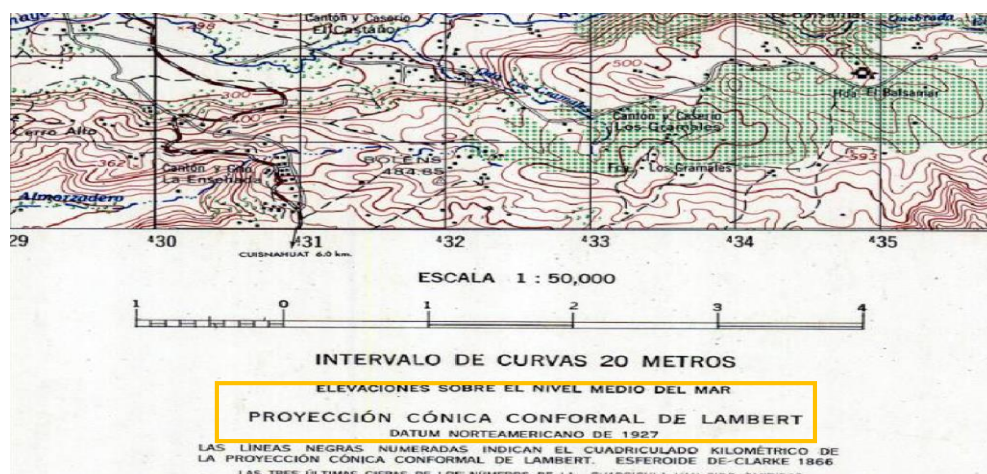


Figura 2.6.2: Proyección Cónica Conforme Lambert en cuadrante Cartográfico.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya.

Proyecciones Cartográficas/Modulo 6.

2.7. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO MODERNO.

El Sistema Internacional de Referencia Terrestre (ITRS) es el Sistema de Referencia del Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistema de Referencia IERS establecido para la determinación de los sistemas de referencia celeste ICRS y terrestre ITRS y la relación entre los dos sistemas, o sea la orientación y rotación de la tierra en el espacio Internacional.

El Marco de Referencia Terrestre Internacional (ITRF) es la materialización del ITRS por estaciones en la superficie terrestre (aproximadamente 400 puntos) con sus valores de coordenadas muy precisas dadas para una época fija y sus variaciones en el tiempo (Sirve para la determinación de las orbitas de los satélites GPS del servicio GNSS Internacional IGS).

El ITRF está formado por coordenadas cartesianas y velocidades de una serie de estaciones equipadas con técnicas de observación espacial (VLBI, SLR, LLR, GPS desde 1991 y DORIS desde 1994).

El Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS) es el Sistema de Referencia Regional, densificación del ITRF inicialmente establecido para América del Sur y luego extendido al Caribe, Norte y Centro América, en el año 2000 Actualmente tiene un promedio de 200 estaciones de operación continua.

- SIRGAS como sistema de referencia se define como idéntico al Sistema Internacional de Referencia (ITRS).
- SIRGAS como marco de referencia es una densificación regional del Marco Internacional de Referencia Terrestre (ITRF).

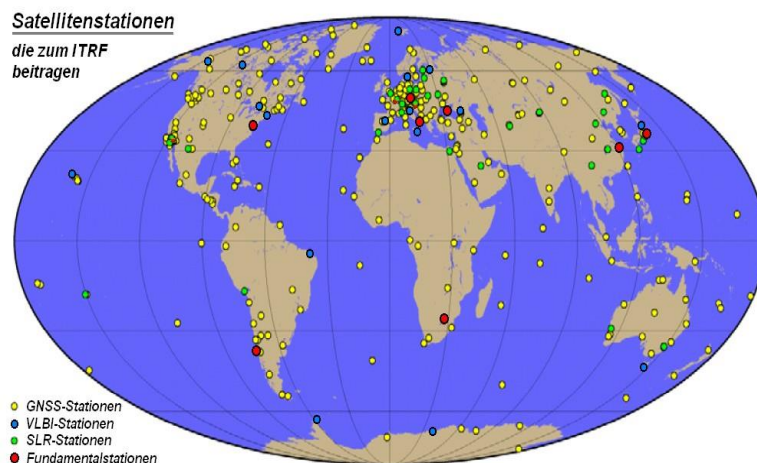


Figura 2.7.1: Ilustración de estaciones de monitoreo que conforman el ITRF.

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:ITRF-Fundamental-u.Satellitenstationen,46_po.jpg.

2.8. SISTEMA DE REFERENCIA GEODÉSICO LAMBERT SIRGAS ES-2007.08.

El Marco de Referencia es la materialización de un Sistema de Referencia convencional a través de observaciones, es decir, se trata de un conjunto de puntos (lugares localizados en la superficie terrestre) con coordenadas y velocidades conocidas en ese sistema de referencia convencional y que sirven para materializar en el espacio el sistema de referencia.

Por medio de SIRGAS, con el apoyo del Instituto Alemán de Ciencias Geodésicas (DGFI), se ha calculado la nueva Red Geodésica Básica Nacional SIRGAS_ES2007, obteniéndose una precisión de 7 mm en el componente horizontal y 20 mm en el vertical, utilizando para ello estaciones de la red SIRGAS-CON, con esto se tiene la base para la adopción de un nuevo Sistema de Referencia Horizontal en reemplazo del actual NAD-27.

Este Sistema de Referencia permite hacer uso de tecnología moderna como el GNSS, sensores remotos de alta precisión y drones que permiten hacer proyectos de ingeniería en menor tiempo con una alta precisión en las mediciones efectuadas optimizando tiempo y recursos.

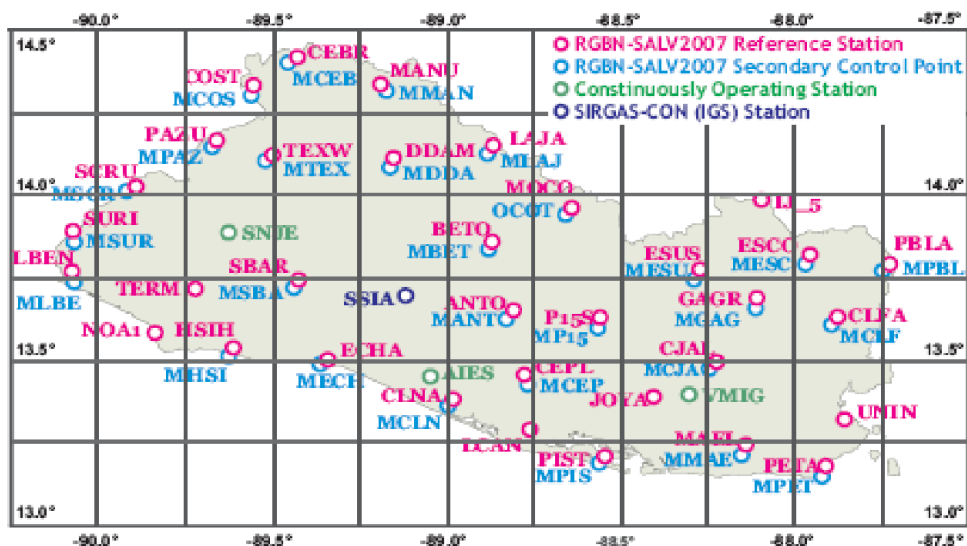


Figura 2.8.1: Ilustración del Sistema de referencia Lambert SIRGAS ES-2007.08

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya

Centro Nacional de Registros Instituto Geográfico y del Catastro Nacional.

2.9. SISTEMA GLOBAL DE NAVEGACIÓN SATELITAL (GNSS).

Los Sistemas Globales de Posicionamiento asistidos por satélites están formados por tres partes: segmento espacial, compuesto por satélites con relojes de excelente precisión, que transmiten señales de radio; segmento de control, formado por estaciones de monitorización y control de los satélites; y el segmento de usuario, englobado por los receptores que determinan la localización del usuario final. Y sirven para que dispositivos electrónicos determinen su posición (longitud, latitud, y altitud) con errores de algunos metros o incluso centímetros, y ofrecen una escala de tiempo atómico global.

En la actualidad podemos hablar de cuatro sistemas:

- El Sistema Global de Posicionamiento con ayuda de Satélites de la constelación americana NAVSTAR (NAVigation System by Timing And Ranging) recibe el nombre de Sistema de Posicionamiento Global o GPS.
- Al Sistema de Navegación Global con Satélites rusos se le llama GLONASS, Desarrollado por la Antigua Unión Soviética, siendo hoy administrado por la Federación Rusa y que constituye el homólogo del GPS estadounidense.
- GALILEO es el Sistema Europeo de Radionavegación y Posicionamiento por satélite desarrollado por la Unión Europea (UE) conjuntamente con la Agencia Espacial Europea. Este dota a la Unión Europea de una tecnología independiente del GPS estadounidense y del GLONASS ruso. Al contrario de estos dos, es de creación, gestión y uso civil.
- El Sistema de Navegación BEIDOU es un proyecto desarrollado por la República Popular de China para obtener un sistema de navegación por satélite.

El funcionamiento de los sistemas de navegación por satélite se basa en la medida de las distancias existentes entre el receptor cuya posición se quiere determinar y un conjunto de satélites cuya posición se conoce con gran precisión. Este proceso es muy conocido en el entorno topográfico pues se conoce como trilateración inversa 3D. Para medir estas distancias existen tres métodos: medida del desplazamiento Doppler, medida basada en retardos temporales o medida por pseudodistancias, y medidas basadas en diferencia de fase.

La constelación satelital más utilizada en nuestro país es la GPS y se compone así:

2.9.1. SEGMENTO ESPACIAL.

El Segmento Espacial de GPS consta de una constelación de 24 satélites que se encuentran distribuidos en 6 planos orbitales circulares a 20,200 Km de altura. A esta altura, los satélites dan una vuelta completa a la Tierra en 11 horas con 58 minutos. Cada órbita alberga a 4 satélites uniformemente espaciados y tiene una inclinación de 55 grados con respecto al Ecuador.

Los 24 satélites aseguran una cobertura mundial a través de garantizar que al menos haya 4 satélites en todo momento sobre cualquier región de la Tierra para llevar a cabo una localización con una velocidad de la señal de 300,000 Km/seg y un tiempo en recibir la señal de 0.07 seg.

- **FRECUENCIA DE LA SEÑAL:** La constelación GPS transmite en tres frecuencias diferentes de la banda L de radiofrecuencia: L1, L2 y L5. Las frecuencias para cada caso son las siguientes:
 - L1: 1575.42 MHz: Esta portadora se utiliza para proporcionar el código de Adquisición Aproximada (C/A o Coarse Acquisition) y los códigos de cifrado de precisión P (Y). También se utiliza para transmitir la señal L1C (L1 Civil) y los códigos militares (M) en los satélites del Bloque III.
 - L2: 1227.60 MHz: Esta señal se utiliza para transportar el código P (Y), así como la señal L2C y códigos militares en los satélites del Bloque IIR-M y satélites posteriores.
 - L5: 1176.45 MHz: Se está proponiendo esta señal GPS para uso civil como una señal de salvaguardia de vida.

- **CÓDIGOS:** Las frecuencias son portadoras de distintos códigos de modulación:
 - Código C/A (Coarse/Adquisition) Adquisición rápida
 - Código P (Precise) Preciso

- Mensaje de Navegación, contiene la información de las coordenadas de los satélites (Efemérides), datos del Almanaque y parámetros Ionosféricos.

2.9.2. SEGMENTO CONTROL.

El Segmento de Control GPS consiste en una red global de instalaciones terrestres que rastrean los satélites GPS, monitorean sus transmisiones, realizan análisis y envían comandos y datos a la constelación. El Segmento de Control Operacional (OCS) actual incluye una estación de control maestra, una estación de control maestra alternativa, 11 antenas de comando y control y 16 sitios de monitoreo.

El segmento de control monitorea y controla la constelación GPS. Su propósito es garantizar que los satélites GPS envíen los mensajes correctos en el momento adecuado, diagnosticar el funcionamiento de cada satélite y colocar nuevos satélites cuando sea necesario.

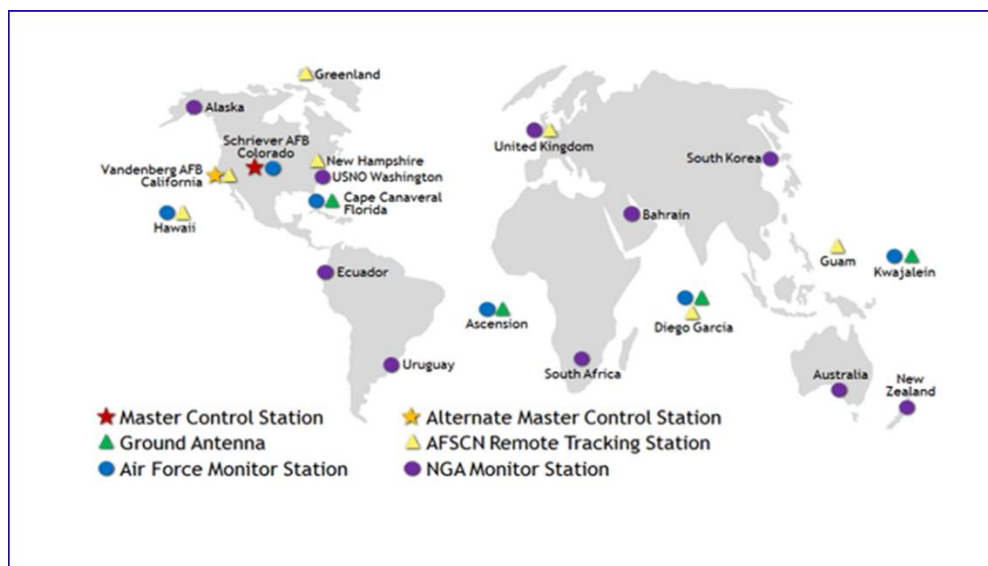


Figura 2.9.2.1: Ubicación de estaciones de monitoreo del sistema GPS.
Fuente: <https://www.gps.gov/systems/gps/control/>.

2.9.3. SEGMENTO USUARIO.

Lo constituyen todos los receptores GPS y sus programas de procesos de datos (Software). Los receptores de GPS se pueden clasificar en:

- **RECEPTORES DE NAVEGACIÓN:** Son receptores usualmente de tamaño pequeño y portátiles. Debe de tenerse en cuenta que estos equipos no son aptos para el uso de las técnicas GPS diferenciales, solamente para navegación. Precisión: 3 a 10 metros, almacenan en su memoria los datos observados denominados Waypoint.
- **GPS GEODÉSICOS DE UNA FRECUENCIA:** La característica mono frecuencia implica que el receptor recibe la onda portadora L1. Los equipos modernos además reciben la señal de las constelaciones: GLONASS (Satélites Rusos), GALILEO (Satélites Europeos), y BEIDOU (Satélites Chinos). Llegan a precisiones submétricas en distancias de 5 - 10 km entre los dos receptores.
- **GPS GEODÉSICOS DE DOBLE FRECUENCIA:** Los receptores geodésicos de doble frecuencia, reciben la onda portadora (L1-L2 y L5). Los equipos modernos además reciben la señal de las constelaciones: GLONASS (Satélites Rusos), GALILEO (Satélites Europeos), y BEIDOU (Satélites Chinos). Permiten precisiones subcentimétricas para líneas base mayores de 10 km.



Figura 2.9.3.1: Ilustración de receptor de navegación, GPS geodésico de una frecuencia, GPS geodésico de doble frecuencia.

Fuente: <https://netcoretechno.com/catalogo/geoexplorer-serie-3000/>.

2.9.4. FUENTES DE ERRORES GPS.

A pesar de los esfuerzos de los creadores del sistema GPS para hacerlo muy preciso, hay errores que no pueden ser totalmente eliminados pues una gran parte son aleatorios. Estos errores pueden ser clasificados en:

- **Disponibilidad Selectiva (SA):** Es una degradación intencionada de la señal GPS, por razones de seguridad nacional de los EEUU, con el fin de evitar la excesiva precisión de los receptores GPS comerciales modernos.
- **Anti-espionaje (Anti-Spoofing) (A-S):** El efecto Anti-Spoofing es similar al efecto S/A, ya que ha sido concebido con la idea de no permitir que los usuarios civiles y las fuerzas hostiles tengan acceso al código P de la señal GPS, obligándolos a emplear el código C/A, al cual se aplica el efecto S/A.
- **Error de Efemérides:** El usuario en su receptor GPS recibe la señal enviada por el satélite con un retraso de 0.07 segundos a pesar de que la señal viaja a la velocidad de la luz; por tanto, el usuario recibe información satelital presente para el receptor, pero pasado para el satélite.
- **Errores Atmosféricos:** La tropósfera y la ionósfera pueden cambiar la velocidad de propagación de una señal GPS. Debido a las condiciones atmosféricas, la atmósfera refracta las señales de los satélites cuando las atraviesan en su camino hacia la superficie terrestre.
- **Error de Multitrayectoria:** Una posible fuente de error en los cálculos del GPS es el efecto multitrayecto. El multitrayecto se produce cuando la señal del satélite GPS rebota en estructuras cercanas como edificios y montañas.
- **Errores de Dilución de Precisión (DOP):** El indicador de la precisión es un término usado para especificar el efecto multiplicativo adicional de la geometría de navegación por satélite en la precisión de medición de posición.

La dilución de la precisión se subdivide en:

GDOP: (Geometric Dilution Of Precision), que corresponde a la pérdida de precisión durante las observaciones, debido a la Geometría satelital de un tetraedro formado desde el receptor a cuatro satélites.

PDOP: (Posicion Dilution Of Precision), describe el error causado por la posición relativa de los satélites GPS, este indicador va asociado al GDOP el cual se divide en:

- HDOP: Dilución Horizontal de la Precisión (x, y).
- VDOP: Dilución Vertical de la Precisión (z).
- TDOP: Dilución del Tiempo en la Precisión (t).

2.10. TÉCNICAS DE MEDICIÓN CON GPS.

En la práctica, los procedimientos empleados en levantamientos GPS depende de las capacidades de los receptores usados y el tipo de levantamiento. Algunos de los procedimientos más utilizados en campo actualmente son los siguientes:

1. Medición estática.
2. Medición estático rápido.
3. Medición cinemática.
4. Medición en tiempo real (RTK).

Cada uno se basa en mediciones de fases de la onda portadora y usan técnicas de posicionamiento relativo, es decir, que dos (o más) receptores ubicados en estaciones diferentes, hacen observaciones simultáneamente de varios satélites. En vector (distancia) entre receptores se llama línea base y cada una de las técnicas antes mencionadas cuenta con aplicaciones y parámetros de observación o medición distintas y su aplicación dependerá del tipo de trabajo o levantamiento a realizarse.

2.10.1. MEDICIÓN EN TIEMPO REAL (RTK).

El RTK es una técnica utilizada para mejorar la exactitud de un receptor GNSS autónomo. Los receptores GNSS tradicionales, como el de un smartphone, solo pueden determinar la posición con una exactitud de 2 a 4 metros (7-13 pies). El RTK puede proporcionarte una precisión centimétrica.

Los receptores GNSS miden el tiempo que tarda una señal en viajar desde un satélite hasta el receptor. Las señales transmitidas viajan a través de la ionosfera y la atmósfera y se ven ralentizadas y distorsionadas en el camino. Por ejemplo, el tiempo de viaje podría diferir si hay un día nublado o si hay condiciones de cielo despejado. Por eso es difícil para un receptor autónomo determinar con exactitud su posición. El RTK es una tecnología que resuelve este problema. En el RTK se utilizan dos receptores. Uno de ellos está inmóvil, el otro se mueve libremente. Se llaman “Estación base” y “Rover”.

La misión de la base es permanecer en un lugar y enviar correcciones a un receptor en movimiento. El Rover utiliza esos datos para obtener una posición de precisión centimétrica. Se puede conectar cualquier número de Rover a una base si sus ajustes de entrada coinciden con la salida de la base.

Los parámetros de medición son los siguientes:

- Intervalo de Grabación: 10 Seg.
- Máscara: 10°
- Mínimo de Satélites: 4
- Tiempo mínimo de Observación: de 5 a 20 min.

Es importante recordar y verificar que la longitud de las líneas base no debe exceder de 20 km. La precisión a obtener haciendo un uso adecuado de esta técnica es de 5-10 mm \pm 1 ppm.

Algunas de las aplicaciones donde puede ser utilizada esta técnica de medición son:

- Densificación de redes.
- Levantamientos de control, Sustituye a la poligonación.
- Levantamientos de detalles.
- Cualquier trabajo que requiera la determinación rápida de un elevado número de puntos.

CAPÍTULO 3: FOTOGRAMETRÍA CON DRONES.

3.1. HISTORIA DE LA FOTOGRAMETRÍA.

La fotogrametría es la técnica cuyo fin es 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 de ese objeto. (Bonneval).

La Fotogrametría es una de las actividades más emblemáticas ya que comprende la fotografía aérea y la obtención de modelos de elevaciones, siendo información de referencia básica para la realización de la cartografía y la obtención de información geográfica en general: ocupación del suelo, urbanismo, ordenación del territorio, catastro, gestión forestal, hidrología, etc.

Dentro de la historia de la fotogrametría se pueden distinguir cuatro etapas:

3.1.1. LA FOTOGRAMETRÍA ANALÓGICA.

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

nombre de fotogrametría ordinaria y que ahora llamamos fotogrametría analógica. La invención del avión (1902) permitió desarrollar la moderna fotogrametría aérea, haciendo mucho más rentable la restitución de mapas topográficos. Hasta entonces, las fotos que se realizaron estaban limitadas generalmente a la fotogrametría terrestre. El avión se utilizó por primera vez para uso topográfico en 1913.



Figura 3.1.1.1: Fotogrametría analógica.

Fuente: <https://docplayer.com.br/11099787-Unicap-universidade-catolica-de-pernambuco-laboratorio-de-topografia-de-unicap-labtop-topografia-2-fotogrametria-parte-1.html>.

3.1.2. LA FOTOGRAMETRÍA ANALÍTICA.

Se destaca la aparición de los ordenadores electrónicos, que supuso una gran ayuda en el campo de la fotogrametría. Los componentes electrónicos sustituyeron a los componentes mecánicos de los restituidores, y a partir de entonces, muchas de las operaciones realizadas manual o mecánicamente se realizan en ordenadores periféricos. En esta etapa puede destacarse que la toma de información es analógica y el modelado geométrico es matemático. Mediante el uso de un mono-comparador o de un estereocomparador integrado en el restituidor, se miden las coordenadas (x, y) de los puntos pertinentes de las fotografías, coordenadas que son procesadas por los programas del computador del sistema.



Figura 3.1.2.1: Fotogrametría analítica.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Fotogrametr%C3%ADa_digital.

3.1.3. LA FOTOGAMETRÍA DIGITAL.

Comienza con el desarrollo de la aviación en la Primera Guerra Mundial y la necesidad de ambos bandos de obtener fotografías aéreas del campamento contrario. En la fotogrametría aérea la cámara está en movimiento, y para poder efectuar la restitución, es preciso conocer el punto exacto en que se impresiono el fotograma.



Figura 3.1.3.1: Fotogrametría digital con ayuda de la aviación.

Fuente: <https://docplayer.com.br/11099787-Unicap-universidade-catolica-de-pernambuco-laboratorio-de-topografia-de-unicap-labtop-topografia-2-fotogrametria-parte-1.html>.

La revolución del soporte digital ha supuesto para la fotogrametría cambios profundos en:

- **Acceso a las imágenes:** la naturaleza gráfica de las imágenes, y no solo la gráfica, sino de cualquier banda del espectro electromagnético, implica que las fotos pueden ser retocadas adaptándose a las necesidades requeridas, se puede remuestrear de forma sencilla y sin involucrar complicados procesos químicos.
- **Reformulación de disciplinas:** todos los procesos asociados a la nueva imagen digital y a sus nuevas formas de trabajar con ellas han provocado en la fotogrametría una fusión de disciplinas.

La utilización de cámaras de gran formato: Desde el punto de vista de los fundamentos teóricos hay poca diferencia entre esta etapa y la anterior, pues ambas parten del mismo punto (la imagen digital) y terminan en el mismo punto (la cartografía digital). Sin embargo, desde un punto de vista práctico y comercial, las diferencias son enormes, hasta el punto de que podemos decir que las posibilidades abiertas por esta nueva etapa tienen un alcance y repercusión mayores que los de las etapas precedentes.



Figura 3.1.3.2: Fotogrametría digital con cámaras modernas.

Fuente: <https://geobax.com/fotogrametria/>.

3.2. CLASIFICACIONES DE LA FOTOGRAMETRÍA.

El rápido desarrollo tecnológico de la fotogrametría y sus múltiples aplicaciones ha creado la necesidad de separarla o dividirla en grandes agrupaciones según diversos puntos de vista, Así según el tipo y posición espacial de la cámara y su finalidad, la fotogrametría puede clasificarse según Deagostini, 1879 en dos grupos:

- **Fotogrametría aérea.**
- **Fotogrametría terrestre.**

La fotogrametría aérea es la que utiliza vistas aéreas del terreno, tomadas con cámaras métricas, montadas en un avión. Donde el eje óptico de la cámara fotográfica resulta sensiblemente perpendicular al terreno o corteza terrestre.



Figura 3.2.1: Fotogrametría aérea con Drones.

Fuente: <https://fotogrametriaaplicacioningamb.blogspot.com/2015/09/fotogrametria-y-su-relacion-con-la.html>.

La fotogrametría terrestre es la parte de la fotogrametría que utiliza fotografías tomadas desde una posición fija y usualmente conocida sobre el terreno, con el eje de la cámara horizontal o casi horizontal.



Figura 3.2.2: Fotogrametría terrestre.

Fuente: <https://es.slideshare.net/equiros/introduccion-a-la-fotogrametra-terrestre>.

El objetivo fundamental de un sistema fotogramétrico, cualquiera que sea la metodología empleada para su construcción es la obtención de información espacial de objetos a partir de imágenes de estos, en el caso concreto de los Sistemas Fotogramétricos Digitales, a partir de imágenes en formato digital.

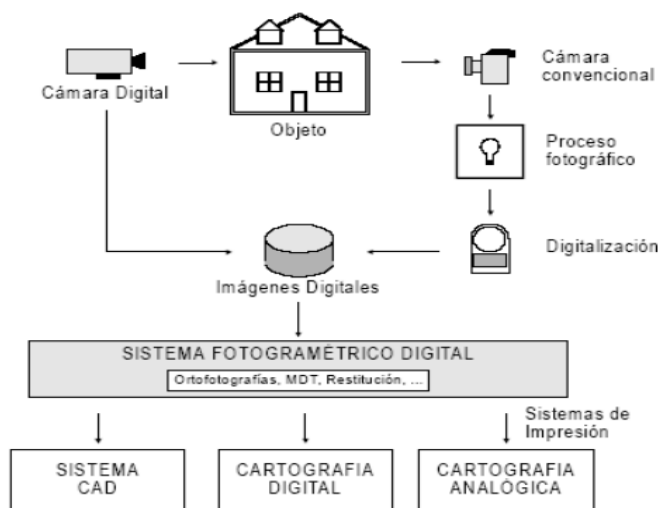


Figura 3.2.3: Sistema fotogramétrico digital.

Fuente: http://dicyg.fi-c.unam.mx:8080/areyes/apuntes/Fotogrametra_Digital.pdf.

3.3. FOTOGRAMETRÍA MEDIANTE EL USO DE DRONES.

En la actualidad son más los trabajos de fotogrametría en los que intervienen los drones. Las resoluciones que ofrecen, el bajo riesgo y la rapidez, son factores decisivos. Aportan mayor valor y resultados finales de calidad.

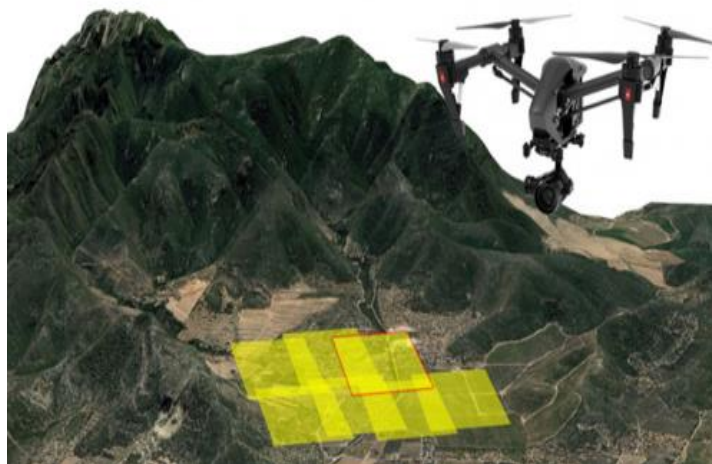


Figura 3.3.1: fotogrametría con el uso de Drones.

Fuente: <http://www.gisandbeers.com/wp-content/uploads/2019/11/Planificaci%C3%B3n-del-plan-de-vuelo-con-drones.jpg>.

La fotogrametría es una técnica que tiene por objetivo estudiar y definir de manera precisa, las dimensiones, forma y posición de un objeto en el espacio. Para ello, utiliza las medidas obtenidas de ese objeto a partir de fotografías que se le han tomado. El uso de drones ha supuesto un gran avance en labores de fotogrametría aérea. Ahora es posible obtener resoluciones mucho mayores, además de aumentar significativamente la rapidez en su realización.

Una vez hechas las fotografías, se crea una nube de puntos georreferenciados, esta nube de puntos se exporta en los formatos estándares para su procesamiento. Esto hace posible la creación de MDT (Modelos Digitales del Terreno) y MDS (Modelos digitales de superficie). Dichos procesos se explicarán detalladamente más adelante.

La mayor parte de los trabajos de fotogrametría que se llevan a cabo utilizando drones son los siguientes:

- **Topografía:** La reproducción de terrenos para la obtención de ortofotografías. Mediante el uso de sistemas de información geográficos, podremos obtener distancias, coordenada, volúmenes, áreas.
- **Arquitectura:** Mediante la creación de un modelo digital de elevaciones, es posible conseguir curvas de nivel y perfiles.
- **Arquitectura y Patrimonio:** En la reproducción de edificaciones para la obtención de un modelo en 3D, entre otros.

Una de las ventajas de este tipo de tecnología en la fotogrametría es la reducción de riesgos para los operarios. Ya que con los drones se hace innecesario que los topógrafos tengan que transitar por terrenos peligrosos. La toma de imágenes se realiza con enorme rapidez comparado con los procesos manuales. Ese ahorro de tiempo también se reduce en ahorro económico.

Gracias a la cantidad de puntos que se pueden obtener, el resultado es absolutamente fiel a la realidad del terreno. Frente a otros medios aéreos (helicópteros o avionetas) las resoluciones obtenidas son mucho mayores. En parte es debido a la posibilidad de realizar vuelos a baja altura ya que así podremos apreciar con bastante resolución los objetos en estudio.

3.4. CARACTERÍSTICAS Y TIPOS DE DRONES.

Dentro de los tipos de drones tenemos:

Drones de Ala Fija: Son aeronaves no tripuladas que vuelan gracias a la sustentación generada por la velocidad de vuelo y la forma de sus alas, es más

eficiente aerodinámicamente hablando, ya que, con la configuración adecuada, puede permanecer bastante tiempo sin necesidad de utilizar el motor gracias al planeo. Utilizado para topografías no tan accidentadas.



Figura 3.4.1: Dron de ala fija.

Fuente: <https://elvelodeldrone.com/drones-profesionales/drones-industriales/drone-de-ala-fija-delair-ux11/>.

Drones de Ala Rotatoria o Multirrotores: Son las aeronaves no tripuladas más conocidas y vendidas en el mercado. Estos drones consiguen la sustentación gracias a las hélices que llevan incorporadas en los extremos de cada brazo. Cada hélice está impulsada por un motor y permite una gran estabilidad durante el vuelo. A diferencia de los drones de ala fija, los multirrotores pueden permanecer quietos sobrevolando en un mismo sitio.



Figura 3.4.2: Dron de ala rotatoria.

Fuente: <https://idc.apddrones.com/drones/drones-multirrotores-vs-ala-fija/>.

VTOL: (Del inglés de Vertical Take-Off and Landing, Off and Landing, «despegue y aterrizaje vertical»), es una fusión entre un Drone de ala rotatoria y un Drone de ala fija. Su innovador sistema de despegue vertical, le permite despegar y aterrizar en cualquier tipo de terreno y cubrir extensiones de terreno considerables. Utilizado generalmente para topografías no tan abruptas.



Figura 3.4.3: Dron de ala fija y rotatoria.

Fuente: <https://www.unmannedsystemstechnology.com/company/plymouth-rock-technologies/xv-long-range-vtol-hybrid-drone/>.

3.5. PROCESO FOTOGRAMÉTRICO DIGITAL.

3.5.1. CAPTURA DE IMÁGENES.

El proceso de captura de la imagen es un proceso fundamental en Fotogrametría y, por tanto, en el proceso cartográfico asociado. Las imágenes del objeto de interés deben ser capturadas y almacenadas para realizar las medidas fotogramétricas aplicando las transformaciones necesarias para pasar del espacio imagen al espacio objeto. Este proceso tradicionalmente se ha basado en la captura de imágenes fotográficas, habitualmente dentro de la zona del visible o infrarrojo, utilizando un sistema de lentes y una película fotográfica en el plano focal para el registro de la proyección perspectiva del objeto. Al respecto es importante tener en cuenta que la Fotografía es una

técnica bien conocida, por lo que la integridad, estabilidad y longevidad de los registros fotográficos es controlable y predecible, siendo el único inconveniente el tiempo requerido para llevar a cabo el proceso fotográfico (revelado-fijado-secado-copiado) y la imposibilidad de modificar.

3.5.2. IMAGEN DIGITAL.

Una imagen digital es una función $F(x, y)$ donde x e y representan unas coordenadas y el valor $F(x, y)$ es proporcional a la transmisión o reflexión de la luz, que se reconoce usualmente por el nivel de color o gris de la misma en el punto considerado. Al proceso de obtención de imágenes digitales se le denomina digitalización y consiste en la descomposición de la imagen real en una matriz discreta de puntos de un determinado tamaño, donde cada elemento recibe un valor proporcional a su nivel de color.

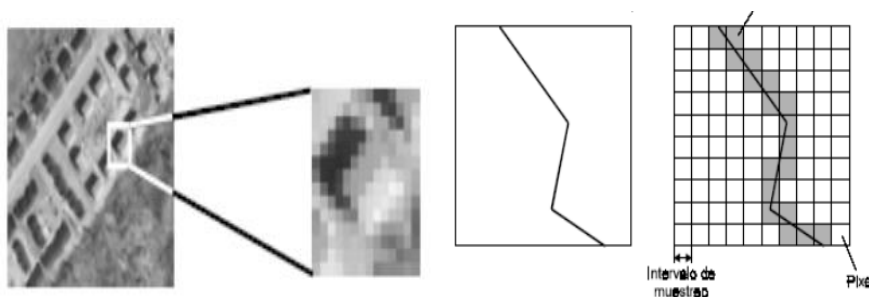


Figura 3.5.2.1: Imágenes Digitales.

Fuente: http://dicyg.fi-c.unam.mx:8080/areyes/apuntes/Fotogrametra_Digital.pdf.

VENTAJAS:

- Las imágenes digitales, por su soporte de almacenamiento carecen de los problemas derivados de la estabilidad dimensional que afecta a las imágenes analógicas cuando se modifican las condiciones medioambientales de su almacenamiento. Por otro lado, al no requerir la manipulación directa a la hora de ser utilizadas se elimina el deterioro producido por esta causa.

- Las imágenes digitales permiten una fácil duplicación y transmisión siendo únicamente necesario disponer de los medios informáticos apropiados.
- Las características de la imagen tales como brillo y contraste pueden ser modificadas mediante el empleo de técnicas de análisis de imágenes, con el objetivo de mejorar la calidad visual de la misma y así favorece la interpretación o bien para poner de manifiesto algún tipo de característica de la imagen.
- Los productos derivados de la Fotogrametría Digital son obtenidos en formato digital por lo que son fácilmente integrables en entornos tipo CAD o SIG.
- La utilización de imágenes digitales permite la automatización parcial del proceso con lo que conlleva de aumento del rendimiento, así mismo permite el trabajo en tiempo real o casi real.

DESVENTAJAS:

- Se trata de una técnica de muy reciente aparición, por lo que en muchos aspectos aún puede estar inmadura.
- Los procesos derivados de la necesidad de un proceso de digitalización. Los sistemas de digitalización aún son muy caros.
- La necesidad de almacenamiento que es muy elevada para los niveles de precisión equivalente a los procesos fotogramétricos analíticos, así una imagen en blanco y negro de 23x23cm digitalizada a una resolución,

expresada como tamaño de pixel de $15\mu\text{m}$ ocupa un espacio en disco superior a los 200 Mb (256 tonos de gris), esta cifra se multiplicará por 3 si el almacenamiento se realiza en color real (16.7 millones de colores). Es importante tener en cuenta que en un proyecto se manejan un número considerable de imágenes por lo que los volúmenes de almacenamiento requeridos son importantes.

3.5.3. TIPOS DE SENSORES.

- **CÁMARAS RGB:** Captura imágenes en el espectro visible (RGB), es utilizada para levantamientos topográficos. La resolución esta expresada por el número de pixeles, las más usadas son de 12MP, 20MP, 24MP, 36 MP y 42MP, entre mayor resolución mayor cobertura de área.



Figura 3.5.3.1: Cámara de tipo RGB.

Fuente: <https://grupoacre.ca/catalogo-categoria/camaras-de-imagen-real-para-dron/>.

- **DISTANCIA FOCAL:** Generalmente representada en milímetros, es la descripción básica de un lente fotográfico. No es una medida de la distancia real de un lente, sino que es un cálculo de la distancia óptica desde el punto en donde los rayos convergen hasta formar una imagen nítida de un objeto para el sensor digital. La distancia focal indica el ángulo de visión, es decir, cuanto se captura de la escena. Mientras más larga sea la distancia focal, más estrecho será el ángulo de visión y mayor

será el aumento. Mientras más corta sea la distancia focal, más ancho será el ángulo de visión y menor será el aumento.

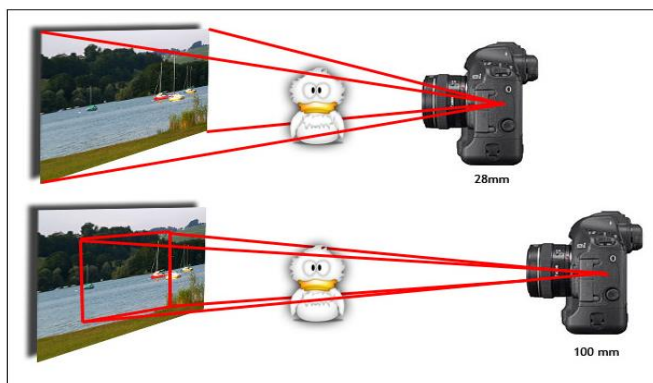


Figura 3.5.3.2: Representación de la distancia focal.

Fuente: <http://www.thewebfoto.com/2-hacer-fotos/203-distancia-focal>.

- **CÁMARA MULTIESPECTRAL:** Una cámara multiespectral, como su propio nombre indica, es una cámara que es capaz de captar varios espectros de luz. Las cámaras multiespectrales que se montan en los drones son de pequeñas dimensiones y pueden llegar a tomar valores de hasta 6 bandas espectrales.



Figura 3.5.3.3: Cámara multiespectral.

Fuente: http://scandrone.es/Ampliacion_Fotografia_Multiespectral.html.

- **CÁMARA TÉRMICA:** Captura imágenes en radiación calorífica que emite un cuerpo, utilizada para extinción de incendios, agricultura, inspección de tejados, líneas eléctricas, torres de telefonía móvil, seguridad y zonas de difícil acceso.



Figura 3.5.3.4: Cámara térmica.

Fuente: <https://grekkom.com/que-es-y-como-funciona-una-camara-termica/>.

- **LIDAR:** Las iniciales de las palabras inglesas “Laser Imaging Detection and Ranging” son las que dan el nombre a la tecnología LIDAR. Así es como se llama a un mecanismo que ha renovado la forma en que construimos nuestro mundo. Su traducción en español significa “Detección por luz y distancia”.



Figura 3.5.3.5: Cámara con LIDAR.

Fuente: <https://wingtra.com/drone-photogrammetry-vs-lidar/>.

Este tipo de dispositivo emite un haz de luz láser que se usa para escanear. La distancia a la que se encuentran los objetos se calcula a través del tiempo que la luz tarda en ir y volver desde su objetivo. Como se pueden escanear miles de puntos por segundo es posible crear mapas de alta precisión.

La característica de la tecnología LIDAR es que el dispositivo láser debe ser aerotransportado. Este requerimiento se debe a que el escáner funciona con dos movimientos. El desplazamiento longitudinal corresponde al desplazamiento del dispositivo volador y el movimiento transversal es generado por el propio dispositivo que usa un espejo móvil para orientar el haz de luz.

3.6. FACTORES PARA LA REALIZACIÓN DE UN LEVANTAMIENTO FOTOGRAMÉTRICO CON DRONES.

3.6.1. EVALUACIÓN DE LA ZONA DE TRABAJO.

Este es un factor muy importante y de ser posible debe ser realizado de manera presencial, siendo un estudio preliminar de la información que se posee. En este estudio se identificarán pendientes, presencia de vegetación y otros factores que podrían generar dificultades al realizar el levantamiento.

3.6.2. PUNTOS DE CONTROL.

Conocidos técnicamente como Puntos de Control Fotogramétricos (PCF). Para ello se marcan puntos sobre el área donde se hará el levantamiento con ayuda de un GPS diferencial, los cuales permitirán orientar el modelo digital de superficie a un sistema de coordenadas locales o globales de manera que alcance su correcta georreferenciación.



Figura 3.6.2.1: Puntos de Control fotogramétricos (PCF) para el levantamiento.
Fuente: Propia.

3.6.3. PLAN DE VUELO.

El plan de vuelo es un fichero georreferenciado que indica cuantas pasadas deben ser realizadas sobre el terreno de manera que se cubra la zona en su totalidad. Este fichero debe incluir, además del número de pasadas, información como: altitud, altura, velocidad de vuelo, el ángulo de visión (FVO), la huella de registro, que es la zona o terreno que será registrado. También se debe incluir el solape, es decir, la huella o la repetición de un objeto en un número de fotografías, se aconseja que este valor sea mayor al 80%.

3.6.4. EJECUCIÓN DEL VUELO.

Es indispensable que las condiciones meteorológicas sean las mejores, evitando a la lluvia y el viento ya que, podrían alterar la calidad de las fotografías, además se deben tomar la consideración la duración de la batería del dron para cubrir la superficie máxima posible. Para programar el vuelo se debe precargar la información en el dron que será usado ayudándose de una aplicación externa, las cuales se mencionan a continuación:

- DroneDeploy
- Map Pilot
- Pix4d Capture
- UGCS
- Litchi
- Mission Planner



Figura 3.6.4.1: Realización del vuelo fotogramétrico con Dron.
Fuente: Propia.

3.6.5. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN.

Una vez realizado el trabajo de campo con la captura de las fotografías por parte del dron, la siguiente etapa es el procesamiento de la información para ello se debe emplear un software como Agisoft Metashape u otro (Dichos software se explicarán más adelante) que procese las fotografías.

3.6.6. PRESENTACIÓN.

Finalmente, la información procesada es almacenada en un formato que se adapte a su necesidad, dichos formatos pueden ser: CAD, SIG o PDF.

3.7. DISTANCIA DE MUESTREO TERRESTRE (GSD).

La distancia de muestreo del suelo (GSD) es la distancia entre dos centros de píxeles consecutivos medidos en el suelo. Cuanto mayor sea el valor de la imagen GSD, menor será la resolución espacial de la imagen y los detalles menos visibles.

El GSD se calcula en base a:

- La altura de vuelo / la distancia desde el terreno u objeto (H).
- Las especificaciones de la cámara:
- Ancho de la imagen (ImW).
- Ancho del sensor (SW).
- Distancia focal (F)

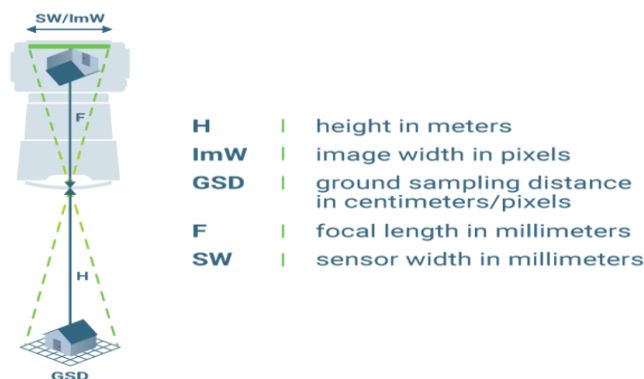


Figura 3.7.1: Distancia de muestreo terrestre (GSD).
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Es importante decidir el valor GSD antes de comenzar la adquisición de imágenes para ajustar la altura de vuelo y las especificaciones de la cámara a los requisitos del proyecto. Por ejemplo, cuando se necesita una reconstrucción detallada del área, recomendamos volar más cerca (bajo GSD) del objeto de interés. Por otro lado, al cubrir grandes áreas que no necesitan resultados muy detallados, volar más alto (GSD alto) puede reducir en gran medida el tiempo de adquisición y las

baterías necesarias, así como reducir el tiempo de procesamiento. Incluso volando a una altura constante, las imágenes de un proyecto pueden no tener el mismo GSD. Esto se debe a las diferencias de elevación del terreno y a los cambios en el ángulo de la cámara durante el disparo. Dado que el ortomosaico se crea utilizando la nube de puntos 3D y las posiciones de la cámara, se calculará y utilizará un GSD promedio.



Figura 3.7.2: Distancia de muestreo terrestre (GSD).
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

- Un GSD de 5 cm significa que un píxel en la imagen representa linealmente 5 cm en el suelo ($5 \times 5 = 25$ centímetros cuadrados).
- Un GSD de 30 cm significa que un píxel en la imagen representa linealmente 30 cm en el suelo ($30 \times 30 = 900$ centímetros cuadrados).

3.8. TIPOS DE MISIONES PARA FOTOGRAMETRÍA.

Pix4Dcapture ofrece la posibilidad de volar cinco tipos diferentes de misiones de piloto automático y una misión manual pero semiautomática. Para obtener los mejores resultados del plan de adquisición de imágenes, se debe elegir el tipo de misión y el dron en función del terreno/objetos que deben reconstruirse. A continuación, se mencionan:

3.8.1. CUADRÍCULA (GRID).



Figura 3.8.1.1: Misión cuadrícula para un vuelo fotogramétrico.
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Adecuado para la mayoría de los entornos. Garantiza que las imágenes se tomen con la superposición necesaria para un procesamiento óptimo.

Recomendado en los siguientes casos:

- Principal interés en salidas de mapas 2D (DSM, ortomosaico, etc.).
- Superficie relativamente plana (por ejemplo, campos, movimiento de tierras).
- Áreas grandes.

3.8.2. CUADRÍCULA DOBLE (DOUBLE GRID).

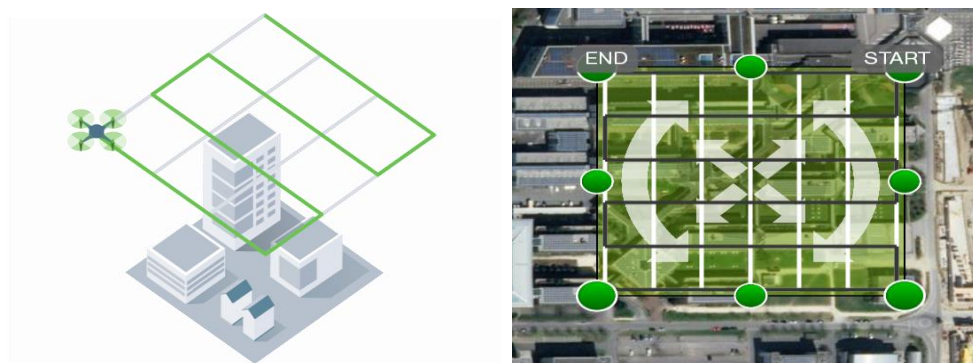


Figura 3.8.2.1: Misión cuadrícula doble para un vuelo fotogramétrico.
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Garantiza que las imágenes se tomen desde varios lados, con la superposición necesaria para un procesamiento óptimo. En comparación con la cuadrícula simple, esta misión se recomienda para volar más cerca de los objetos con el fin de capturar más detalles verticales.

Recomendado en los siguientes casos:

- Interés principal en las salidas de modelos 3D (nube de puntos, malla, etc.).
- Superficie con fluctuaciones de altura u objetos (por ejemplo, edificios, bosque).
- Área pequeña y mediana ya que se duplica el tiempo de vuelo.

3.8.3. POLÍGONO (POLYGON).

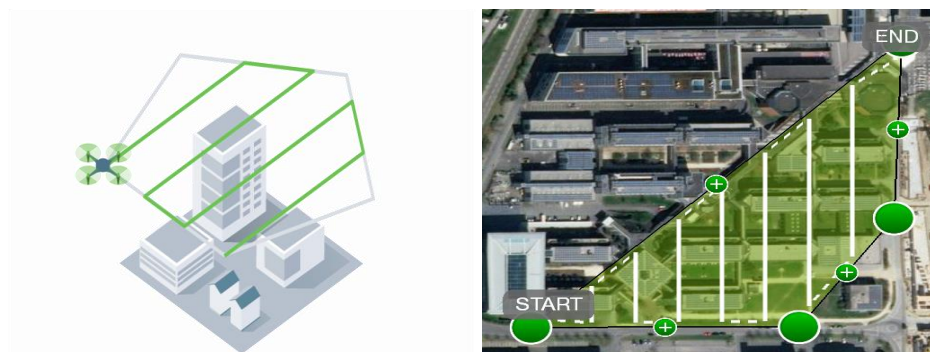


Figura 3.8.3.1: Misión poligonal para un vuelo fotogramétrico.
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Adecuado para la mayoría de los entornos que requieren límites flexibles para volar o con una forma de mapeo compleja. Garantiza que las imágenes se tomen con la superposición necesaria para un procesamiento óptimo.

Recomendado en los siguientes casos:

- Principal interés en salidas de mapas 2D (DSM, ortomosaico, etc.).
- Superficie relativamente plana (por ejemplo, campos, movimiento de tierras).
- Área grande.
- Forma compleja y restricciones en los límites de vuelo.

3.8.4. CIRCULAR.



Figura 3.8.4.1: Misión circular para un vuelo fotogramétrico.
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Garantiza que las imágenes se tomen desde todos los ángulos alrededor de un punto de destino, con la superposición necesaria para un procesamiento óptimo. Para objetos altos, se sugiere volar varias misiones circulares a diferentes altitudes.

Recomendado en los siguientes casos:

- Interés principal en las salidas de modelos 3D (nube de puntos, malla, etc.).
- Objeto aislado (por ejemplo, torre, pilón, edificio).
- Área pequeña.

3.8.5. VUELO LIBRE (USUARIOS AVANZADOS).



Figura 3.8.5.1: Misión libre para un vuelo fotogramétrico.
Fuente: <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>.

Adecuado para mapear objetos más difíciles que requieren más flexibilidad. El obturador de la cámara se activa automáticamente según un intervalo de distancia horizontal y vertical. Requiere pilotar manualmente el dron.

Recomendado en los siguientes casos:

- Interés principal en las salidas de modelos 3D (nube de puntos, malla, etc.).
- Área pequeña.
- Estructuras complejas o verticales (por ejemplo, fachada de edificio, acantilado, puente, etc.)

3.9. TIPOS DE TRASLAPES.

Denominamos traslape, a la superposición parcial de las fotografías tomadas por el Dron, en la realización de un levantamiento fotogramétrico.

Así mismo se le puede denominar de diferentes maneras, tales como: solape, traslape, superposición o recubrimiento. El mismo que debe ser de manera frontal y lateral, quiere decir entre foto y foto y entre pasada y pasada, de acuerdo con las líneas de vuelo del Dron.

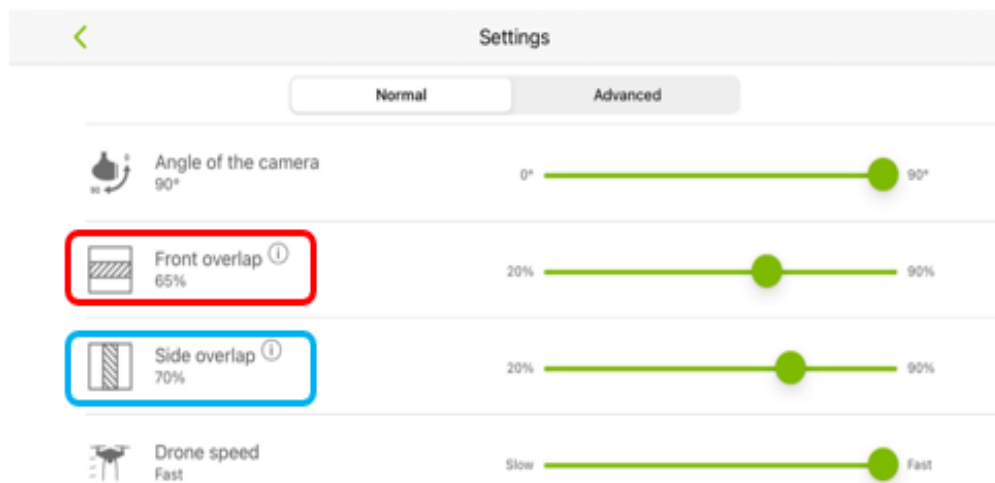


Figura 3.9.1 Traslape longitudinal y transversal en Pix4DCapture.
Fuente: Propia.

Para la realización de un vuelo fotogramétrico, se recomienda un traslape longitudinal del 70% y un traslape trasversal del 65% como se mostró en la figura anterior.

3.10. SOFTWARE DE PROCESAMIENTO FOTOGRAMÉTRICOS.

A continuación, se mencionan los programas más usados para el procesamiento de la fotogrametría:

3.10.1. AGISOFT METASHAPE.

Agisoft Metashape es un software profesional que procesa fotogramétricamente imágenes digitales para una variedad de aplicaciones, tales como aplicaciones SIG, documentación del patrimonio cultural, efectos visuales, producción y medición indirecta de objetos a diferentes escalas. Algunas características importantes le permiten a Metashape procesar varios tipos de imágenes (tanto cercanas como lejanas), generar un diagrama de dispersión, medir distancias, áreas y volúmenes y generar mallas 3D que luego puedan ser exportadas a varios formatos.

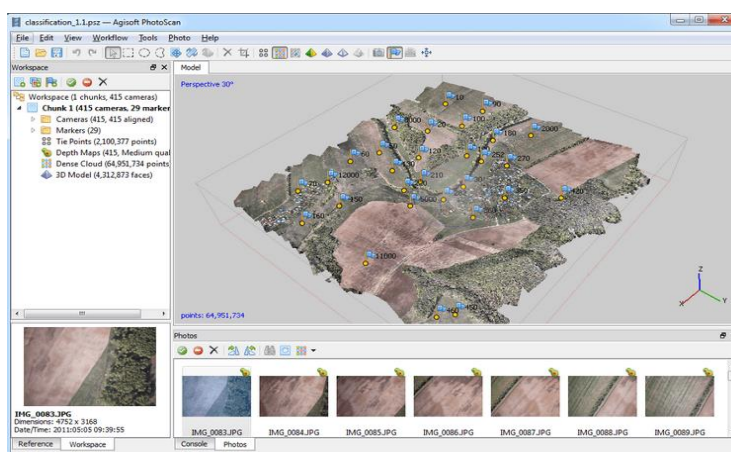


Figura 3.10.1.1: Software Agisoft Metashape.

Fuente: <https://geoinn.com/fotogrametria/agisoft/agisoft-metashape/>.

3.10.2. PIX4DMAPPER.

Pix4D es un editor de software de fotogrametría. Ofrece varias soluciones en función de las necesidades del usuario y permite medir diferentes datos desde un dron, una cámara o incluso un avión. La empresa ofrece actualmente 5 paquetes de software de cartografía y modelado en 3D, entre ellos el PIX4Dmapper, una oferta para profesionales que utilizan drones u otras cámaras. Puede integrar cualquier imagen RGB, térmica o multispectral; tras la fase de escaneado, podrá medir superficies, volúmenes y distancias.



Figura 3.10.2.1: Software Pix4Dmapper.

Fuente: <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dmapper-fotogrametria-software/>.

3.10.3. DRONEDEPLOY.

DroneDeploy es una solución para construir mapas y modelos aéreos a partir de imágenes captadas con drones DJI. El software permite a los operarios crear mapas aéreos y modelos en 3D. Cuenta con una variedad de funciones de vuelo autónomo, que se pueden aplicar mediante el uso de la aplicación móvil DroneDeploy, además el software cuenta con una serie de funciones útiles, como diferentes tipos de análisis de datos sobre el terreno y la capacidad de generar mapas en 2D precisos, modelos 3D e incluso panorámicas 360.



Figura 3.10.3.1: Software DroneDeploy.

Fuente: <https://www.globenewswire.com/news-release/2021/02/04/2169787/0/en/DroneDeploy-Secures-50M-to-Accelerate-Development-Beyond-Drones-and-Solidify-Global-Market-Leadership.html>.

3.10.4. OPEN DRONE MAP.

Es un software de código abierto para procesar imágenes que han sido captadas por drones, convirtiéndolas en datos geográficos en 3D para utilizar más adelante con otros datos. Algunos de los productos que tiene son: nube de puntos, modelos digitales de superficie, modelos de superficie digital con textura.



Figura 3.10.4.1: Software Open Drone Map.

Fuente: <https://www.helixnorth.com/blog/opendronemap-software-de-proceso-fotogramtrico-gratis-y-open-source>.

Para nuestro trabajo utilizaremos el programa Pix4Dmapper.

3.11. PROCESO FOTOGAMÉTRICO DIGITAL.

El proceso fotogramétrico digital se puede dividir en las siguientes etapas:

Entrada de datos: El proceso fotogramétrico aéreo digital comienza con la obtención de los datos en campo. Según el objetivo que se desea lograr se procede a la planificación de la toma de imágenes sea cual sea su origen: fotografías aéreas, escaneadas con un sistema de gran precisión o bien

imágenes satélites capturadas con sensores (SPOT, Landsat), y por último imágenes digitales capturadas con el uso de plataformas con drones. Dentro de la captura de las imágenes se deben incluir los puntos de control ya que estos nos permitirán la georreferenciación de nuestro proyecto fotogramétrico, dichos puntos se pueden tomar mediante cualquier tipo de medición topográfica. (por ejemplo, en RTK).

Procesamiento: Una vez tomadas las fotografías en campo, se procede al procesamiento en cualquiera de los programas antes mencionados para fotogrametría. Dentro del procesamiento es necesario realizar el proceso de orientación interna (realizado por el operador) que consiste en el cambio de coordenada píxel, es decir, de filas y columnas a coordenadas de imagen. Este proceso se ha realizada con la información de cámara y los parámetros de vuelo en general, posteriormente se realiza una orientación externa, trabajando entre fotogramas, se identifican y localizan puntos de apoyo, puntos de control de los cuales se conocen sus coordenadas (x, y, z) en el terreno. En función del tamaño del vuelo fotogramétrico y la precisión final que se requiere alcanzar se puede realizar el proceso de aerotriangulación fotogramétrica. Los softwares actuales generan puntos de apoyo comunes (Tie points) entre las imágenes, sin embargo, si se desea densificar o ampliar la cantidad de puntos y mejorar los resultados finales se debe considerar la aerotriangulación.

Resultados: La generación de los modelos tridimensionales resultan de relacionar geoméricamente las coordenadas de los puntos de apoyo, homólogos y de control, proceso que realiza automáticamente el software. De esta manera es posible obtener los denominados modelos digitales de terreno, de elevaciones, y de superficie.

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Básicamente, los productos que se generan son:

- **Nube de puntos o malla 3D** (En el caso de drones): Es el primer producto resultante del escaneo láser o la fotogrametría digital y el paso previo a la creación de modelos 3D. Se compone por millones de puntos posicionados tridimensionalmente en el espacio, formando con exactitud milimétrica una entidad física y representando su superficie externa. La nube de puntos 3D contiene una amplia información métrica sobre las superficies escaneadas, así como la relativa a su color y reflectividad del material.

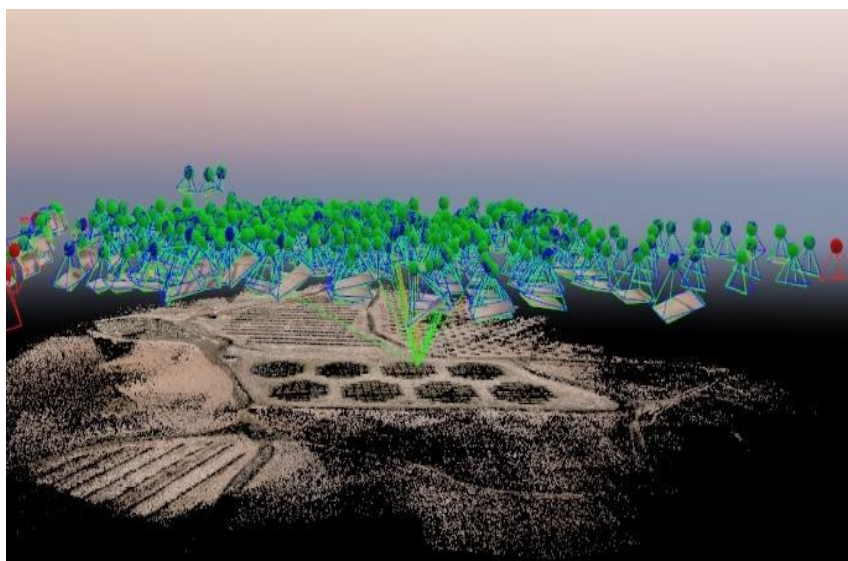


Figura 3.11.1: Nube de puntos a partir de las fotografías.
Fuente: <https://dronenerdslatam.com/pix4d/>.

- **Modelos digitales de superficie (MDS):** El cual representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente).

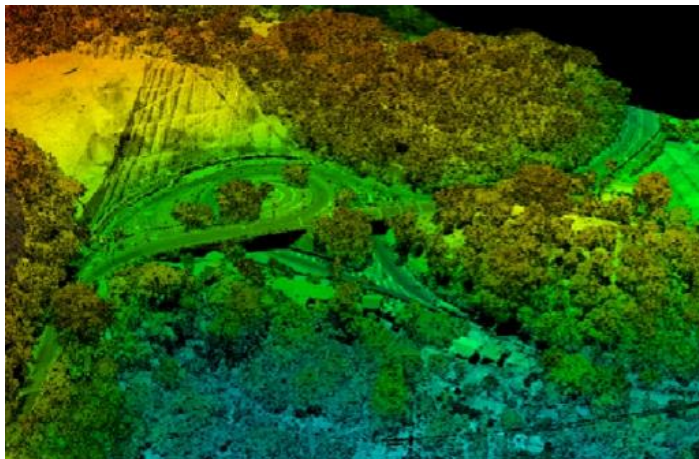


Figura 3.11.2: Modelo Digital de Superficie.

Fuente: <https://www.icadelingeneria.com/modelos-digitales-de-superficie.html>.

- **Modelos digitales de terreno (MDT):** Este recrea la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno.

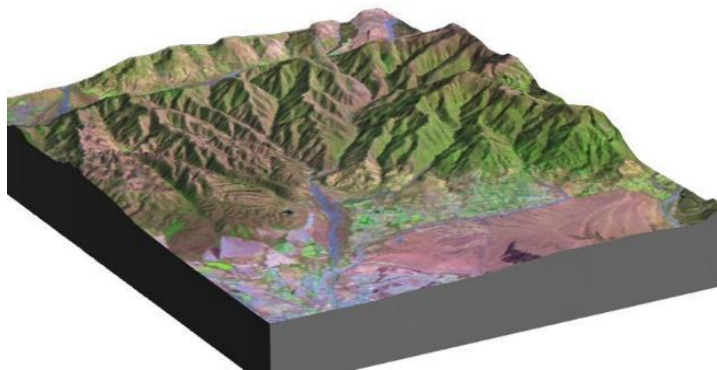


Figura 3.11.3: Modelo Digital de Terreno.

Fuente: https://www.researchgate.net/figure/Figura-24-Modelo-digital-del-terreno-con-la-superposicion-de-una-composicion-falso-color_fig12_283513457.

- **Ortofoto:** Es una imagen fotográfica del terreno, cuya proyección central ha sido transformada en una proyección ortogonal, eliminando así las distorsiones planimétricas causadas por la inclinación de la cámara aérea y el desplazamiento debido al relieve.



Figura 3.11.4: Ortofoto generada a partir del procesamiento fotogramétrico.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2020)
Topografía con drones asociado a la proyección
cartográfica Cónica Conformal de Lambert.

3.12. RESTITUCIÓN FOTOGRAMÉTRICA.

La Restitución fotogramétrica es el procedimiento empleado para extraer detalles cartográficos, de aerofotografías, imágenes de satélite y de otras fuentes de información para la preparación de un mapa nuevo o actualizado. (Paul Wolf y Russell C. Brinker, 1997).

La restitución fotogramétrica, es la última etapa dentro del trabajo de fotogrametría. En esta etapa se agrupa todo el trabajo obtenido en el procesamiento fotogramétrico haciendo uso de los softwares mencionados anteriormente, para trazar los mapas del área en estudio. La restitución fotogramétrica permite la vectorización de la información captada mediante la Digitalización sobre la ortofoto precisa generada del MDS y MDT del proyecto

procesado. Las escalas cartográficas generadas habitualmente para proyectos son:1000, 1:20000 y 1:5000 a partir de vuelos fotogramétricos. Para ello se utilizan los programas de dibujo como, por ejemplo: Civil 3D, AutoCAD, entre otros.



Figura 3.12.1: Restitución fotogramétrica.

Fuente: <https://www.oriondata-i.com/home/index.php/restitucion-fotogrametrica>.

CAPÍTULO 4: DATOS OBTENIDOS EN CAMPO.

4.1. OBTENCIÓN DE COORDENADAS PARA LOS PUNTOS DE CONTROL FOTOGAMÉTRICOS MEDIANTE LA TÉCNICA GNSS.

Para la obtención de las coordenadas para los Puntos de Control Fotogramétricos (PCF) se optará por utilizar la técnica de medición en tiempo real, ya que esta nos permite obtener las coordenadas de un punto en un tiempo mínimo de observación. Para lo cual, se debe conocer las coordenadas de un punto fijo o base (Que para nuestro caso utilizaremos el punto denominado UES-2) Ubicado sobre el polideportivo ya que los PCF se encuentran dentro de un radio de cobertura de 200 m aproximadamente con respecto al punto UES-2.

4.2. TÉCNICA DE MEDICIÓN EN TIEMPO REAL (RTK).

La técnica de medición en tiempo real consiste en que los receptores GNSS miden en tiempo real que tarda la señal en viajar desde un satélite hasta un receptor. En RTK se utilizan dos receptores Uno de ellos esta inmóvil y el otro se mueve libremente. Para nuestro caso, dejamos un receptor denominado Base en el punto UES-2 y el Rover para medir los PCF que nos servirán para la georreferenciación del vuelo fotogramétrico.

4.3. PARÁMETROS PARA LA MEDICIÓN.

A continuación, se detallan los parámetros a utilizar para la toma de las coordenadas de los PCF del proyecto:

PARÁMETROS DE MEDICIÓN.	
Intervalo de medición	1 seg.
Mascara de elevación	10°
Mínimo de satélites	4
Tiempo mínimo de observación	1 a 5 seg

Tabla 4.3.1: Parámetros a utilizar en la técnica de medición RTK.
Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2020)
Sistemas de posicionamiento global.

4.4. DELIMITACIÓN DEL ÁREA A RESTITUIR.

Para nuestro caso, el área de estudio es el polideportivo de la Universidad de El Salvador (UES), por lo que a continuación se muestra una fotografía:



Figura 4.4.1: Delimitación del área a analizar.
Fuente: Obtenida de Google Maps.

4.5. INSTALACIÓN DE LA BASE EN EL PUNTO CON COORDENADAS CONOCIDAS.

- Para nuestro caso, identificamos el punto con coordenadas conocidas denominado UES -2, de manera que contemos con un radio no mayor a 200 metros a la redonda los puntos de control fotogramétricos.



Figura 4.5.1: Punto con coordenadas conocidas en la Universidad de El Salvador.

Fuente: Propia.

- Instalación del trípode con la base nivelante sobre el punto con coordenadas conocidas, para nuestro caso el punto mencionado anteriormente.



Figura 4.5.2: Instalación de la base en el punto con coordenadas conocidas.
Fuente: Propia.

- Posterior, se toma la altura de la base, para nuestro caso será una medida inclinada como se muestra a continuación.



Figura 4.5.3: Medición de la altura de la base.
Fuente: Propia.

- Una vez instalado el equipo, se procede a encender la base para obtener la señal de los satélites que contribuirán en las mediciones.



Figura 4.5.4: Arranque de la base.
Fuente: Propia.

4.6. CONFIGURACIÓN DEL COLECTOR PARA LA TOMA DE LAS COORDENADAS DE LOS PUNTOS.

- Como primer paso es encender el colector y buscar la aplicación llamada SurvCE y elegir la opción Trabajo Nuevo/Existente”



Figura 4.6.1: Configuración del colector.
Fuente: Propia.

- Ingresamos el nombre del trabajo y presionamos aceptar.



Figura 4.6.2: Nombramiento del nuevo trabajo en el colector.
Fuente: Propia.

- A continuación, en la pestaña de sistema verificamos las unidades de medida, distancia, ángulo y la proyección para nuestro caso SIRGAS-ES2007. Si no se encuentra se debe crear con los parámetros mencionados en el capítulo 2. Finalmente damos clic en Aceptar.



Figura 4.6.3: Configuración del Sistema para el proyecto.
Fuente: Propia.

- Posteriormente del menú principal seleccionar el icono de engrane y la opción 2 Base GNSS para la configuración del receptor inmóvil.

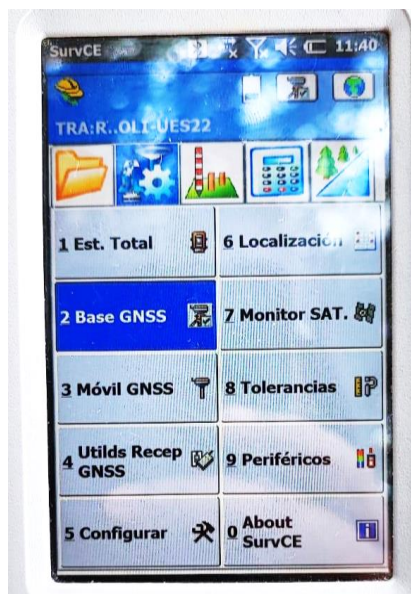


Figura 4.6.4: Configuración de la base GNSS.
Fuente: Propia.

- En la pestaña actual se muestran los equipos que se ha enlazados con el colector anteriormente, para nuestro caso el fabricante a seleccionar es Carlson.



Figura 4.6.5: Selección del fabricante según el modelo que estemos utilizando.
Fuente: Propia.

- Posteriormente ingresar en la pestaña “Comms” y elegir en la opción “Tipo” Bluetooth que será el medio de transmisión de datos entre el receptor y el colector.
- Seguidamente en la pestaña “Receptor” seleccionar la opción “Incl.” para la altura del aparato, dicha altura corresponde medida inclinada, luego damos clic en aceptar.



Figura 4.6.6: Configuración de la altura del receptor base.
Fuente: Propia.

- Luego nos mostrará el siguiente cuadro de dialogo mostrado en la figura y seleccionamos la opción de “Teclear Lat/Long”, para la introducción de las coordenadas geográficas y la elevación elipsoidal del punto UES – 2 y damos clic en aceptar.



Figura 4.6.7: Configuración de las coordenadas del punto base.
Fuente: Propia.

- Posteriormente nos pregunta si deseamos continuar con el arranque de la base, damos clic en “Si”.

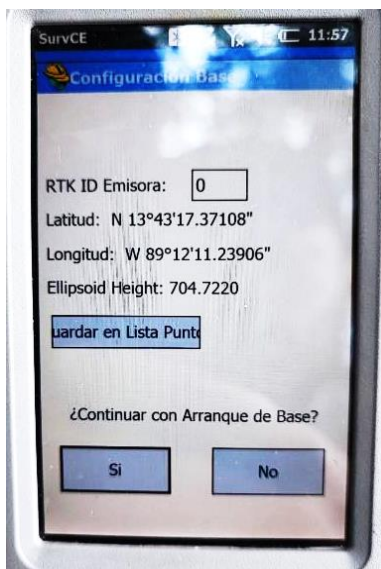


Figura 4.6.8: Arranque de la base.

Fuente: Propia.

- Nos mostrará el siguiente cuadro de dialogo en donde nos pregunta si deseamos Grabar los parámetros en el fichero, damos clic en “Si” y con esto estaríamos completando los parámetros de la base.



Figura 4.6.9: Almacenamiento de los parámetros en el fichero del colector.

Fuente: Propia.

- Luego Seleccionamos la opción 3. “Móvil GNSS” para la configuración de los parámetros del Rover (Receptor Móvil). Previamente debemos encender el Rover.



Figura 4.6.10: Configuración del receptor móvil GNSS.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- Seleccionamos la pestaña “Comms” y en “Tipo” seleccionamos Bluetooth que será el tipo de comunicación entre el colector y el Rover. También en la pestaña “Dispost” seleccionamos el modelo del Rover que se esté utilizando, el modelo lo encontramos en la parte de abajo del equipo en una viñeta.

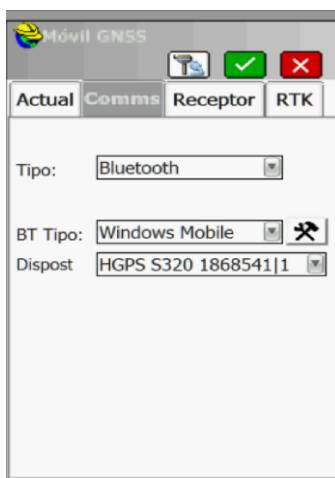


Figura 4.6.11: Tipo de conexión entre el receptor y el colector.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- Luego en la pestaña “Receptor” digitamos la altura de la antena que para nuestro caso fue de 3.50 m algo muy importante es verificar que este seleccionado el icono de “Vertical” para dicha altura. Luego damos clic en aceptar.

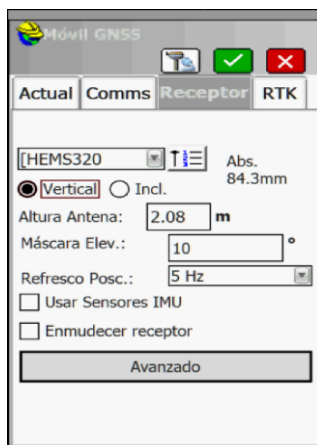


Figura 4.6.12: Configuración de la altura del receptor Rover.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- En la pestaña “RTK” seleccionamos el tipo de antena a utilizar en las mediciones para el Rover, después damos clic en aceptar. Y con esto tenemos configurado el Rover para iniciar con las mediciones.

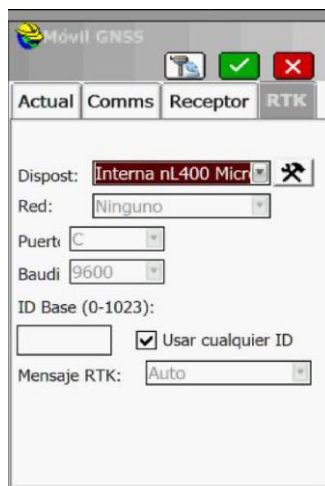


Figura 4.6.13: Selección del tipo de antena del Rover.

Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- Luego de tener configurado tanto la Base como el Rover, seleccionamos el icono de medición en el menú y en la opción 1 seleccionamos “Levantamiento”.



Figura 4.6.14: Configuración del levantamiento.
Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- En la siguiente ventana podremos observar la estación de referencia, los parámetros de medición y la ubicación del Rover. También acá se mostrarán los puntos que vayamos guardando durante la medición.

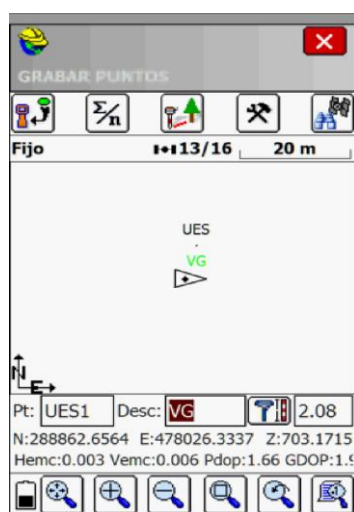


Figura 4.6.15: Pantalla principal del levantamiento topográfico.
Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- Para el almacenamiento de las coordenadas de los Puntos de Control Fotogramétricos, nos posicionamos en el punto con el Rover como se muestra en la siguiente figura.



Figura 4.6.16: Medición de los PCF para el vuelo fotogramétrico.
Fuente: Propia.

- Seguidamente en el colector, seleccionamos el primer icono de izquierda a derecha en la parte superior de la figura y nos mostrara la ventana mostrada en la figura 73. En donde debemos agregar la descripción del punto y posterior damos clic en aceptar.



Figura 4.6.17: Proceso para grabar un punto.
Fuente: Wilfredo Amaya Zelaya (2021)
Manual de operación equipo GPS Carlson.

- Repetimos el paso anterior hasta completar con los Puntos de Control fotogramétricos definidos para el proyecto del vuelo fotogramétrico.
- Una vez terminado con las mediciones, se extraen las coordenadas en un archivo “.txt” para poder ser exportado en el software de procesamiento.

4.7. PLAN DE VUELO FOTOGAMÉTRICO.

Una vez obtenidas las coordenadas de los PCF para la georreferenciación del proyecto, se procede a la ejecución del vuelo fotogramétrico con el Dron que para nuestro caso utilizaremos un PHANTOM 4 PRO V2.

Antes de iniciar el vuelo fotogramétrico, es de tener mucho cuidado con los factores para la realización de un levantamiento fotogramétrico con drones detallado en el Capítulo 3 para no tener ningún inconveniente y logremos realizar el vuelo fotogramétrico con éxito.

A continuación de detallaran los pasos para la realización de un vuelo fotogramétrico:

- Como primer paso se tiene que armar el Dron con todos sus accesorios y se procede a encenderlo.



Figura 4.7.1: Dron PHANTOM 4
Fuente: Propia.

- Posteriormente adaptamos un dispositivo portátil al control del Dron para poder configurar los parámetros del vuelo.



Figura 4.7.2: Control del Dron con una portátil.
Fuente: Propia.

- Luego seleccionamos la aplicación “DJI GO 4”, descargada previamente en la App Store.

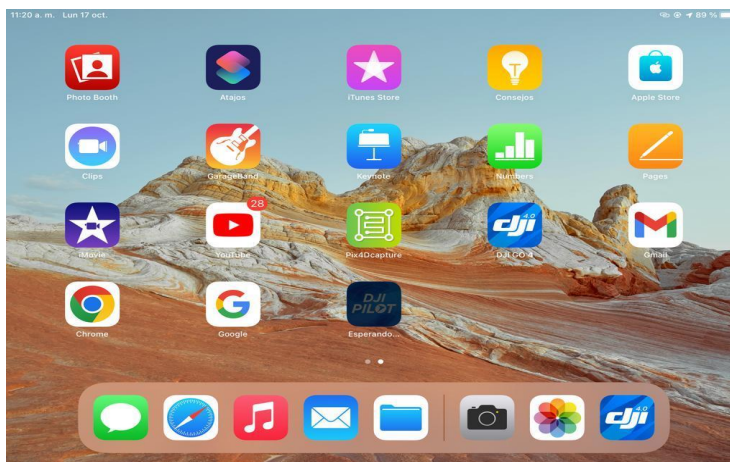


Figura 4.7.3: Selección de la aplicación DJI GO 4
Fuente: Propia.

- Dentro de la aplicación verificamos todos los parámetros del Drone, como, por ejemplo: la brújula, el IMU, los sensores remotos entre otros.



Figura 4.7.4: Configuración de los parámetros del Drone.
Fuente: Propia.

- Es recomendable que por lo menos una vez al mes se realice la calibración de los sensores del Drone ya que ellos le ayudan para la correcta realización del vuelo fotogramétrico, por lo que comenzaremos calibrando el IMU del Drone para un Phantom 4 Pro, para ello el Drone debe estar sin sus hélices por seguridad y sin el protector de seguridad de la cámara, damos clic en los tres puntos que aparecen en la parte superior derecha.



Figura 4.7.5: Selección de configuración.
Fuente: Propia.

- Posterior buscamos las opciones avanzadas damos clic en sensores.

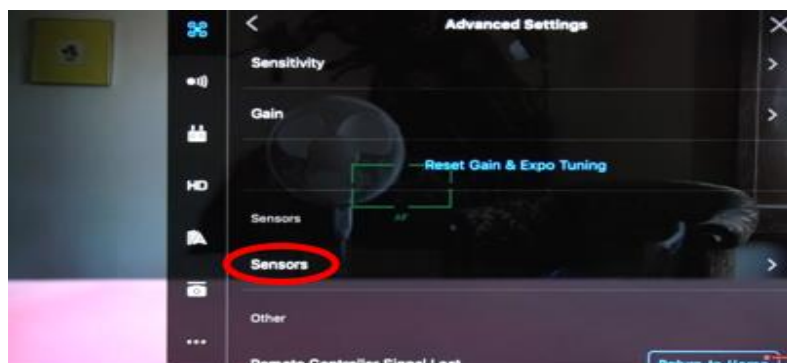


Figura 4.7.6: Selección de sensores

Fuente: Propia.

- Nos aparecerá la siguiente pantalla en donde damos clic en “Calibración IMU”.



Figura 4.7.7: Selección de calibración de IMU.

Fuente propia.

- Luego damos clic en “Start” y comenzamos con la calibración del IMU.

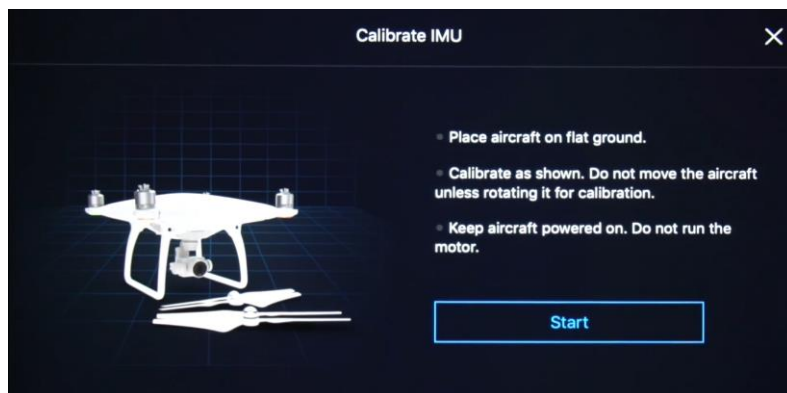


Figura 4.7.8: Selección de inicio para calibración.

Fuente: Propia.

- Para la calibración IMU seguimos las posiciones que nos muestra en pantalla hasta completar el proceso.

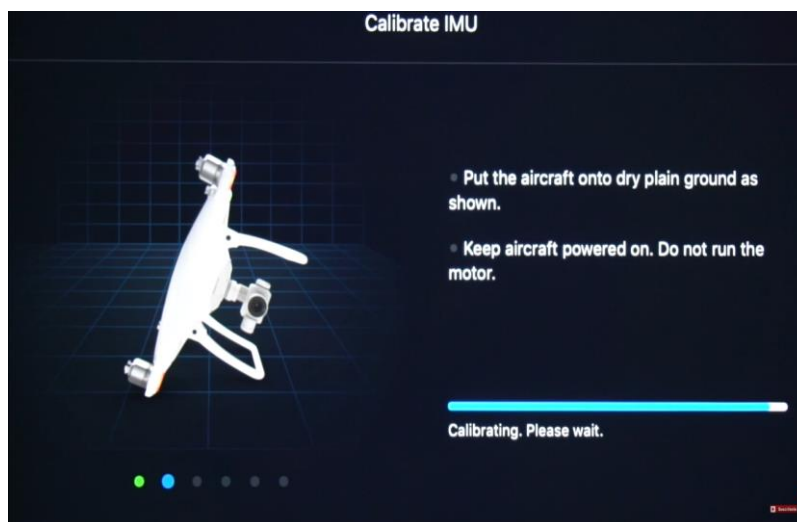


Figura 4.7.9: Posiciones del Drone para la calibración del IMU.
Fuente: Propia.

- Una vez finalizado el proceso, damos clic en "Back to Camera" pero primero debemos apagar el Drone y con esto hemos completado la calibración del IMU.

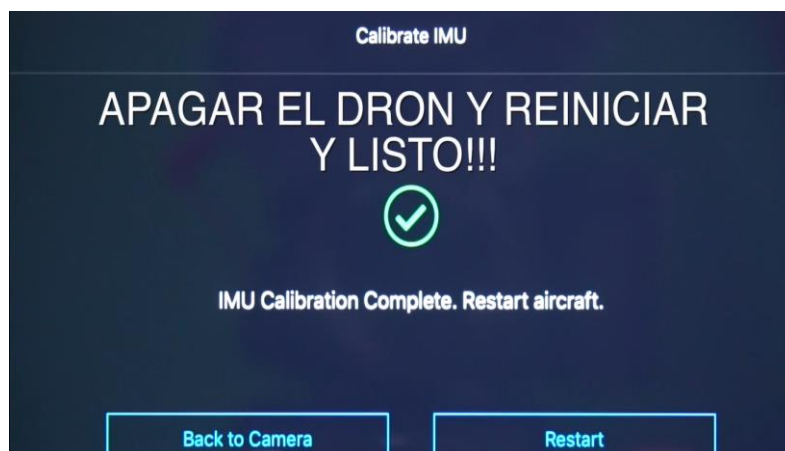


Figura 4.7.10: Mensaje de finalización de calibración.
Fuente: Propia.

- Luego vamos a la configuración de Compass en la pantalla damos clic en “Compass” y después en “Calibrate Compass”.



Figura 4.7.11: Selección de Compass.
Fuente: Propia.

- Nos recomienda que estemos por lo menos a 1.5 m de distancia con objetos de metal para que no haya interferencia a la hora de realizar la calibración, luego realizamos los giros que nos va mostrando en pantalla para la calibración del Compass hasta completar el proceso.



Figura 4.7.12: Posiciones para la calibración del Compass.
Fuente: Propia.

- Una vez finalizado el proceso, nos mostrara un mensaje en donde nos conforma que el proceso ha sido finalizado, luego damos clic en “Ok”.

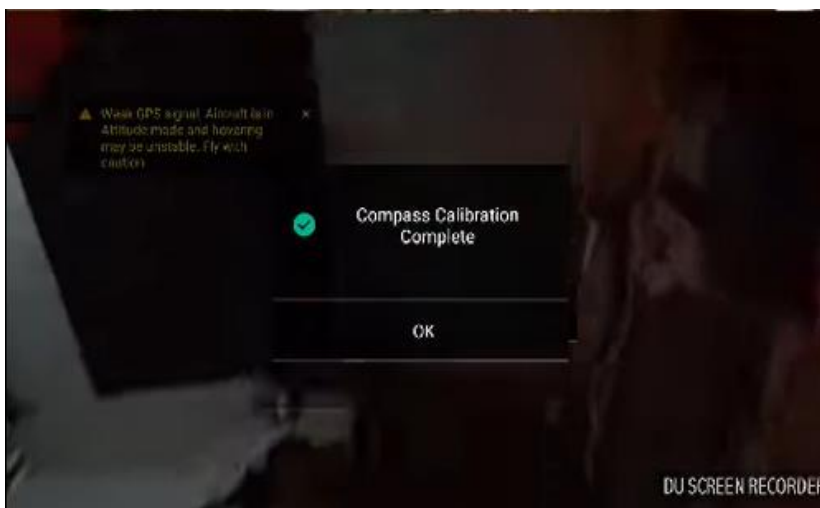


Figura 4.7.13: Finalización de la calibración de Compass.
Fuente: Propia.

- Para la calibración del Gimbal que es en sensor para la estabilización del Drone a la hora de la realización del vuelo fotogramétrico, se configura de la siguiente manera, en la pantalla principal damos clic en los tres puntos.



Figura 4.7.14: Pantalla principal de la aplicación DJI GO 4
Fuente: Propia.

- Luego seleccionamos el icono de la cámara.

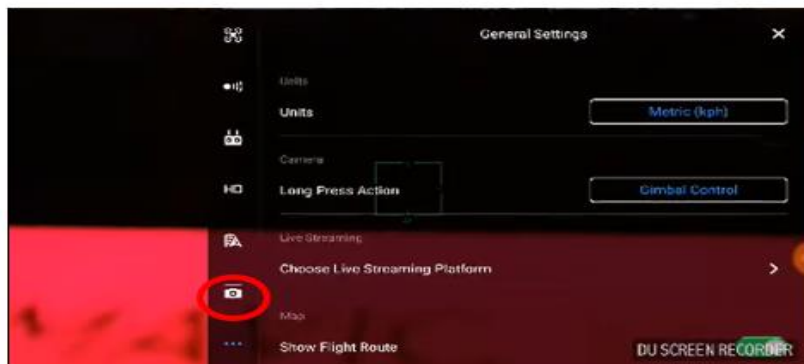


Figura 4.7.15: Selección para la calibración del Gimbal.

Fuente: Propia.

- Nos mostrara las siguientes opciones y seleccionamos “Auto Calibrate Gimbal”.



Figura 4.7.16: Selección para la auto calibración del Gimbal.

Fuente: Propia.

- Seguidamente damos clic en “Ok” y comenzara el proceso de calibración del Gimbal.



Figura 4.7.17: Inicio del proceso para la calibración del Gimbal.

Fuente: Propia.

- Luego esperamos que complete el proceso hasta el 100% para la calibración.



Figura 4.7.18: Proceso de calibración del Gimbal.
Fuente: Propia.

- Una vez finalizado el proceso, nos mostrará la siguiente ventana en donde nos informa que el proceso ha sido completado y damos clic en “Ok” y con esto estaríamos finalizando la calibración del Gimbal.



Figura 4.7.19: Finalización de la calibración del Gimbal.
Fuente: Propia.

- Una vez calibrados todos los sensores del Drone, estamos listos para iniciar el vuelo fotogramétrico.



Figura 4.7.20: Pantalla de la aplicación DJI GO 4.
Fuente: Propia.

- Luego seleccionamos la aplicación de Pix4Dcapture para la configuración del vuelo.

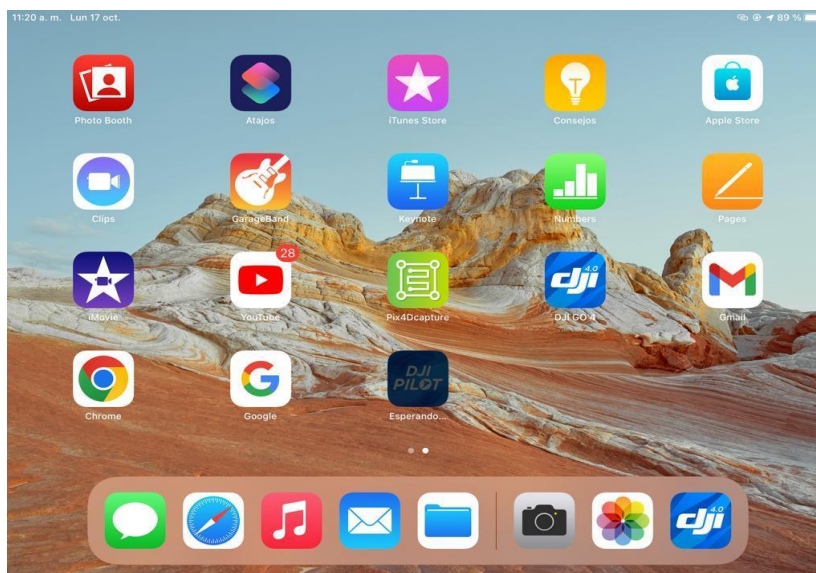


Figura 4.7.21: Selección de la aplicación Pix4Dcapture.
Fuente: Propia.

- Seleccionamos la misión del vuelo, que para nuestro caso será “GRID” ya que esta se adapta a la mayoría de las topografías.



Figura 4.7.22: Selección el tipo de vuelo.
Fuente: Propia.

- Luego delimitamos el área a realizar el vuelo fotogramétrico como se muestra en la figura a continuación, además de definir los criterios como la altura de vuelo que para nuestro caso fue de 70 metros, la posición de la cámara, el tiempo de medición que este dependerá de la altura del vuelo fotogramétrico para nuestro caso fue de 10 minutos con 5 segundos y los traslapes longitudinales y transversales (75% y 60% respectivamente) que tendrán las fotografías entre ellas y verificar las condiciones del Dron que aparecen en la ventana de la derecha. Una vez definido lo anterior, damos Clic en “START”.



Figura 4.7.23: Delimitación del área para el vuelo.
Fuente: Propia.

- A continuación, nos mostrara la siguiente ventana en donde nos indica que todos los parámetros del Dron están listos para hacer el vuelo fotogramétrico, damos clic en “Start”.

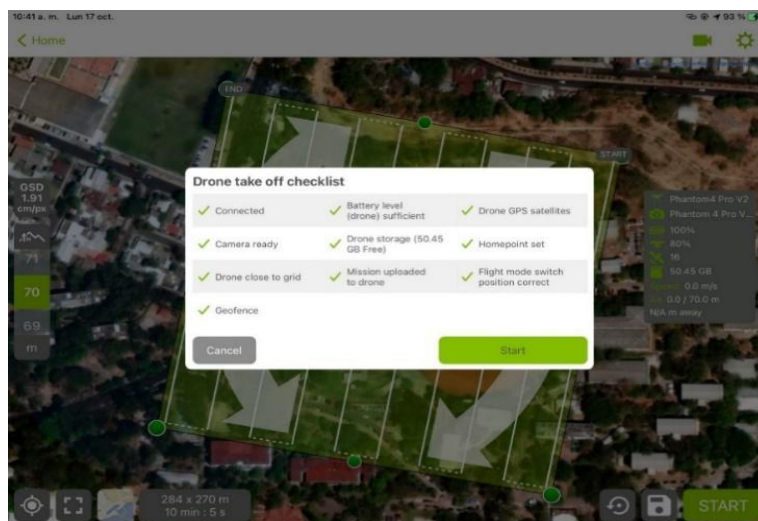


Figura 4.7.24: Parámetros del Dron.
Fuente: Propia.

- Luego del paso anterior, el Dron comienza el vuelo fotogramétrico, en la pantalla del portátil podremos ver el punto de inicio y fin, así como también los parámetros de batería del Dron, el número de satélites conectados, entre otros.



Figura 4.7.25: Ejecución del vuelo fotogramétrico.
Fuente: Propia.

- Una vez que el Dron termina el vuelo fotogramétrico, regresa al mismo lugar en donde se levantó y en pantalla podremos ver el procesamiento de las fotografías que se tomaron en el vuelo, lista para ser exportadas al software de procesamiento fotogramétrico.

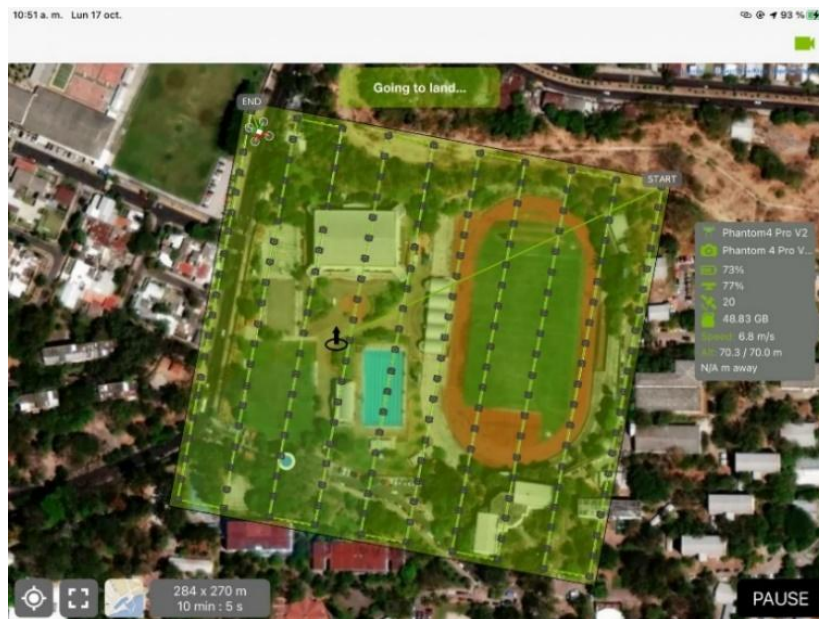


Figura 4.7.26: Finalización del vuelo fotogramétrico.
Fuente: Propia.

CAPÍTULO 5: PROCESAMIENTO DE DATOS OBTENIDOS EN CAMPO.

5.1. PASOS PARA PROCESAR UN VUELO FOTOGAMÉTRICO CON EL SOFTWARE PIX4D MAPPER.

5.1.1. CREACIÓN DE UN NUEVO PROYECTO.

Al abrir el programa PIX4D se presenta la siguiente pantalla en la cual seleccionaremos la opción “Nuevo proyecto”.

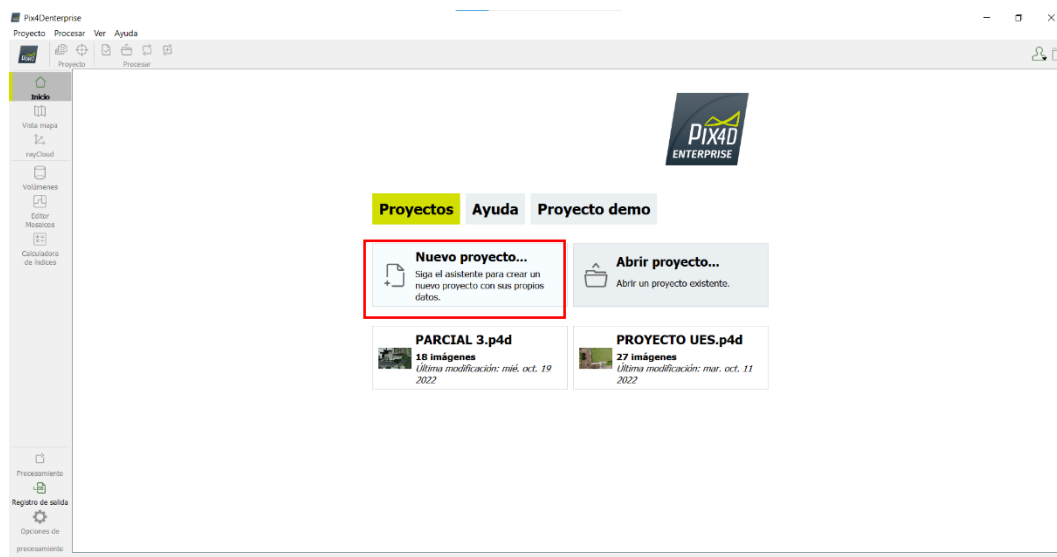


Figura 5.1.1.1: Creación de nuevo proyecto pix4dmapper.

Fuente: Propia.

En la siguiente ventana procedemos a digitar el nombre del proyecto y a seleccionar la ubicación donde lo guardaremos, posteriormente damos clic en el botón “siguiente”.

5.1.2. SELECCIÓN DE IMÁGENES.

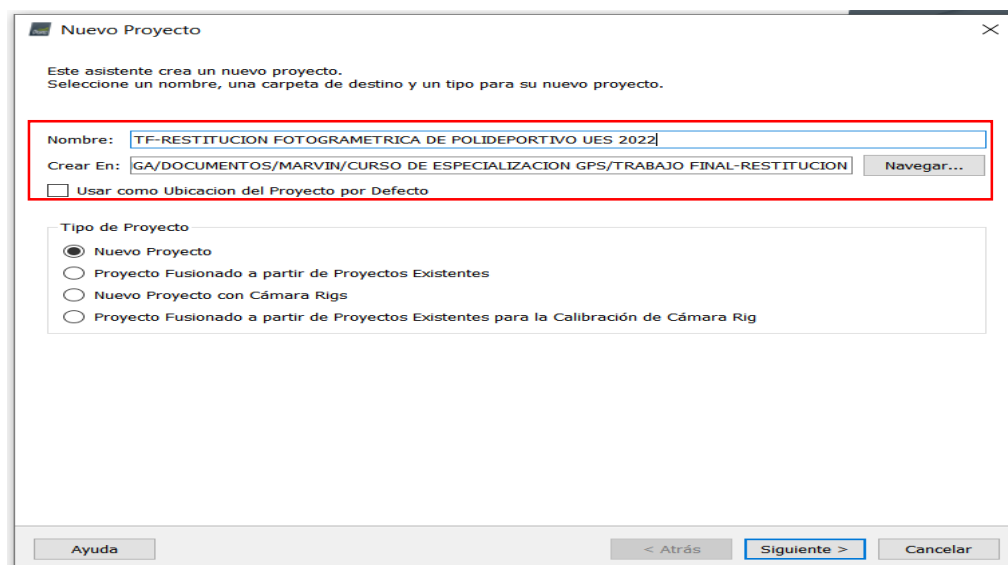


Figura 5.1.1.2: Selección de imágenes.

Fuente: Propia.

En esta parte, el programa nos presenta dos opciones, “añadir imágenes” nos permite seleccionar las imágenes que vamos a ocupar una por una, y la opción “añadir directorios” nos permite seleccionar la carpeta en donde se encuentran todas las imágenes que vamos a necesitar, en nuestro caso, al ser un elevado número de imágenes seleccionamos la segunda opción y damos clic en “siguiente”.

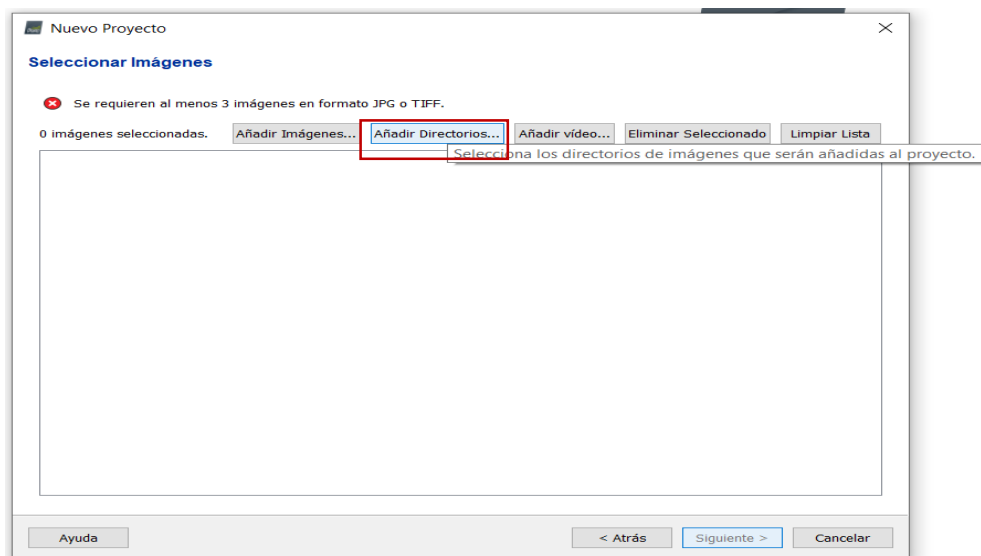


Figura 5.1.1.3: Seleccionar imágenes.
Fuente: Propia.

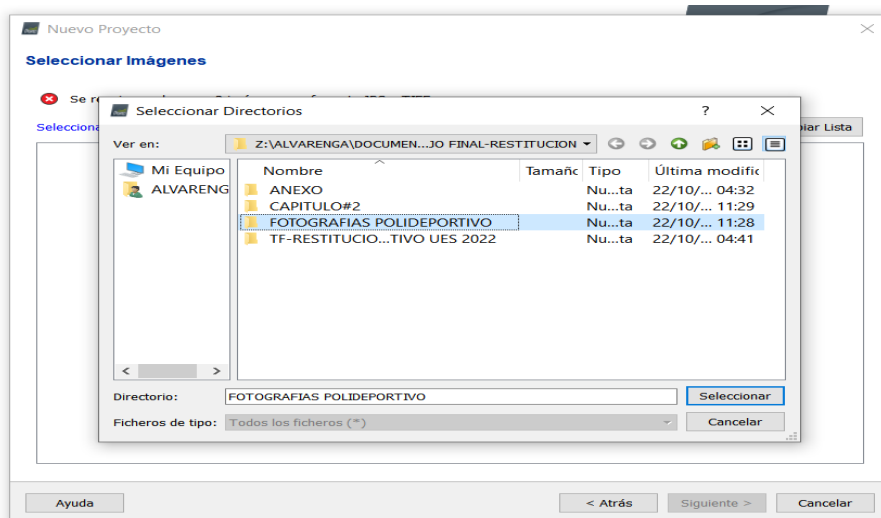


Figura 5.1.1.4: Selección de carpeta que contiene las imágenes.
Fuente: Propia.

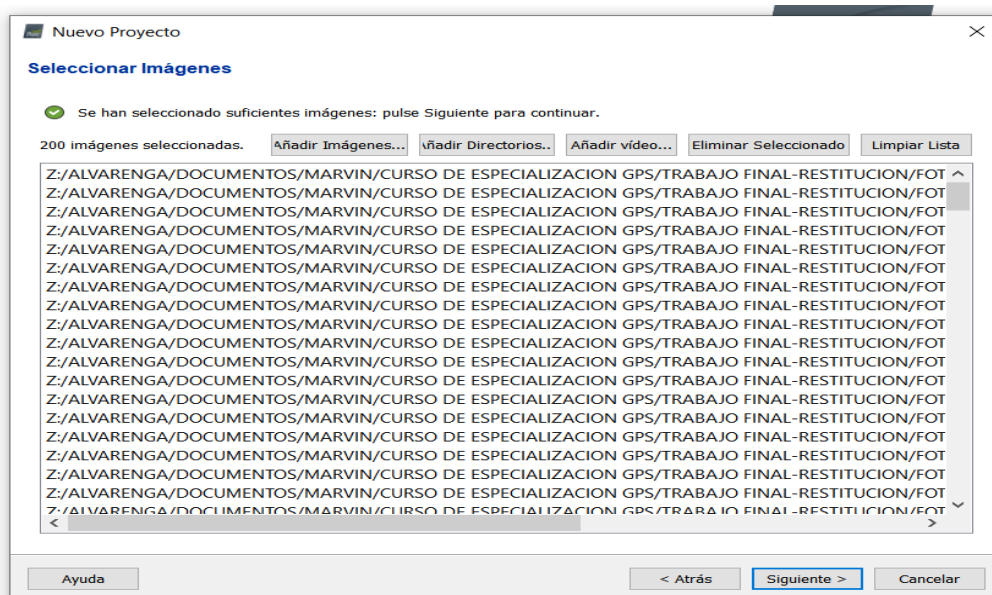


Figura 5.1.1.5: Vista previa de imágenes seleccionadas.

Fuente: Propia.

En este paso podemos revisar las propiedades de las imágenes cargadas y podemos ver el sistema de coordenadas, datum y modelo de geoida cargado por defecto por el programa.

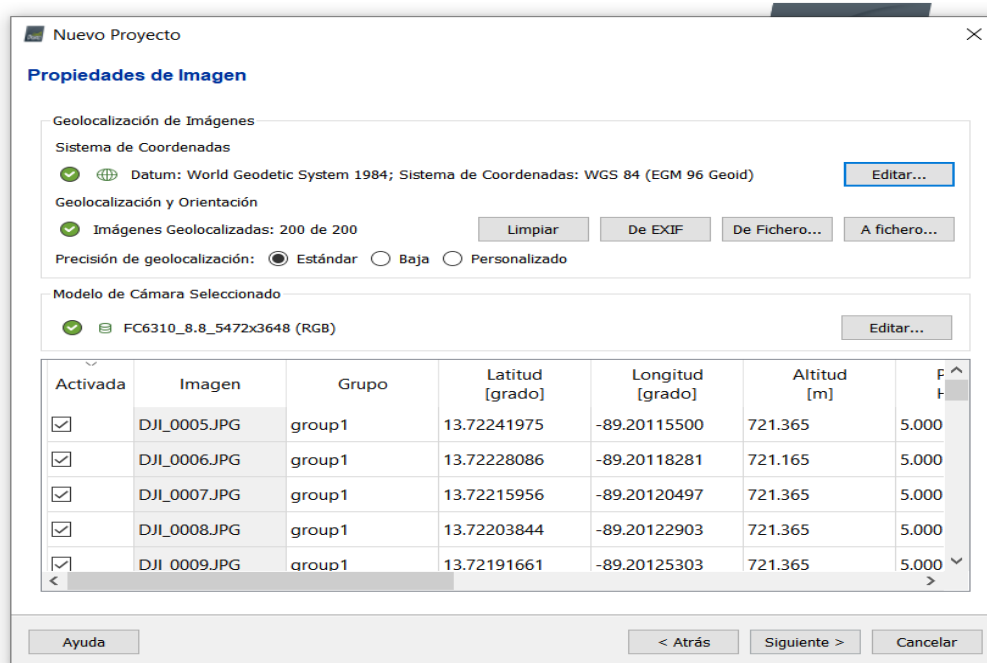


Figura 5.1.1.6: Propiedades de imágenes.

Fuente: Propia.

5.1.3. SELECCIÓN DEL SISTEMA DE COORDENADAS.

Por defecto el programa nos carga el sistema de coordenadas UTM WGS-84 zona 16N, sin embargo, nuestro sistema de coordenadas es la Proyección Cónica Conformal de Lambert y la proyección actualizada es SIRGAS-ES2007, por tanto, para seleccionarlo debemos tener previamente creado el archivo PRJ con los datos de dicha proyección y damos clic en “Sistema de coordenadas conocido”, se nos despliegan unas opciones y seleccionamos el botón “Desde PRJ” para poder cargar nuestro sistema de coordenadas. Además, también seleccionaremos el Modelo de Geoide EGM-08.

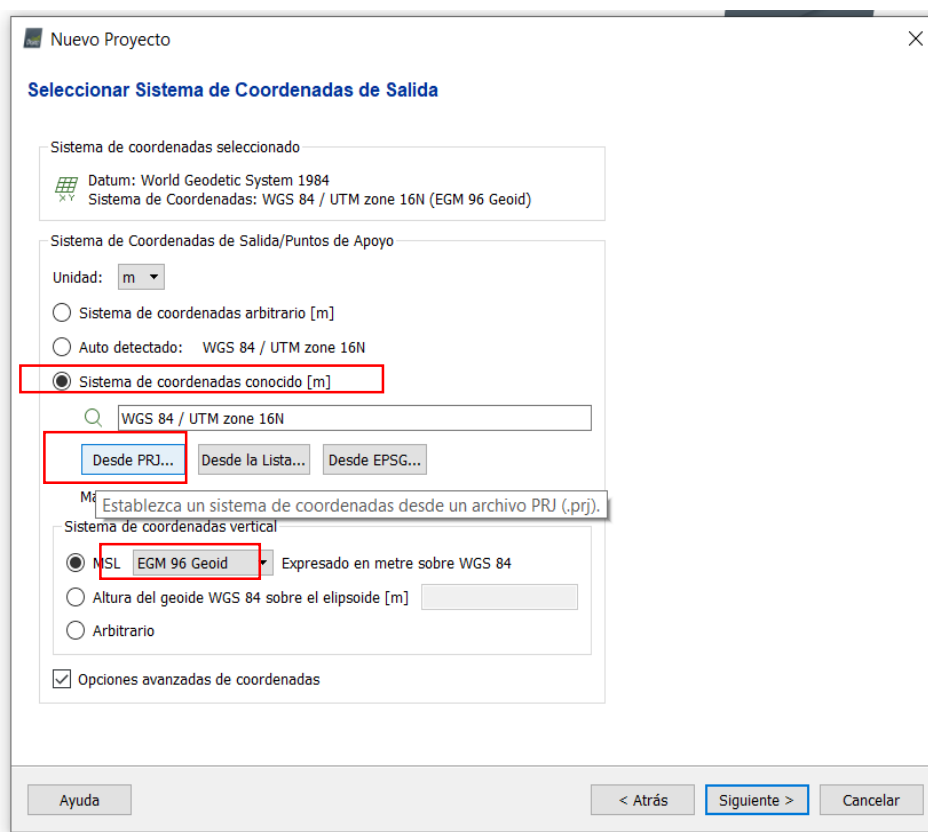


Figura 5.1.3.1: Selección de sistema de coordenadas de salida.
Fuente: Propia.

Damos clic en “siguiente” y en la siguiente ventana seleccionamos “3D Maps” y verificamos que se tenga desactivada la opción “Iniciar procesamiento ahora”.

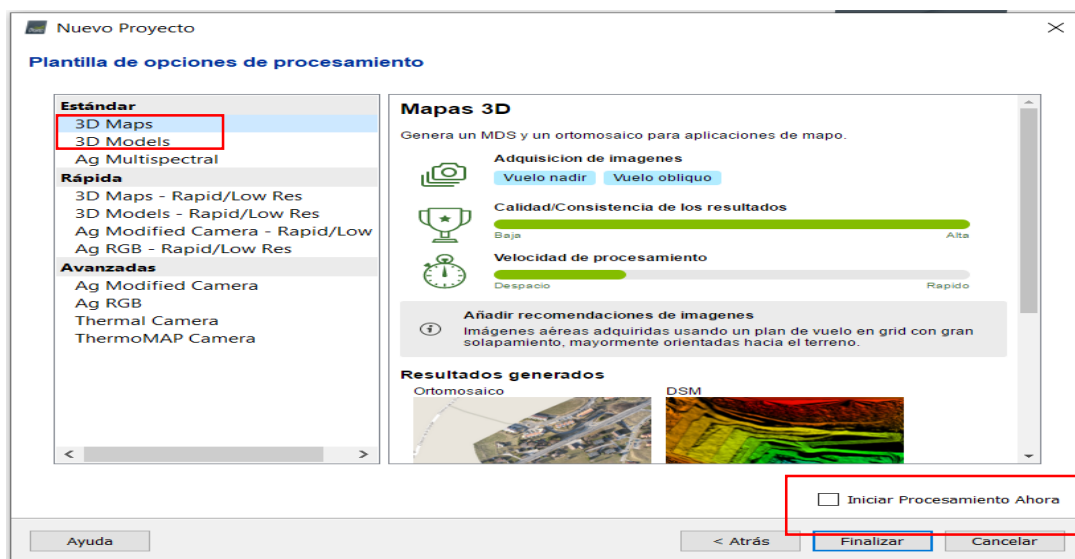


Figura 5.1.3.2: Plantilla de opciones de procesamiento.
Fuente: Propia.

Procedemos a dar clic en “Finalizar” para empezar a procesar nuestras imágenes.
Una vez creado el archivo y cargadas las imágenes, observamos que se nos carga el plan de vuelo ejecutado en PIX4D, en esta parte podemos verificar si tenemos el Sistema de Coordenadas correcto en la parte inferior derecha de la pantalla, debemos saber que cada círculo rojo representa una fotografía correspondiente a nuestro levantamiento.



Figura 5.1.3.3: Proyecto creado en pix4dmapper.
Fuente: Propia.

5.1.4. PROCESAMIENTO.

Ahora procedemos a realizar el procesamiento de las imágenes en PIX4D el cual se realiza mediante 3 pasos:

- 1.1 Procesamiento inicial
- 1.2 Nube de puntos y malla
- 1.3 MDS, ortomosaico e índices

5.1.5. PROCESAMIENTO INICIAL.

En la parte inferior izquierda podemos encontrar los pasos para el procesamiento, debemos tener en cuenta que para realizar cada uno de los pasos tenemos que tener activado solo el paso a realizar y desactivar los otros dos. Para el procesamiento inicial, desactivamos el paso 2 y 3, dejando únicamente el paso 1 y damos clic en “Opciones de procesamiento”.

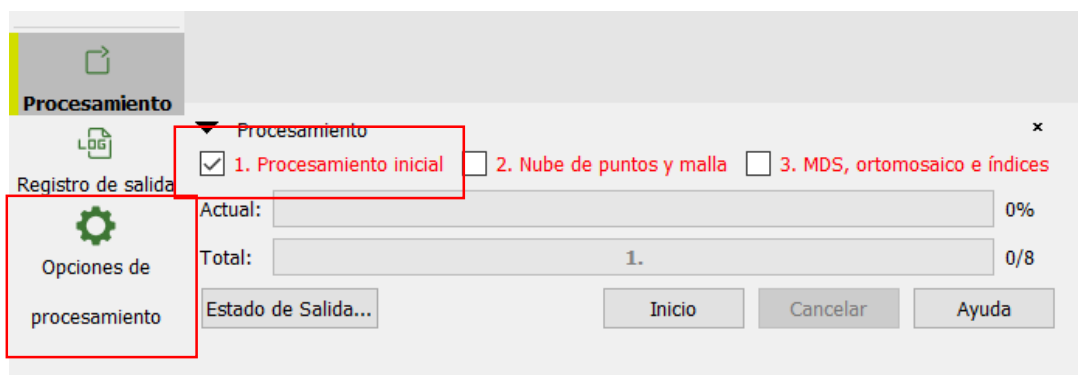


Figura: 5.1.5.1: Procesamiento inicial.
Fuente: Propia.

Al dar clic en opciones de procesamiento se nos abre una ventana en donde vamos a verificar que esté seleccionado únicamente la opción de “Procesamiento inicial”, aquí podemos elegir la escala de imagen y seleccionar que se genere la previsualización del informe de calidad una vez finalizado el procesamiento, luego damos clic en “aceptar”.

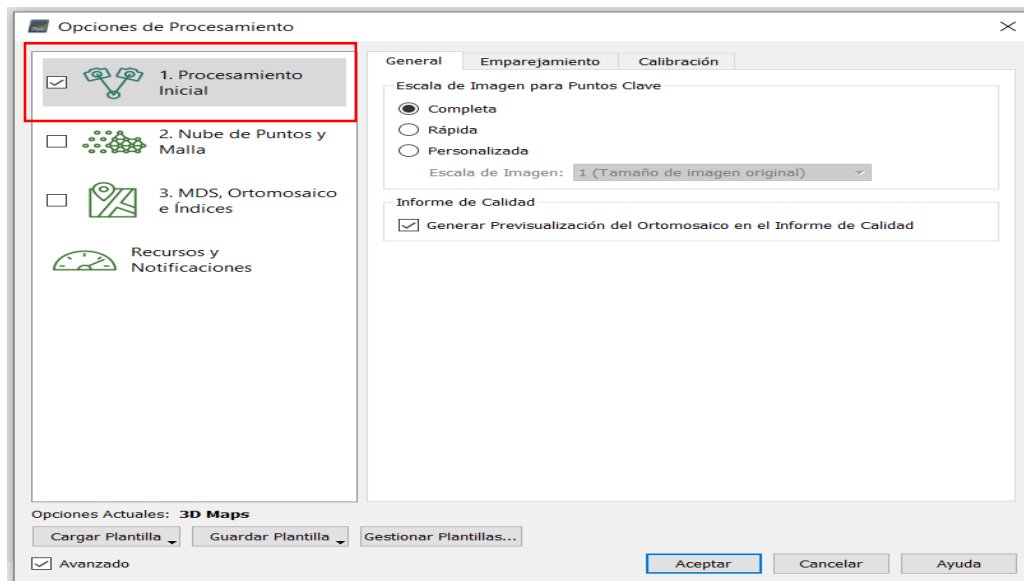


Figura 5.1.5.2: Opciones de procesamiento inicial.
Fuente: Propia.

Una vez realizados estos pasos procedemos a dar clic en el botón “Inicio” y empezará el procesamiento inicial. En este paso el programa comenzará a traslapar todas las imágenes que compartan un punto en común, para así generar la nube de puntos densa que se someterá al proceso de controles de calidad hasta obtener los productos finales.

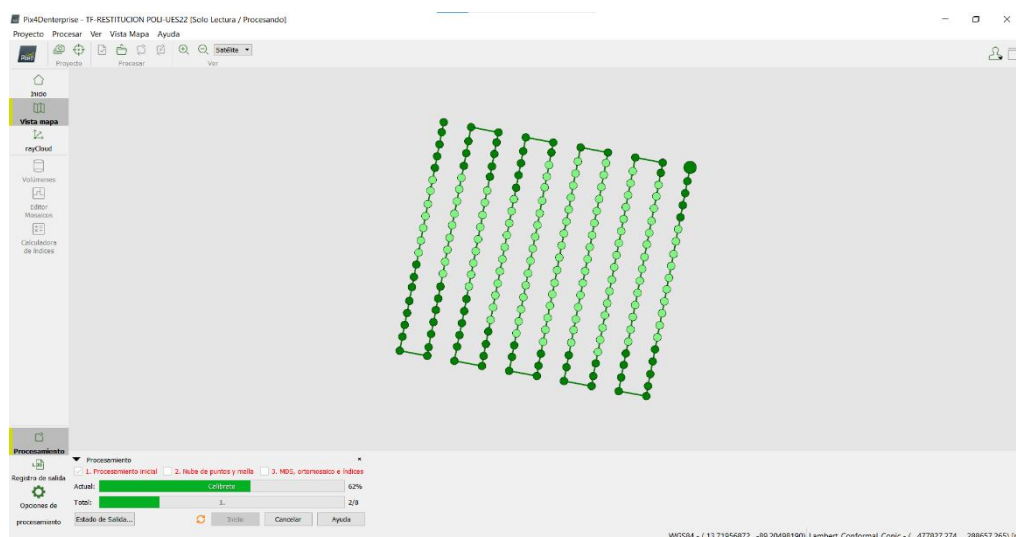


Figura 5.1.5.3: Realización del procesamiento inicial.
Fuente: Propia.

Al finalizar el proceso podremos tener la vista previa del informe de reporte de calidad.

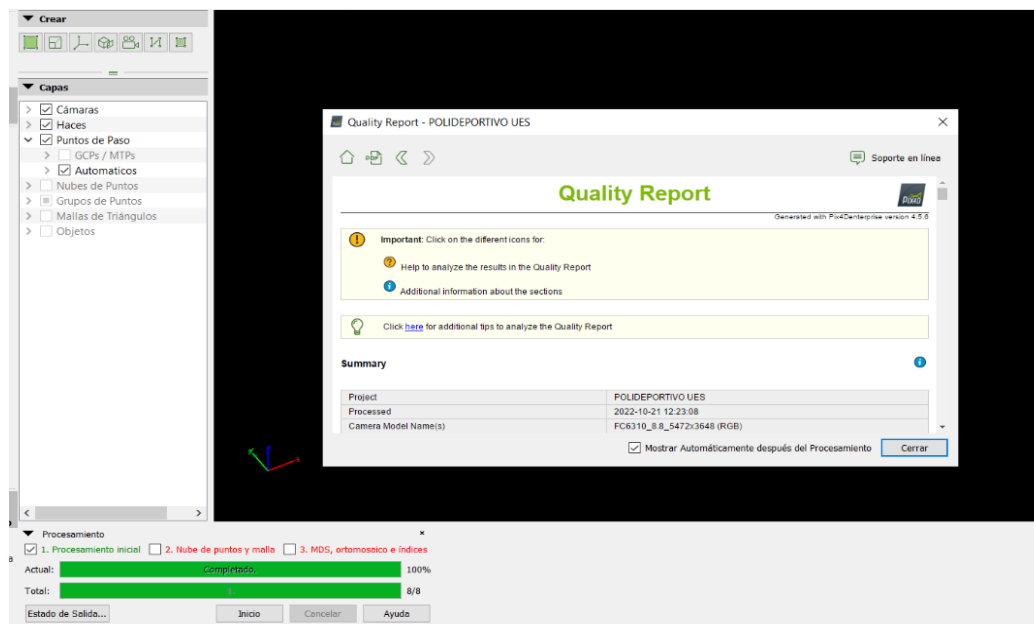


Figura 5.1.5.4: Informe de reporte de calidad del procesamiento inicial.
Fuente: Propia.

Una vez finalizado el paso 1 podemos ver la nube de puntos generada.

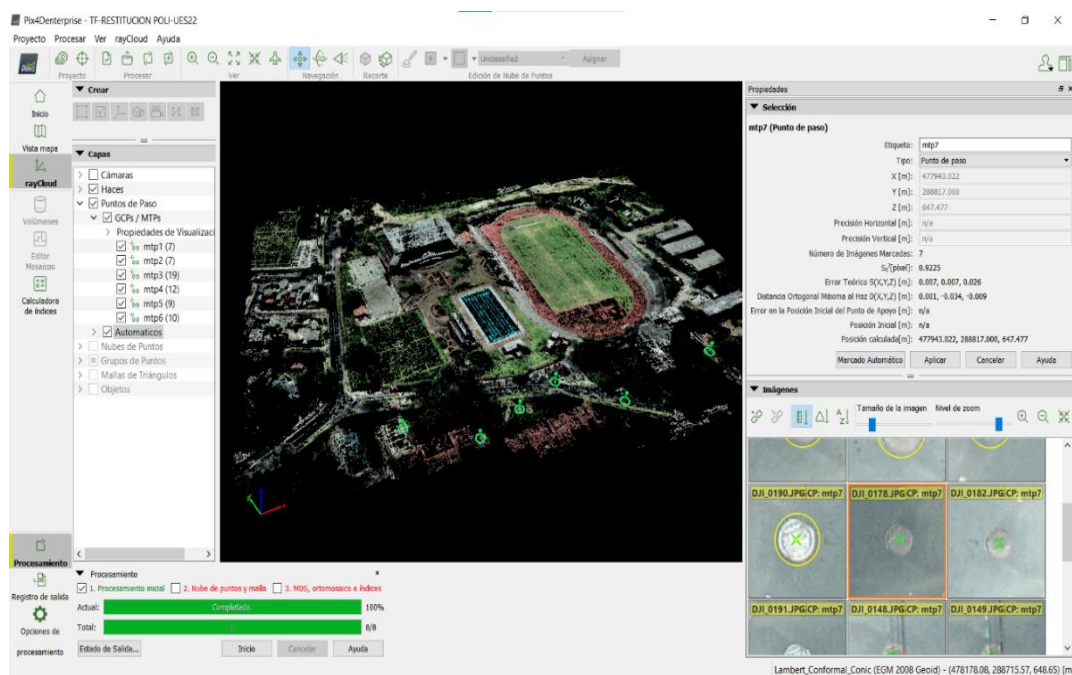


Figura 5.1.5.5: Nube de puntos generada luego del procesamiento inicial.
Fuente: Propia.

Podemos desactivar las cámaras para una mejor visualización de la nube de puntos.

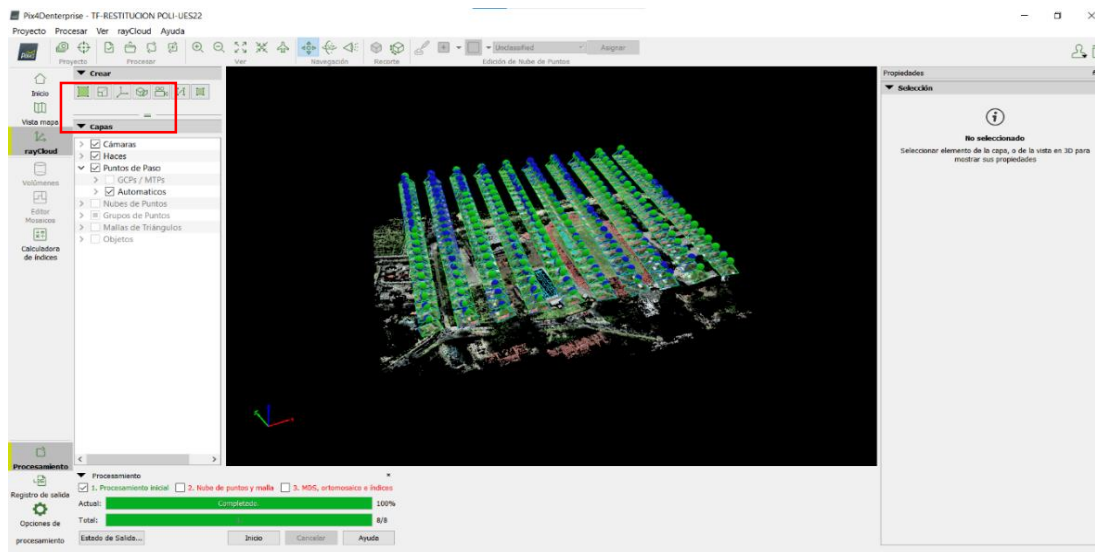


Figura 5.1.5.6: Desactivación de cámaras.
Fuente: Propia.

5.1.6. PUNTOS DE PASO.

Los puntos de paso son puntos de control fotogramétricos foto identificable que sirven para unir, emparejar, orientar y alinear las imágenes, uniendo puntos en común entre imágenes, esto con el objetivo de reducir la distorsión de los productos finales.

El número de puntos de paso que utilizemos dependerá del tamaño del proyecto y puede variar de 10 a 50 puntos de paso, en el caso de nuestro proyecto, al ser un poco extenso, se ubicaron un total de 29 puntos de paso de la siguiente manera:

En la nube de puntos densa generada en el paso 1, iremos seleccionando puntos en busca de encontrar el punto que mejor se acople a las condiciones que se requieren para llamarlo punto de paso, en este caso ocuparemos una

alcantarilla, primero damos clic en el ícono de las cadenas y en la primer imagen nos acercaremos lo más que podamos al centro de la alcantarilla, haremos lo mismo para la siguiente imagen y luego damos clic en “marcado automático” y en el botón de foco de selección (el ícono con las 4 flechas hacia el centro), y esto hará que se seleccione automáticamente el centro de la alcantarilla en todas las imágenes restantes, luego daremos clic en el botón “Aplicar” para guardar el punto de paso, haremos lo mismo para los siguientes puntos de paso que elijamos.



Figura 5.1.6.1: Selección de puntos de paso.
Fuente: Propia.

Una vez tengamos todos los puntos de paso de nuestro proyecto, en la pestaña “Procesar” damos clic en “Reemparejar y optimizar” y estaremos concluyendo el paso de asignar puntos de paso al proyecto.

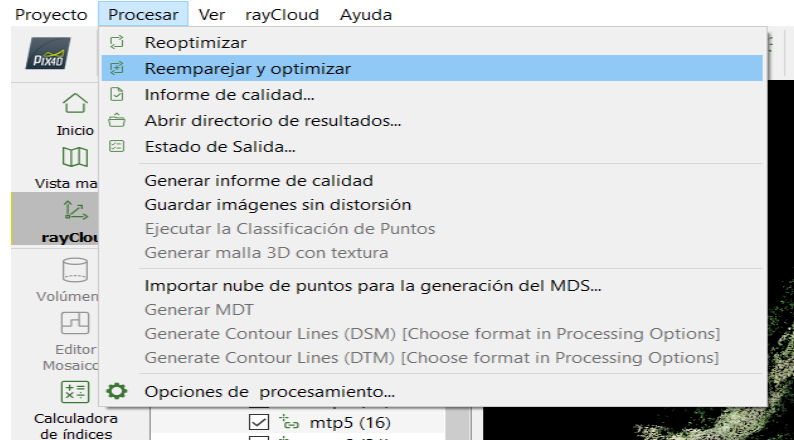


Figura 5.1.6.2: Reemparejando y optimizando puntos de paso.
Fuente: Propia.

Podemos observar que para cada punto de paso seleccionado nos aparece el número de imágenes en las que se encuentra dicho punto a la par del nombre del punto de paso.

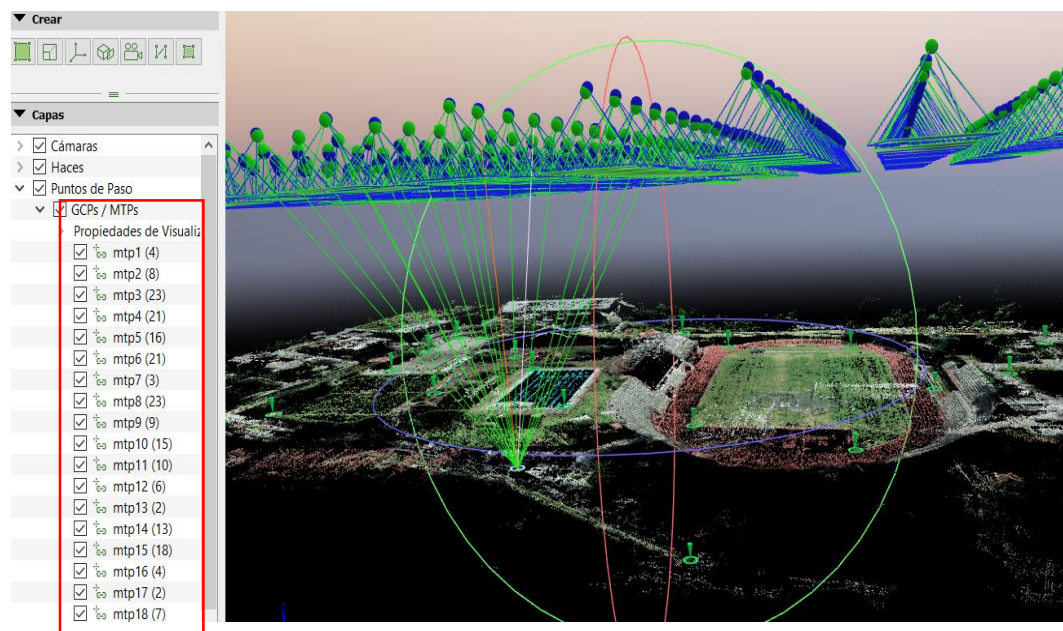


Figura 5.1.6.3: Propiedades de visualización de puntos de paso.
Fuente: Propia.

5.1.7. PUNTOS DE CONTROL.

Los puntos de control, GCP (Ground Control Points), corresponden a puntos geográficos estratégicos de referencia distribuidos a lo largo del entorno de mapeo y bajo coordenadas geográficas precisas. En otras palabras, son localizaciones que servirán como referencias visuales en los mapeos y que posteriormente podrán ser utilizadas como puntos estratégicos a emplear durante la georreferenciación de las imágenes para posicionar correctamente los resultados.

De esta forma, durante el procesado de las imágenes con herramientas de fotogrametría, podremos establecer una correlación entre las posiciones de los puntos de control de la imagen y las coordenadas reales en las que deberán encontrarse.

Para seleccionar nuestros puntos de control lo haremos de la siguiente manera.

En la pestaña “Proyecto”, seleccionamos “Gestor GCP/MTP”.

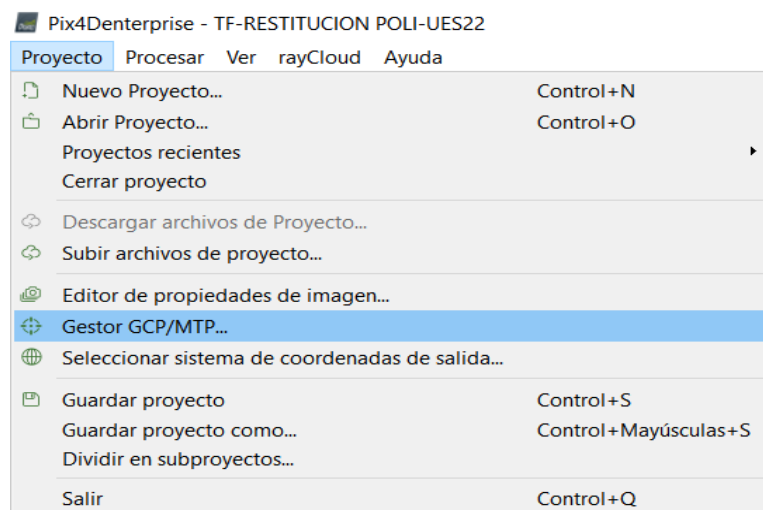


Figura 5.1.7.1: Gestor GCP/MTP.

Fuente: Propia.

En la siguiente ventana damos clic en el botón “importar puntos de apoyo” para poder importar los puntos de apoyo previamente tomados en campo.

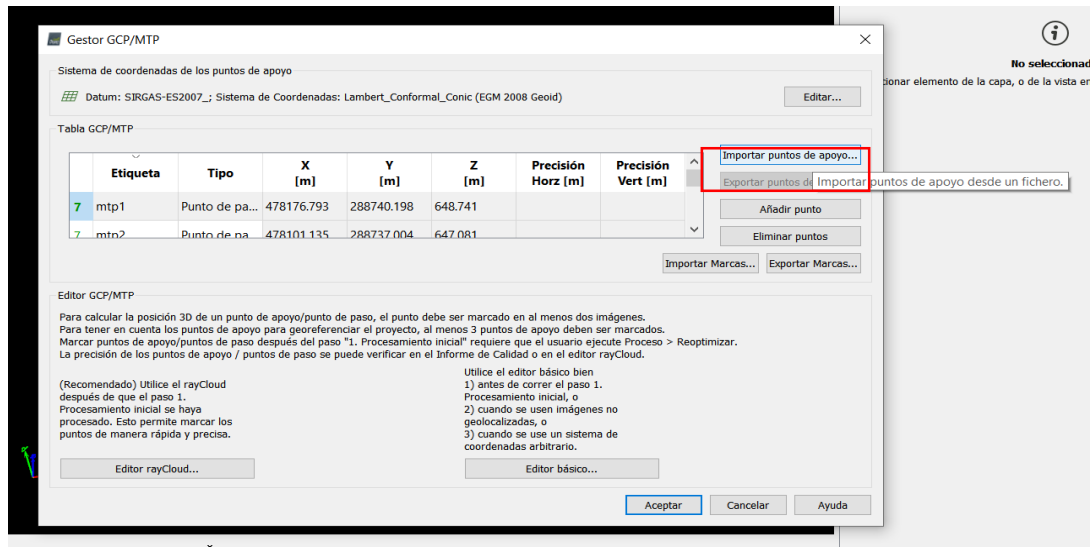


Figura 5.1.7.2: Importación de puntos de control.

Fuente: Propia.

Podremos ver que en la tabla GCP/MTP ya aparecen los PCF que hemos importado con sus respectivas coordenadas y el sistema de referencia correspondiente. Damos clic en “Aceptar”.

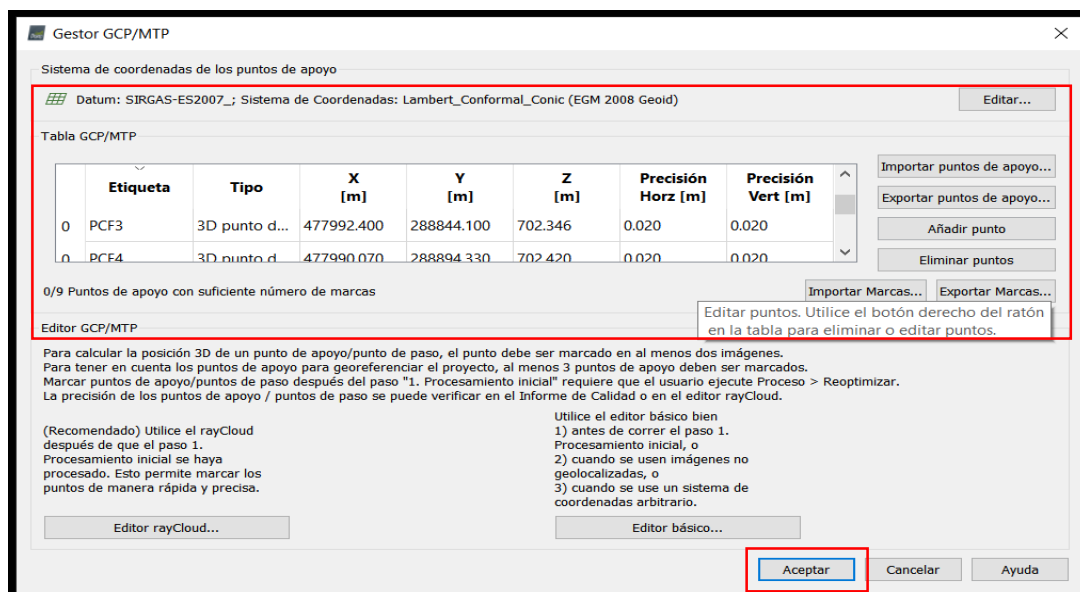


Figura 5.1.7.3: Visualización de puntos de control importados.

Fuente: Propia.

El programa nos preguntará si deseamos georreferenciar el proyecto y damos clic en “sí”.

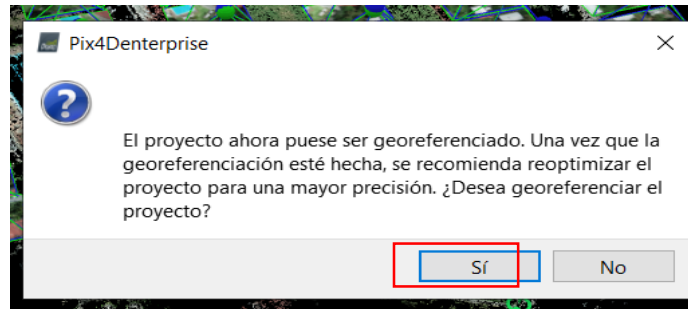


Figura 5.1.7.4: Georreferenciación de proyecto creado en pix4dmapper.
Fuente: Propia.

Podemos ver los PCF cargados en nuestro proyecto, posteriormente tendremos que georreferenciar la nube de puntos densa a nuestros puntos de control, para esto, seleccionaremos nuestros puntos de control y en las imágenes que se nos muestran al lado derecho, nos acercaremos lo más que podamos al centro de las lonas o los objetos que asignamos como puntos de control en campo que están ubicados en el terreno y daremos clic en “Marcado automático” o en el botón foco de selección y luego el botón “Aplicar”.

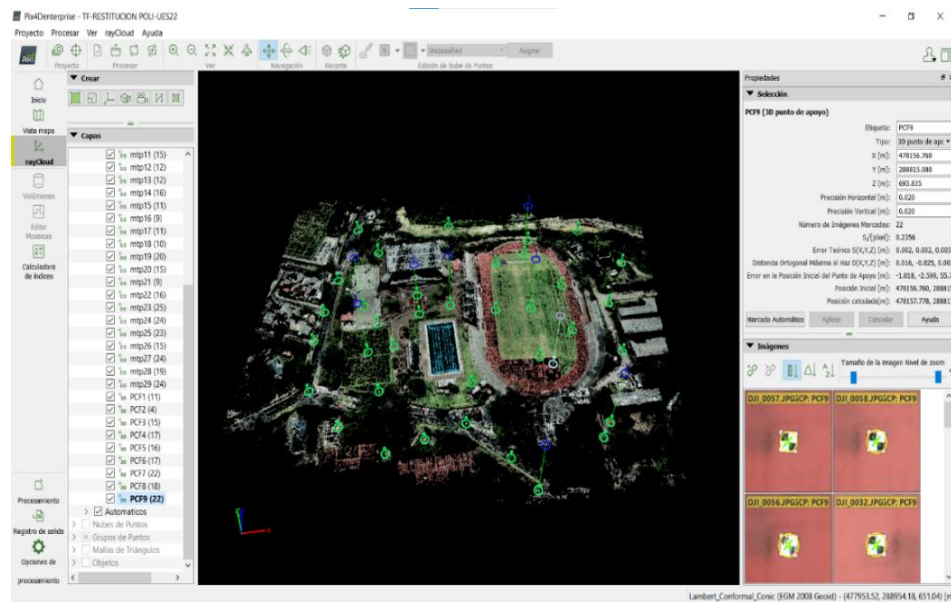


Figura 5.1.7.5: Georreferenciación de nube de puntos.
Fuente: Propia.

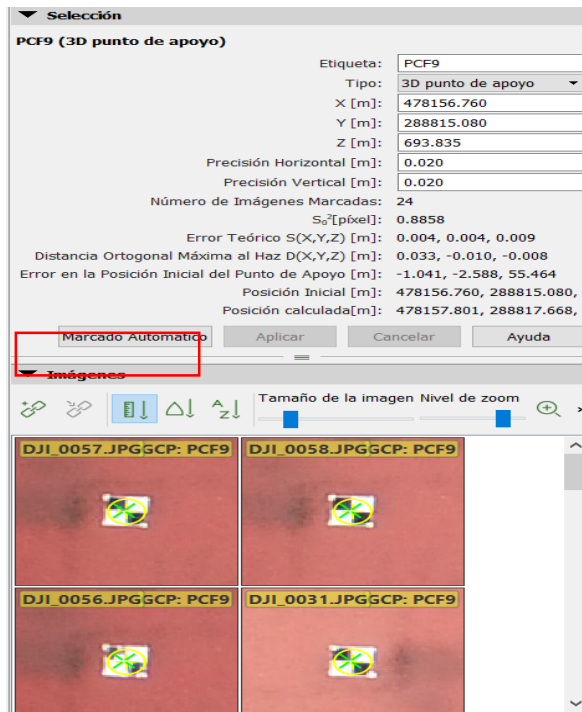


Figura 5.1.7.6: Selección de puntos de control.
Fuente: Propia.

Una vez hemos georreferenciado nuestros puntos de control, nos iremos a la pestaña “Procesar” y seleccionamos “reemparejar y optimizar” para concluir con el paso de asignación de puntos de control.

5.1.8. NUBE DE PUNTOS Y MALLA.

Una vez asignados nuestros puntos de paso y puntos de control al proyecto, podemos realizar el paso 2, quitamos el cheque al procesamiento 1 y 3 y dejamos únicamente el 2 y nos vamos a “Opciones de procesamiento”.

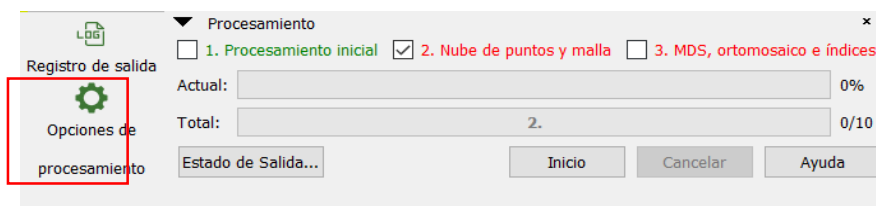


Figura 5.1.8.1: Opciones de procesamiento de nube de puntos y malla.
Fuente: Propia.

En la siguiente ventana se nos muestra la configuración recomendada de los parámetros de la nube de puntos y la malla 3D con textura, para que nos aparezca debemos tener activada la opción “avanzado”.

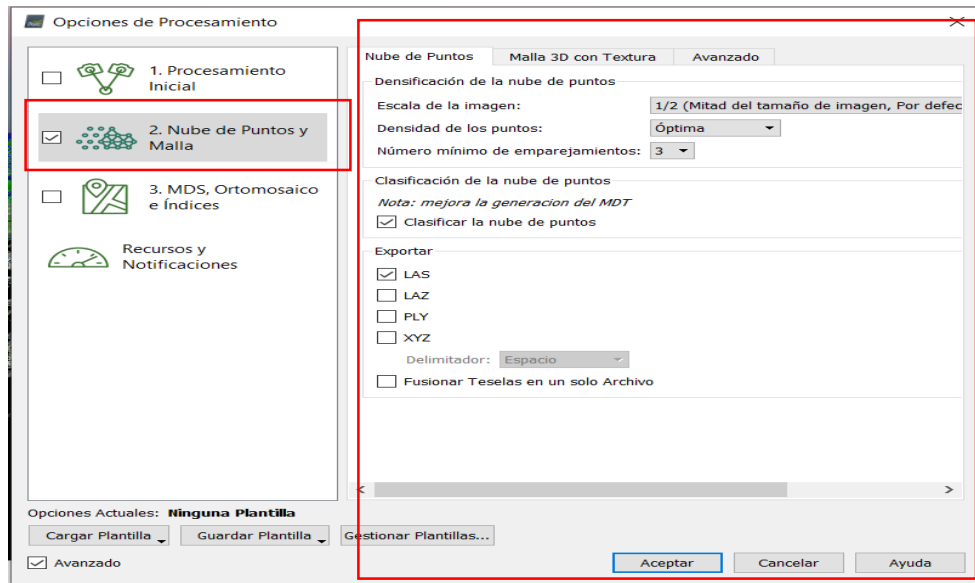


Figura 5.1.8.2: Opciones de procesamiento de nube de puntos.
Fuente: Propia.

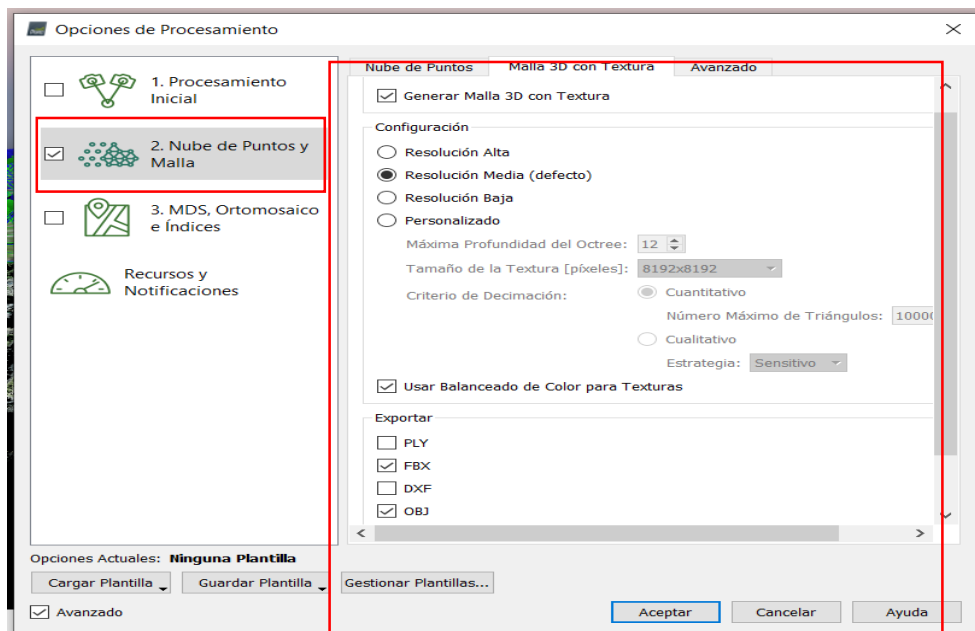


Figura 5.1.8.3: Opciones de procesamiento de malla 3D con textura.
Fuente: Propia.

Damos clic en “Aceptar”.

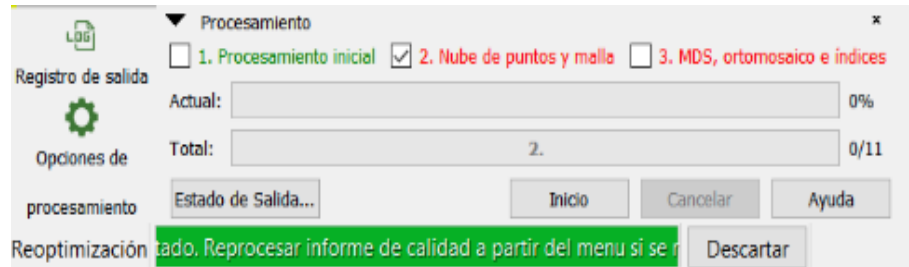


Figura 5.1.8.4: Inicio de procesamiento 2.
Fuente: Propia.

Luego damos clic en “Inicio” para realizar el procesamiento 2.

Al finalizar el procesamiento se nos muestra en pantalla el informe de reporte de calidad del paso 2.

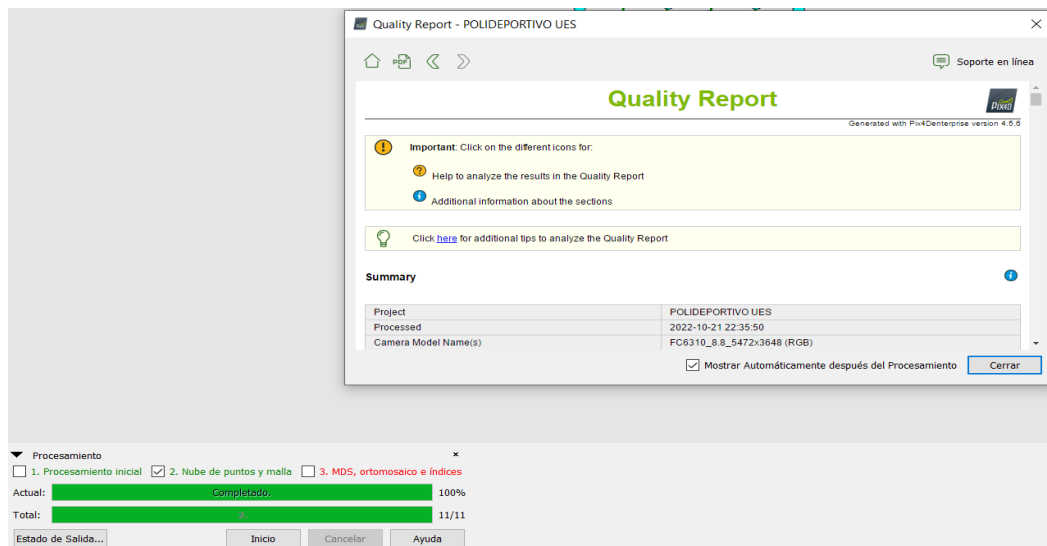


Figura 5.1.8.5: Informe de reporte de calidad de procesamiento 2.
Fuente: Propia.

El producto del procesamiento 2 es la nube de puntos y la malla de triángulos, estas deben seleccionarse en “capas” para poder generarlas.

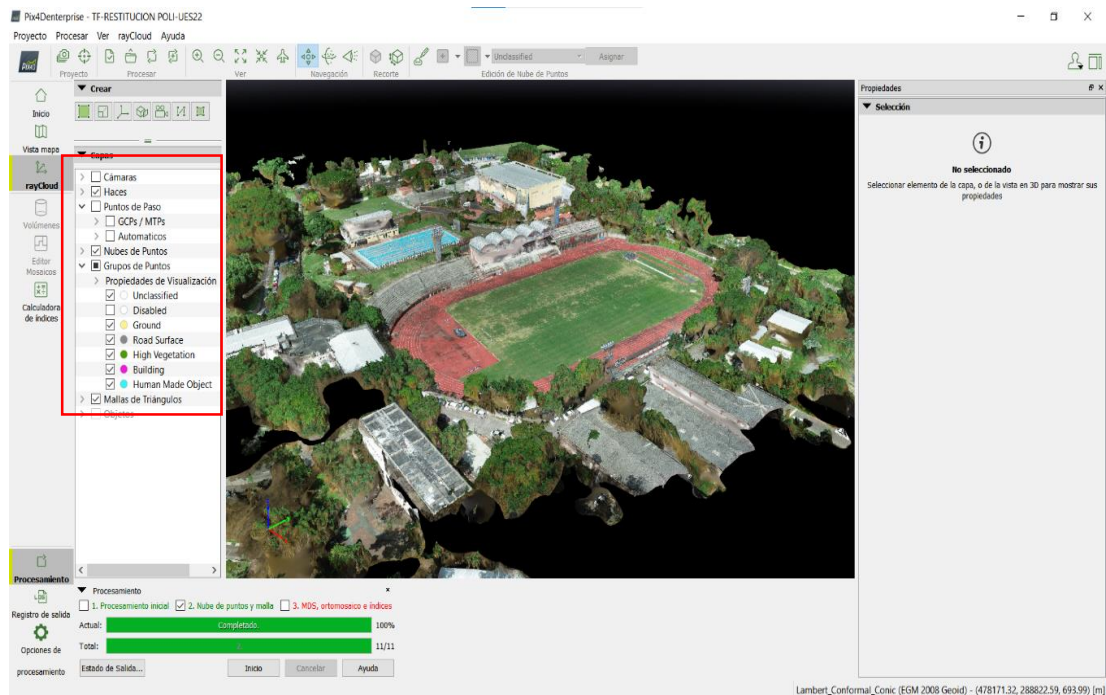


Figura 5.1.8.6: Selección de capas.

Fuente: Propia.

A continuación, se presenta el resultado obtenido del procesamiento 2.



Figura 5.1.8.7: Resultado obtenido del procesamiento 2.

Fuente: Propia.

5.1.9. MDS, ORTOMOSAICO E ÍNDICES.

En el tercer procesamiento generaremos el archivo raster que contiene el Modelo Digital de Superficie (MDS) en formato Geo TIFF y un Ortomosaico en formato Geo TIFF. Para esto haremos lo siguiente.

En procesamientos seleccionamos el paso 3 poniéndole el cheque y desactivamos el cheque a los pasos anteriores, damos clic en “opciones de procesamiento” y se nos abrirá la siguiente ventana:

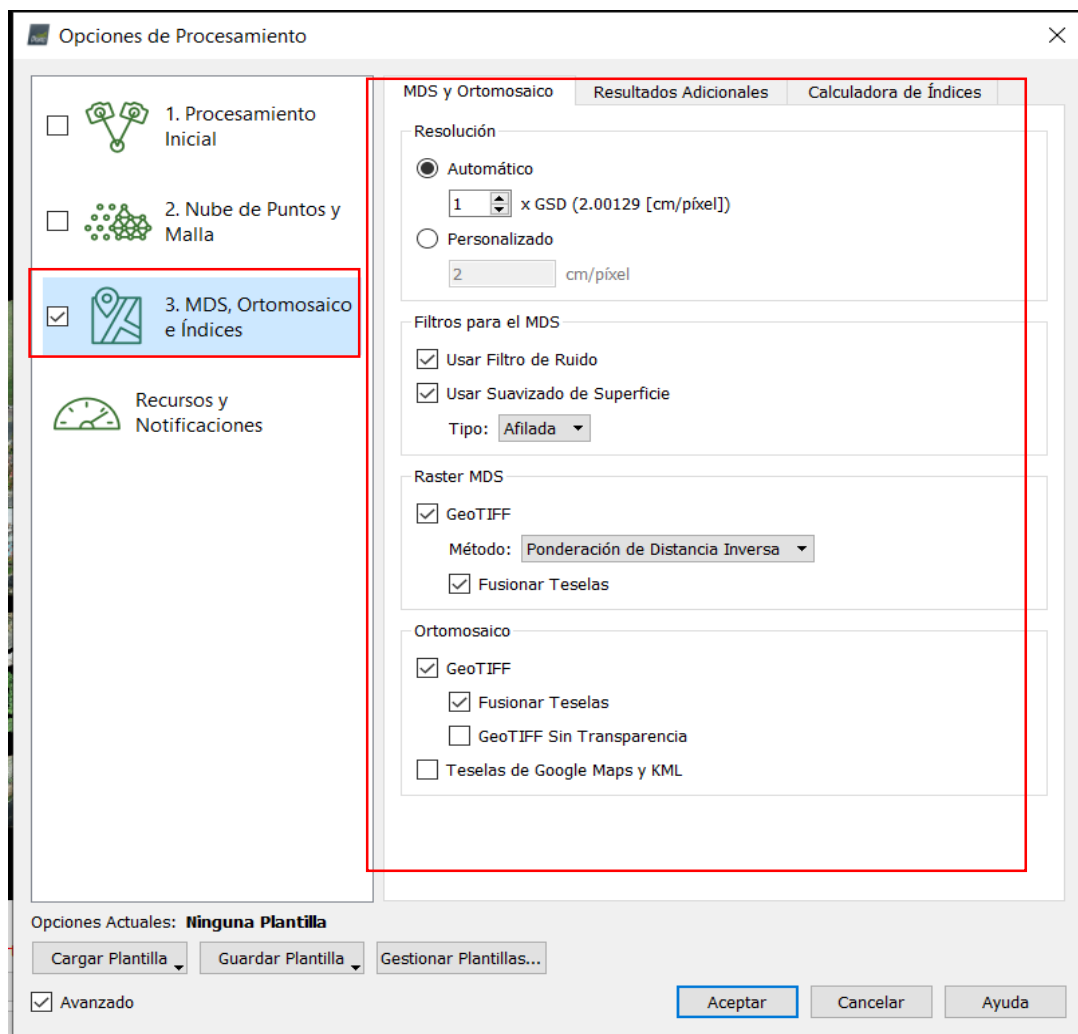


Figura 5.1.9.1: Opciones de procesamiento de MDS y ortomosaico.
Fuente: Propia.

En la pestaña “MDS y Ortomosaico” aplicaremos la configuración que se muestra en la imagen para generar el archivo MDS y nuestro Ortomosaico en formato GeoTIFF.

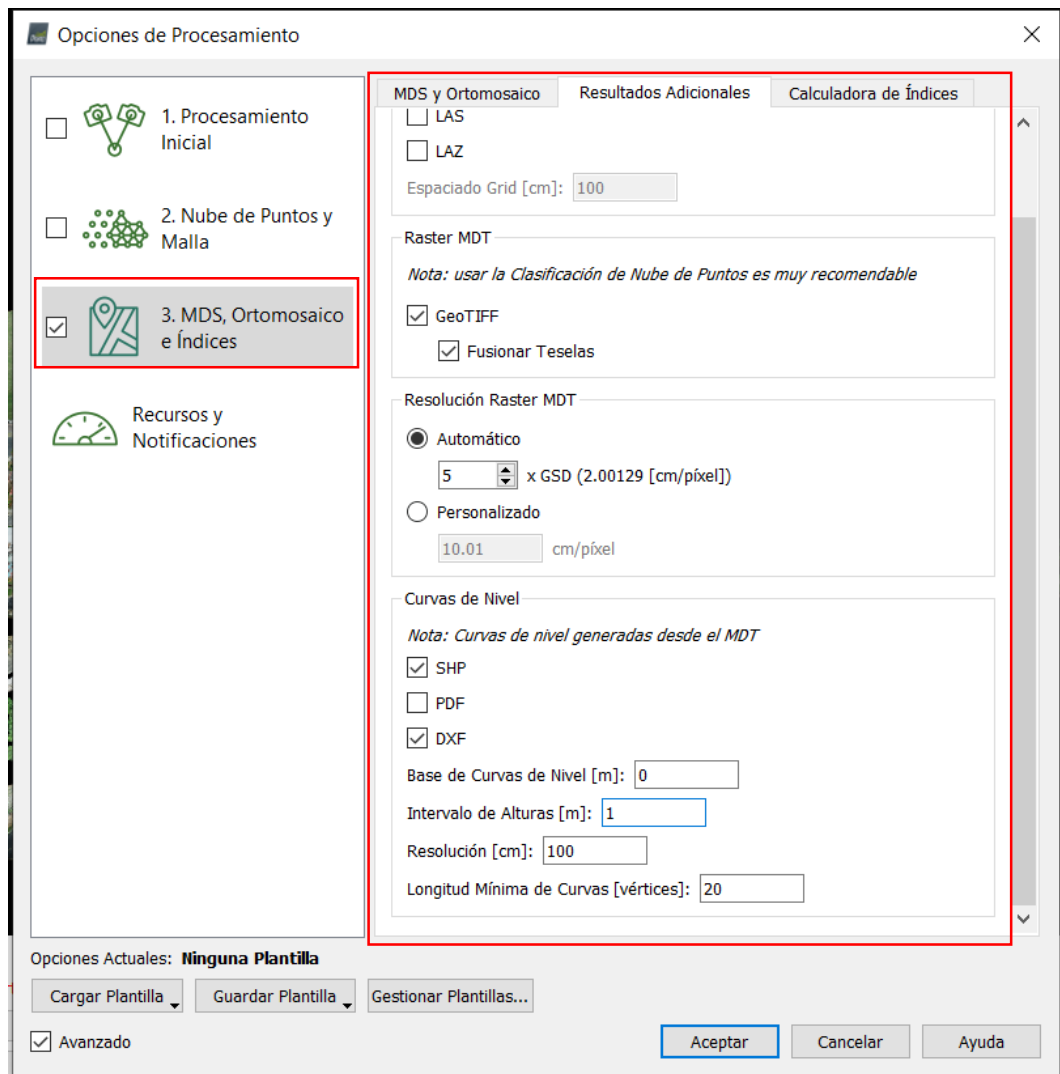


Figura 5.1.9.2: Opciones de procesamiento de resultados adicionales.
Fuente: Propia.

En la pestaña “Resultados adicionales” aplicaremos la configuración que se muestra en la imagen para el archivo raster y las curvas de nivel en formato Shape y DXF, damos clic en “Aceptar” para aplicar estas configuraciones.

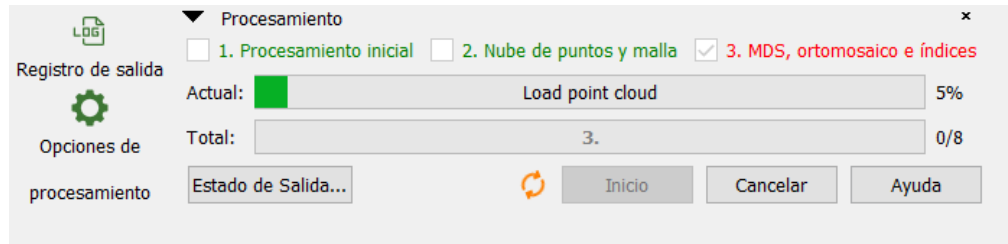


Figura 5.1.9.3: Inicio de procesamiento 3.
Fuente: Propia.

Daremos clic en “inicio” y empezará a cargar el procesamiento 3.

Al Finalizar el procesamiento se nos mostrará en pantalla el informe de reporte de calidad del paso 3.

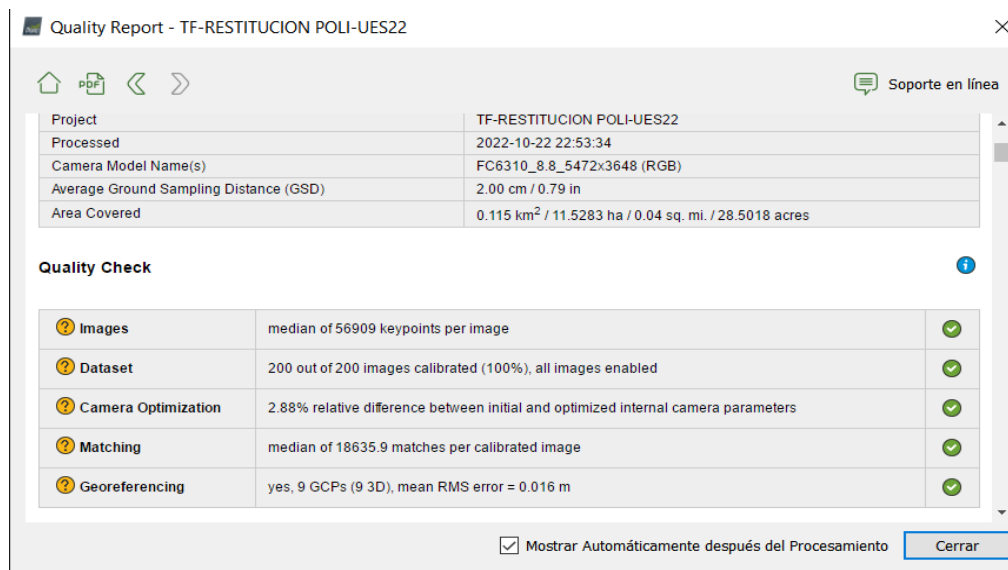


Figura 5.1.9.4: Informe de reporte de calidad del procesamiento 3.
Fuente: Propia.

En la pestaña “Editor de Mosaicos” podremos ver el Ortomosaico generado luego de finalizados los 3 pasos del procesamiento.

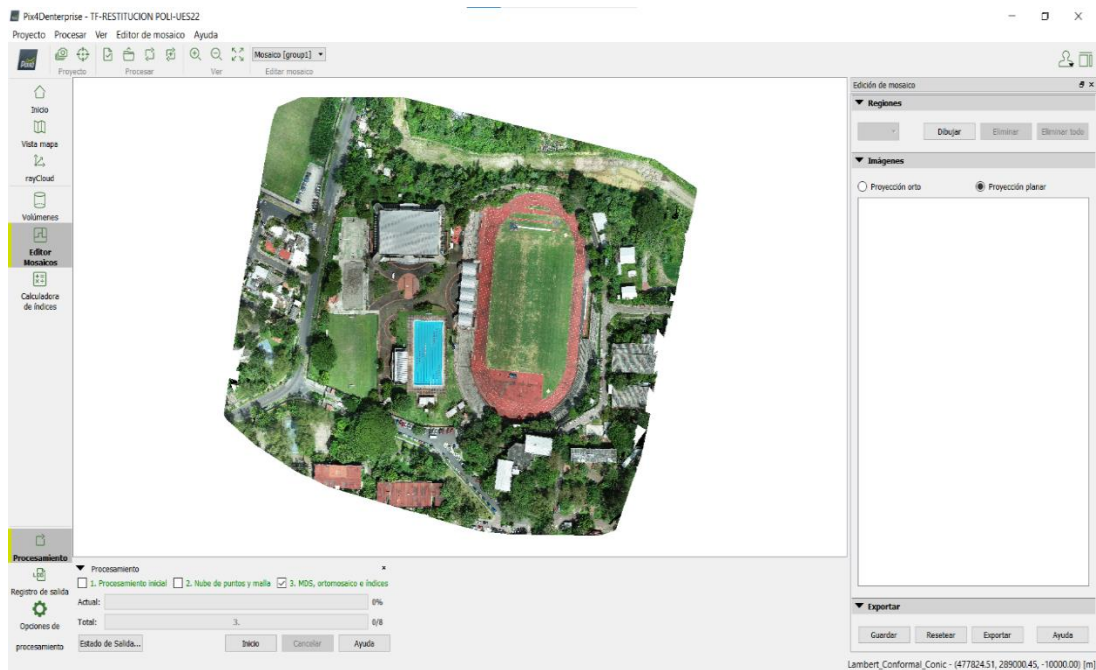


Figura 5.1.9.5: Ortomosaico generado en pix4dmapper.
Fuente: Propia.

También podemos seleccionar el archivo de Modelo Digital de Superficie (DSM) generado.

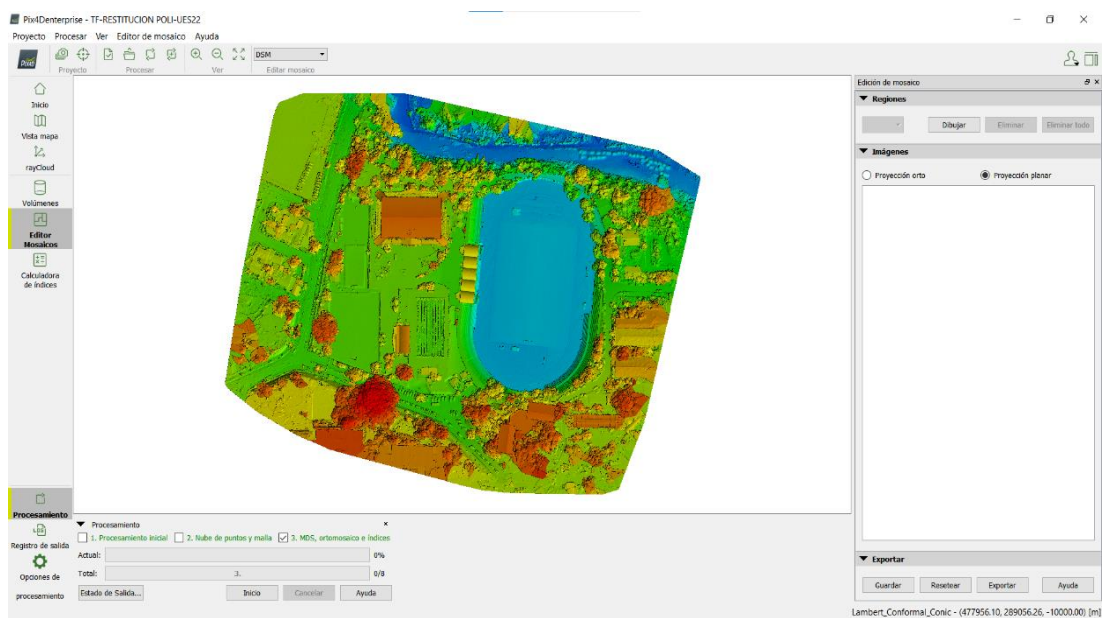


Figura 5.1.9.6: Modelo Digital de Superficie (DSM) generado en pix4dmapper.
Fuente: Propia.

De igual manera, se genera el Modelo Digital de Terreno (MDT o DTM).

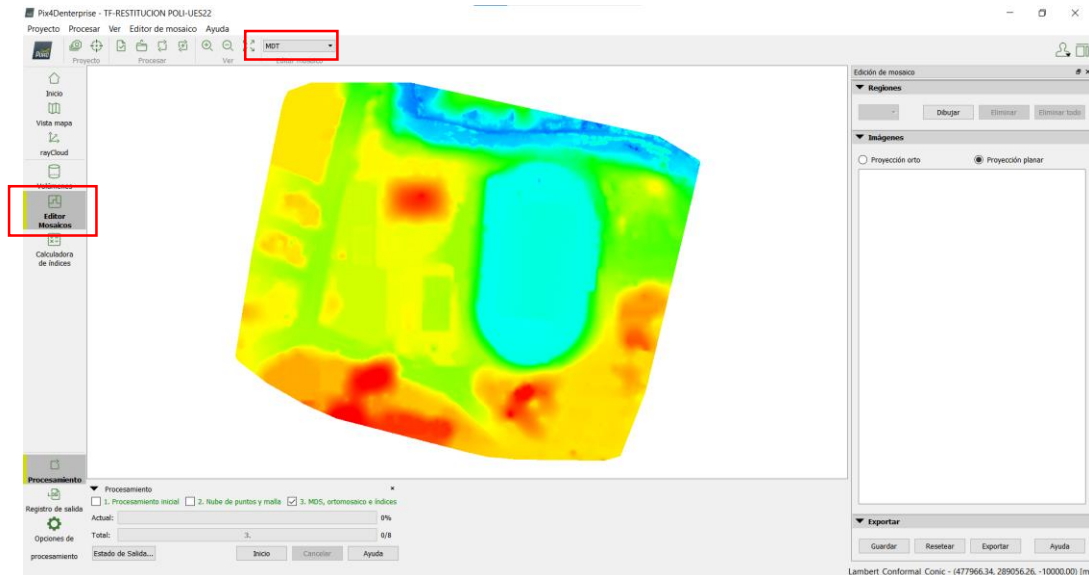


Figura 5.1.9.7: Modelo Digital de Terreno (MDT) generado en pix4dmapper.
Fuente: Propia.

Todos los resultados generados en los Pasos 1, Paso 2 y Paso 3, el programa los crea en la carpeta en donde se creó el proyecto.

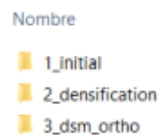


Figura 5.1.9.8: Carpetas creadas del proyecto.
Fuente: Propia.

5.2. PASOS PARA TRANSFORMAR UN ARCHIVO RASTER GEORREFERENCIADO A UN ARCHIVO VECTORIAL GEORREFERENCIADO.

Antes de describir el procedimiento para transformar un archivo raster georreferenciado a un archivo vectorial georreferenciado es necesario explicar que es un archivo “. ecw”.

ARCHIVO ECW: ECW es un formato de compresión, optimizado para imágenes aéreas y de satélite. El archivo ECW puede contener datos recopilados con cámaras satelitales o aéreas y georradars ubicados en el espacio.

El formato ECW está optimizado para imágenes aéreas y satelitales para satisfacer las necesidades de geolocalización y mapeo de datos. Las imágenes en este formato se utilizan junto con los datos geoespaciales.

Los datos de imagen almacenados en el archivo ECW se comprimen usando un algoritmo de compresión sin pérdida significativa de calidad de imagen. Este tipo de archivo es ideal para imágenes de gran formato, ya que el algoritmo de compresión ECW maneja muy bien las imágenes grandes, alcanzando razones de compresión de 1:10 a 1: 100 - resulta difícil de lograr usando otros algoritmos de compresión.

Una vez obtenido el archivo raster georreferenciado (ortofoto u ortomosaico) producto del procesamiento final realizado en el software Pix4D luego del vuelo fotogramétrico con dron, se recomienda convertir el archivo “.tif” a un archivo “.ecw” con el objetivo de disminuir el peso del archivo “.tif” sin perder la calidad en la resolución de los pixeles de la ortofoto y que este sea compatible para ser procesado vectorialmente con algún software de dibujo como por ejemplo una de las variantes de Autodesk. Para convertir el archivo “.tif” a “. ecw” se utilizó el software Global Mapper v18 realizando los siguientes pasos:

PASO #1: Se ejecuta el programa Global Mapper y se abre un archivo nuevo, en la ventana emergente se localiza el archivo “.tif” (ortofoto) que deseamos convertir a un archivo “. ecw”.



Figura 5.2.1: Entorno de trabajo del software Global Mapper.
Fuente: Propia.

PASO #2: Una vez cargado el archivo “.tif” dentro del área de trabajo de Global Mapper, se selecciona del centro de control la capa que contiene la ortofoto.

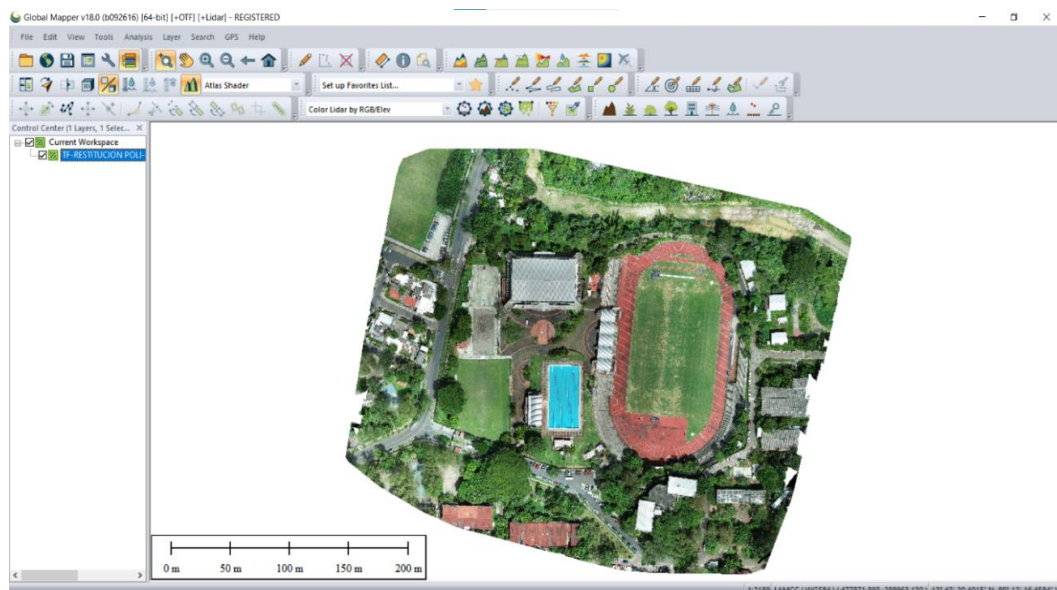


Figura 5.2.2: Ortofoto georreferenciada del polideportivo de la Universidad de El Salvador, cargada en el software Global Mapper.
Fuente: Propia.

PASO #3: Dar clic derecho sobre la capa que contiene la ortofoto y seleccionar la opción “Layer” seguido de la opción “export”.

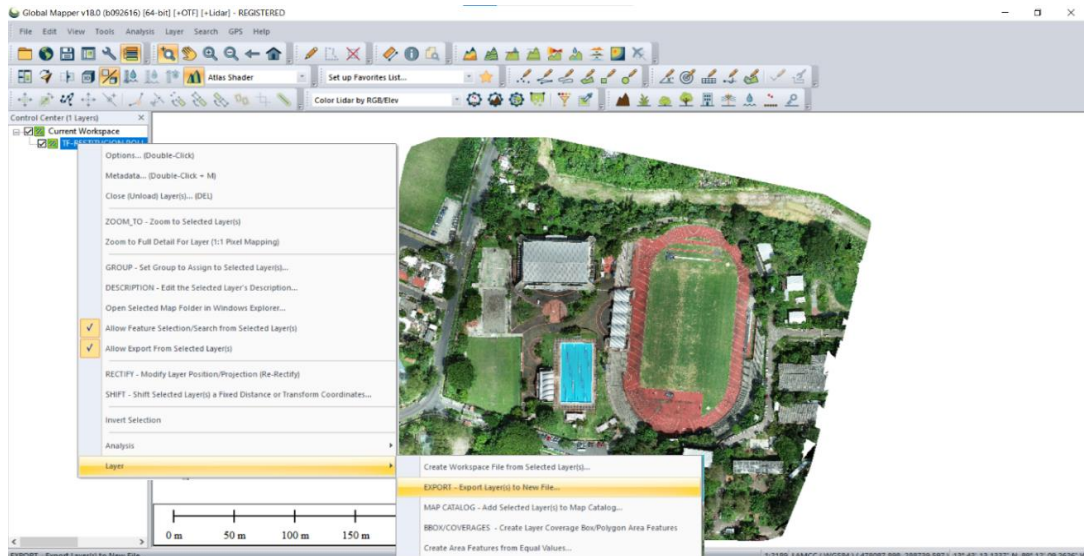


Figura 5.2.3: Ejemplo para seleccionar la opción “export” en el software Global Mapper.
Fuente: Propia.

PASO#4: Seleccionar en la ventana emergente el formato del archivo que deseamos convertir en este caso se busca y selecciona el formato “. ecw”.

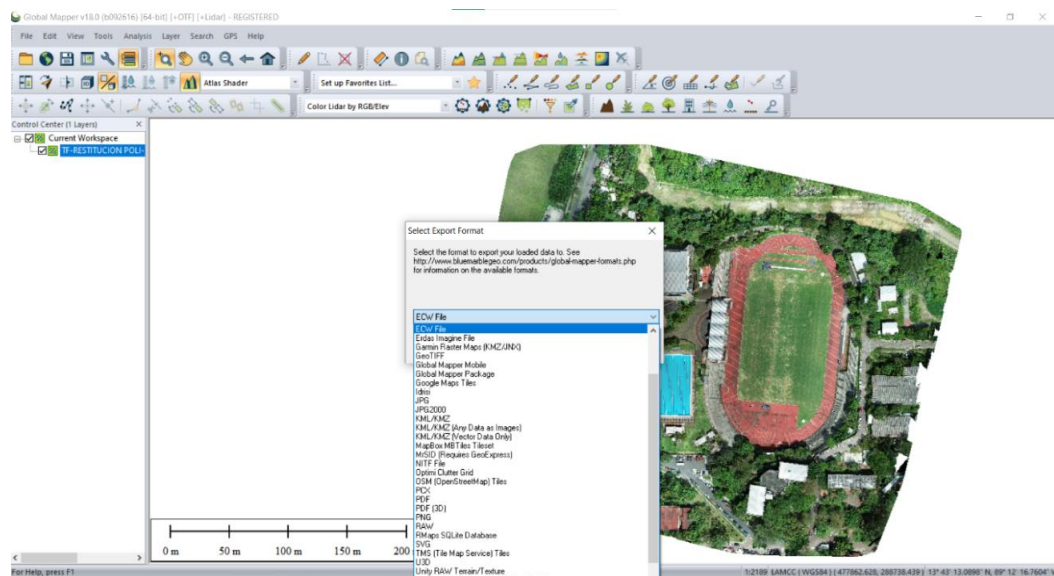


Figura 5.2.4: Ventana emergente “Select Export Format” donde se selecciona el formato de conversión “. ecw” en el software Global Mapper.
Fuente: Propia.

PASO #5: En la ventana emergente se dejan las opciones del formato por defecto y se selecciona el botón “OK”.

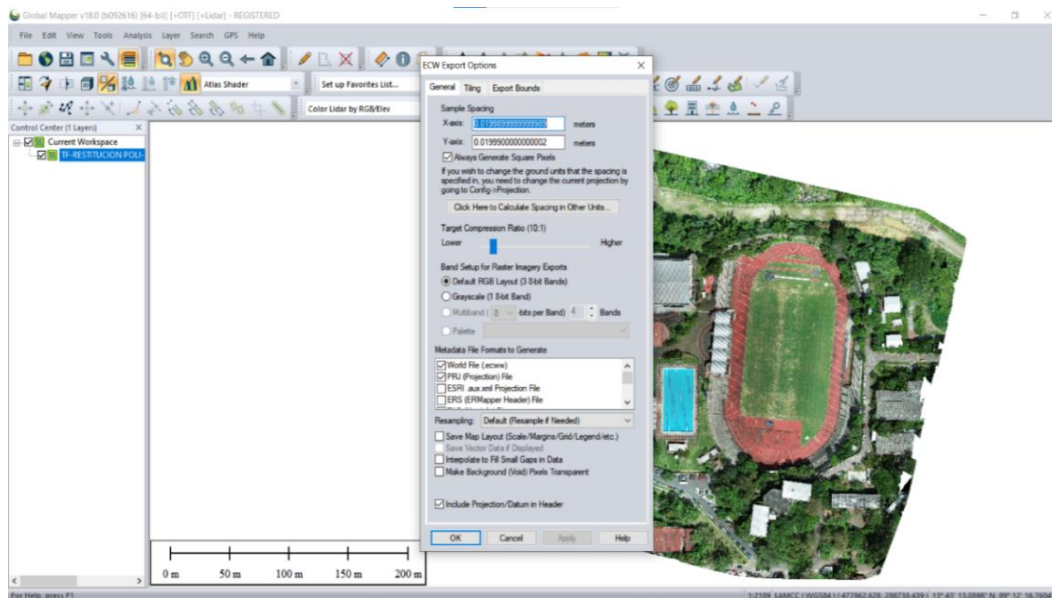


Figura 5.2.5: Ventana emergente “ECW Export Options” en el software Global Mapper.

Fuente: Propia.

PASO #6: El software Global Mapper comienza a realizar la conversión del formato “.tif” a “. ecw”.

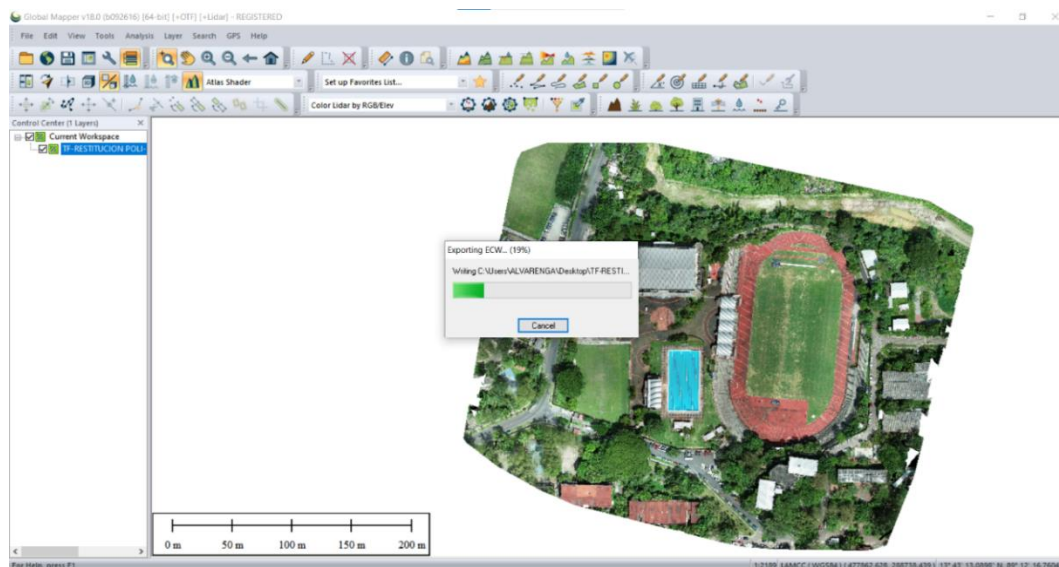


Figura 5.2.6: Conversión del archivo “.tif” a “. ecw” por el software Global Mapper.

Fuente: Propia.

PASO #7: Abrir el software de dibujo con el cual se realizará el vectorizado de la ortofoto en formato “. ecw”, en nuestro caso se utilizó el software AutoCAD Civil3D de Autodesk.

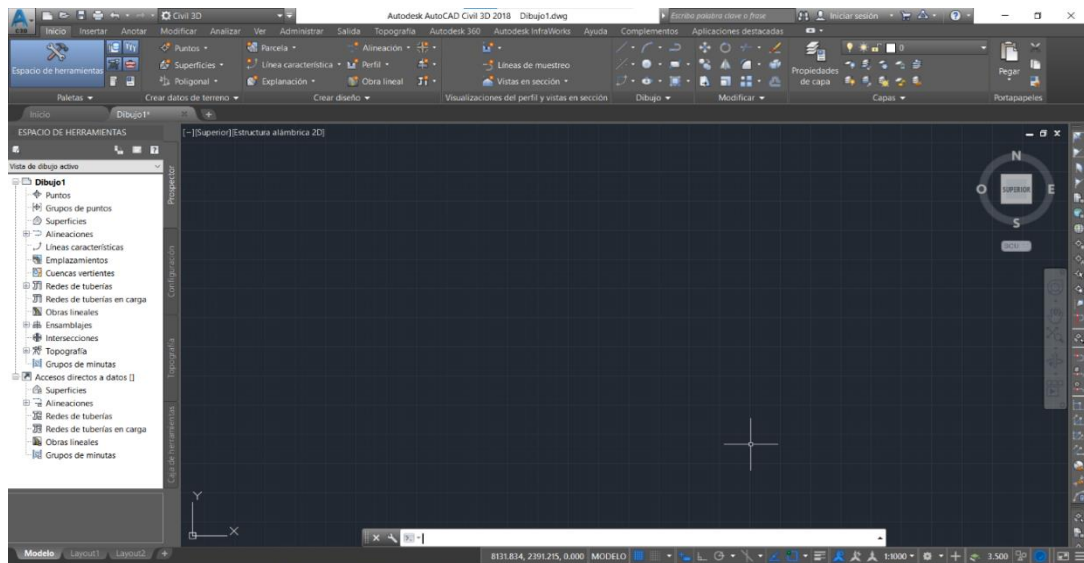


Figura 5.2.7: Ventana principal del software AutoCAD Civil3D.
Fuente: Propia.

PASO#8: Seleccionar el modo de trabajo “planificación y análisis” del software AutoCAD Civil3D.

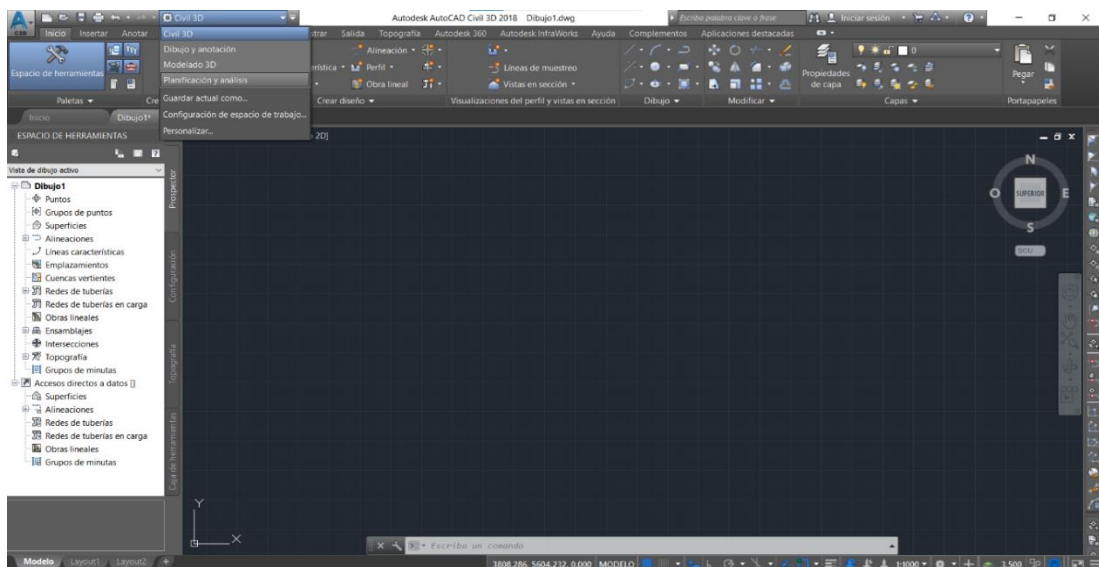


Figura 5.2.8: Selección del modo de trabajo “planificación y análisis” del software AutoCAD Civil3D.
Fuente: Propia.

PASO #9: Seleccionar la opción “Imagen” del modo de trabajo “planificación y análisis” de AutoCAD Civil3D.

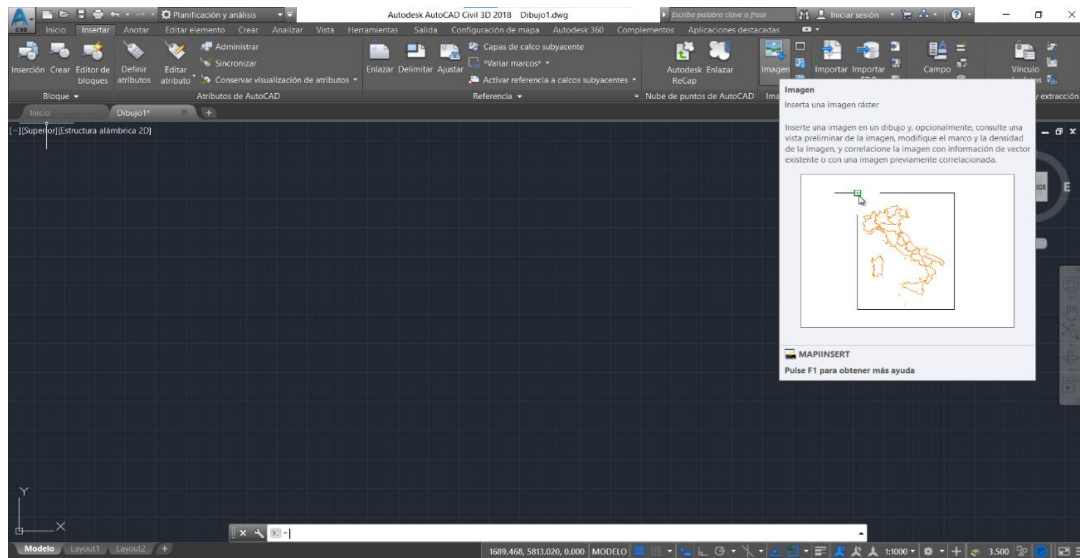


Figura 5.2.9: Selección de la opción “imagen” del modo de trabajo “planificación y análisis” del software AutoCAD Civil3D.

Fuente: Propia.

PASO #10: Búsqueda y selección de la ortofoto en formato “. ecw”, clic en abrir.

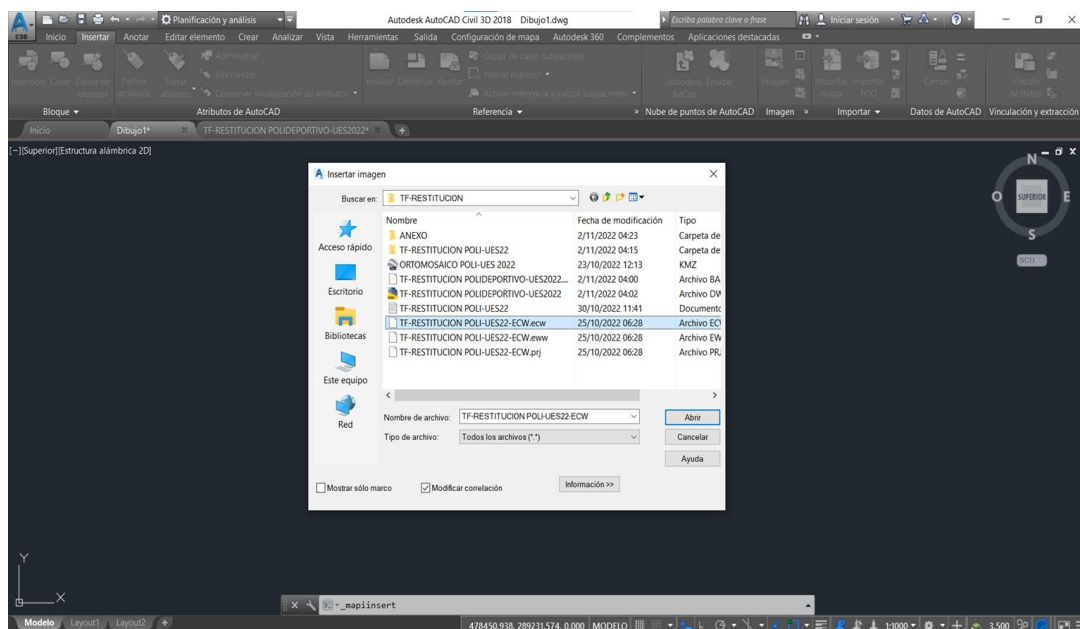


Figura 5.2.10: Búsqueda y selección de la ortofoto en formato “. ecw”.

Fuente: Propia.

PASO #11: Se verifica y analiza la información de la ventana emergente, clic en el botón “Aceptar”

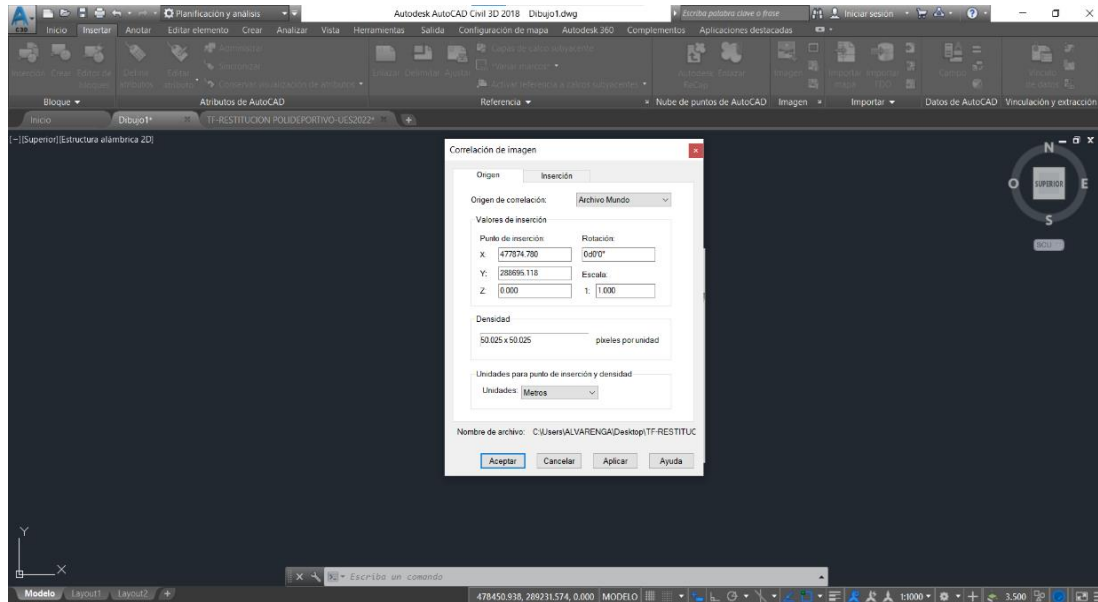


Figura 5.2.11: Ventana emergente “Correlación de imagen”.
Fuente: Propia.

PASO #12: Visualiza y verificar las coordenadas y calidad de píxeles de la ortofoto georreferenciada proveniente del archivo “. ecw”.

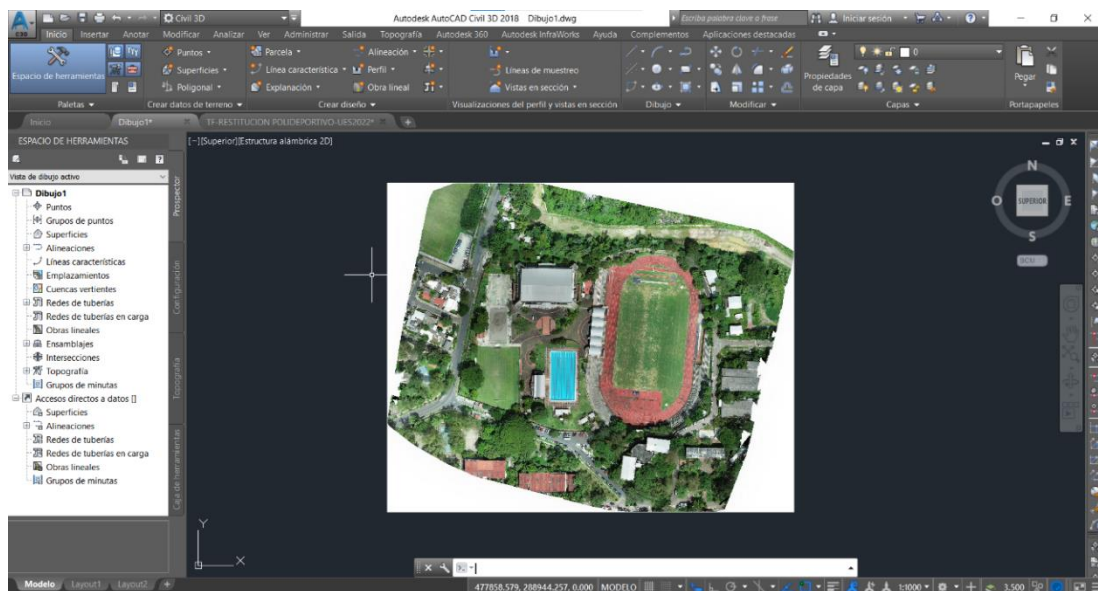


Figura 5.2.12: Ortofoto georreferenciada proveniente del archivo “. ecw” enlazada al software AutoCAD Civil3D.

Fuente: Propia.

PASO #13: Guardar el archivo generado en formato “.dwg”, el cual enlaza la ortofoto georreferenciada para su vectorización.

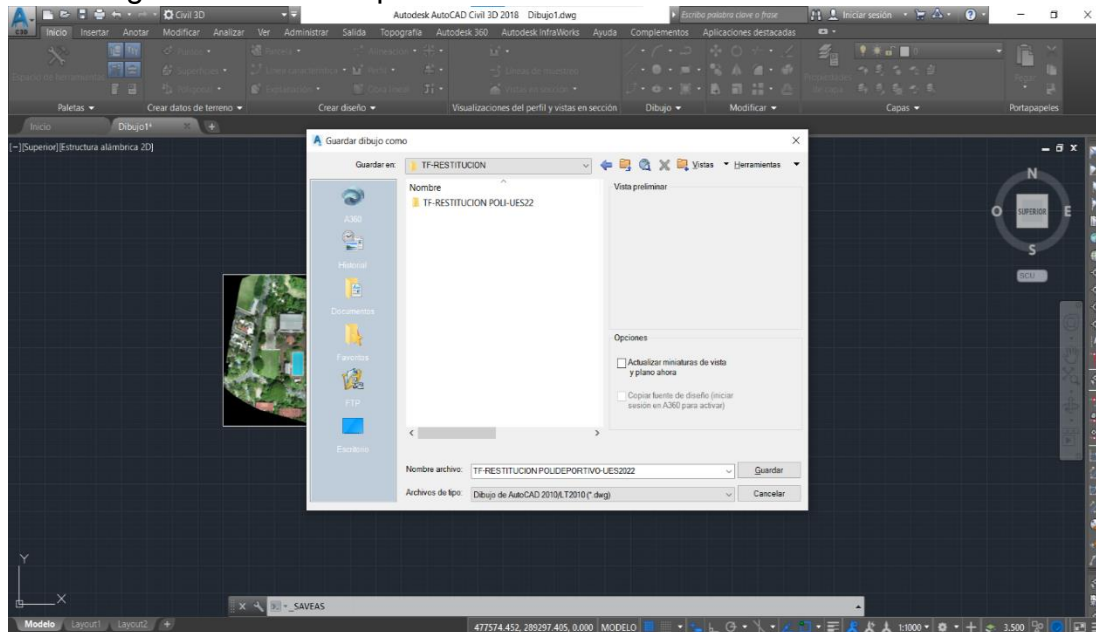


Figura 5.2.13: Guardado de archivo con insertado de ortofoto en formato “.dwg”.
Fuente: Propia.

PASO #14: Vectorización de ortofoto utilizando el software AutoCAD Civil3D.

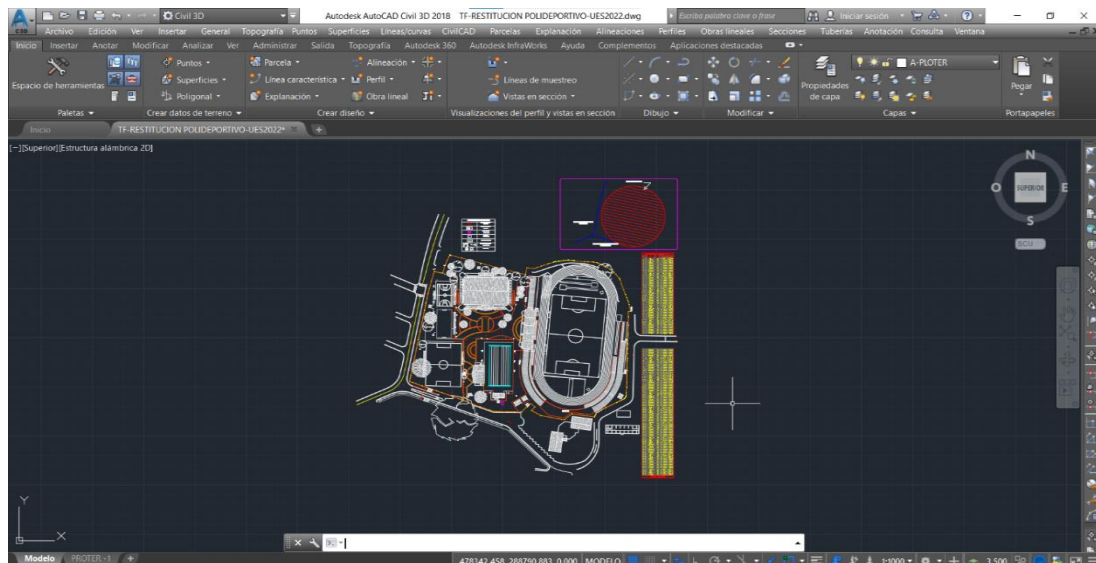


Figura 5.2.14: Resultado final de la vectorización de la ortofoto del polideportivo de la Universidad de El Salvador.
Fuente: Propia.

Para verificar la correcta georreferenciación del nuevo archivo vectorial del polideportivo de la Universidad de El Salvador se tiene que convertir el archivo “.dwg” a un archivo “.kmz” de tipo vector para posteriormente ser cargado en Google Earth y verificar si el vector coincide con la imagen satelital.

PASO #15: Convertir el archivo “.dwg” a “.kmz” vectorial, utilizando Global Mapper.

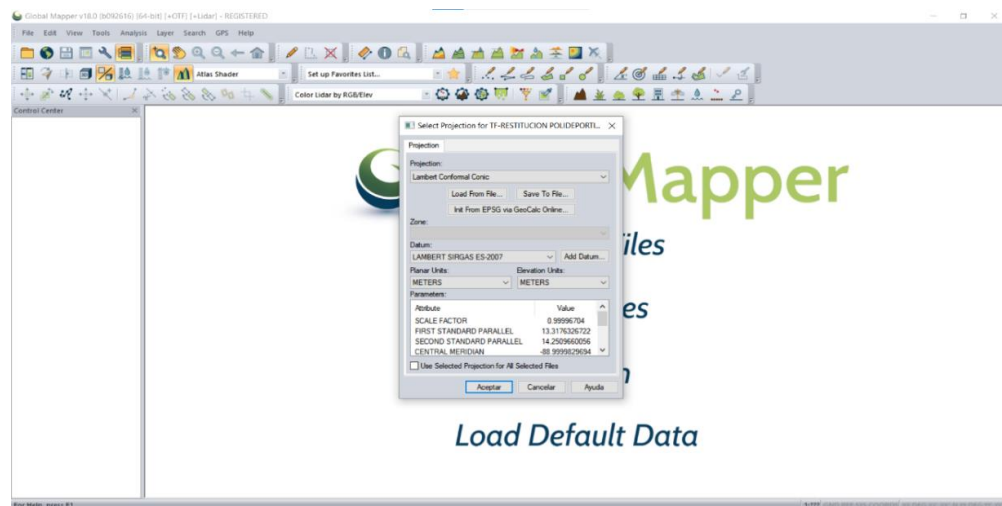


Figura 5.2.15: Selección del sistema de referencia del archivo “.dwg”.
Fuente: Propia.

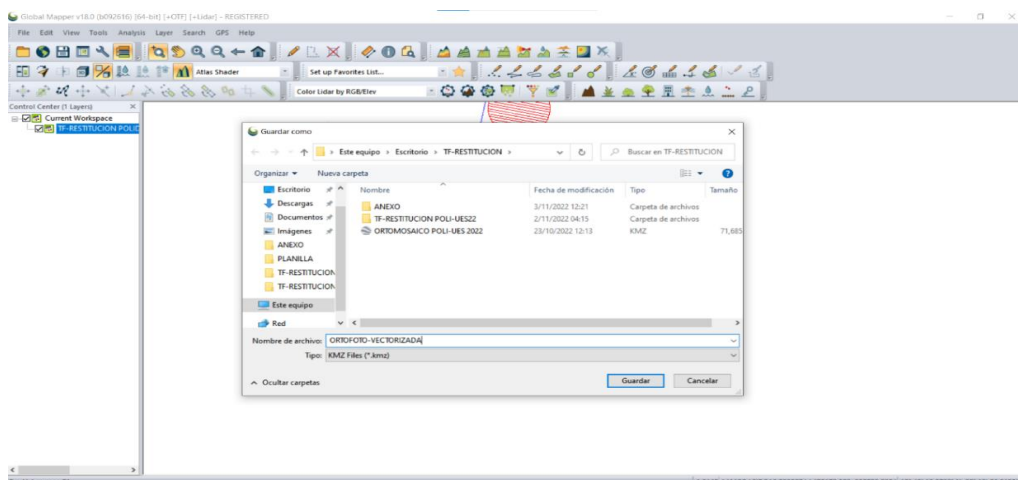


Figura 5.2.16: Conversión de archivo “.dwg” a “.kmz” con el software Global Mapper.
Fuente: Propia.

PASO #16: Abrir el archivo “.kmz” en Google Earth para su verificación.

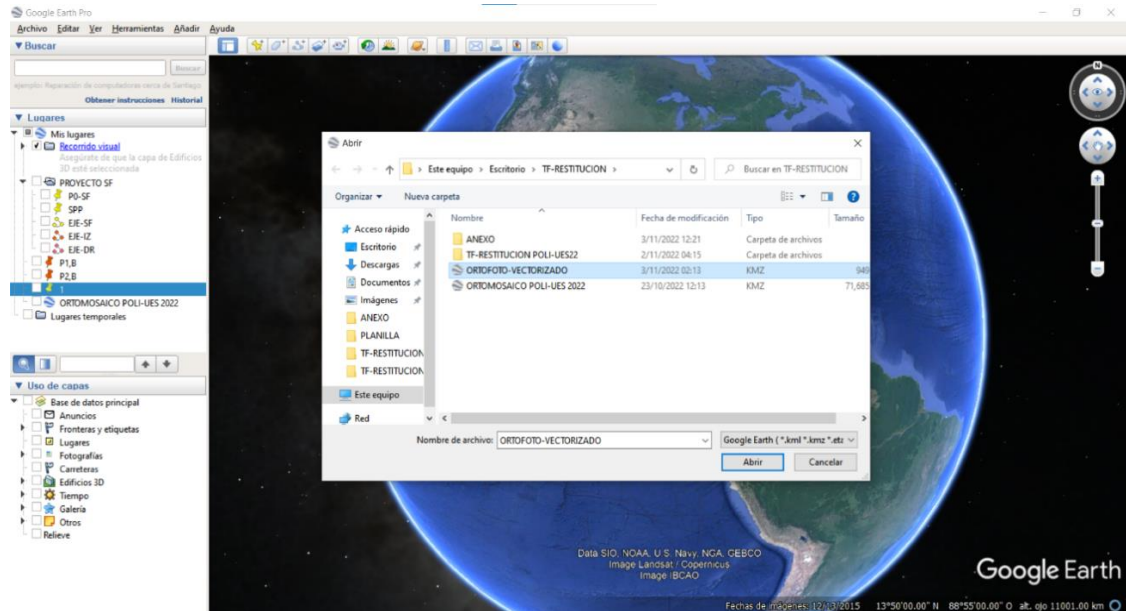


Figura 5.2.17: Abriendo archivo “.kmz” en Google Earth.
Fuente: Propia.

PASO #17: Verificación de ortofoto georreferenciada vectorizado con imágenes satelitales.

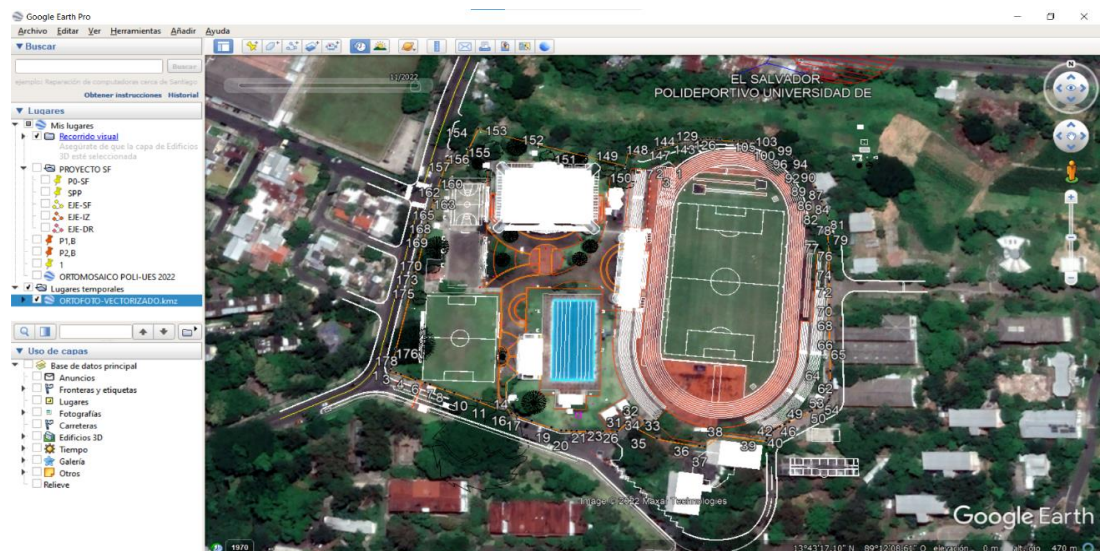


Figura 5.2.18: Polideportivo de la UES en formato vectorial verificado en Google Earth.
Fuente: Propia.

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Los resultados obtenidos del software Pix4D se muestran a continuación.

Quality Report



Generated with Pix4Denterprise version 4.5.6

Important: Click on the different icons for:

- Help to analyze the results in the Quality Report
- Additional information about the sections

Click [here](#) for additional tips to analyze the Quality Report

Summary

Project	TF-RESTITUCION POLI-UES22
Processed	2022-10-22 22:53:34
Camera Model Name(s)	FC6310_8.8_5472x3648 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	2.00 cm / 0.79 in
Area Covered	0.115 km ² / 11.5283 ha / 0.04 sq. mi. / 28.5018 acres

Quality Check

Images	median of 56909 keypoints per image	
Dataset	200 out of 200 images calibrated (100%), all images enabled	
Camera Optimization	2.88% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	
Matching	median of 18635.9 matches per calibrated image	
Georeferencing	yes, 9 GCPs (9 3D), mean RMS error = 0.016 m	

Preview

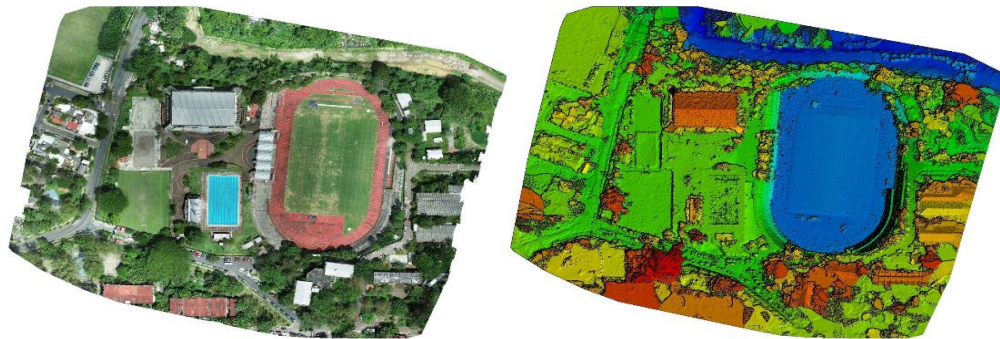


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

Calibration Details

Number of Calibrated Images	200 out of 200
Number of Geolocated Images	200 out of 200

Initial Image Positions

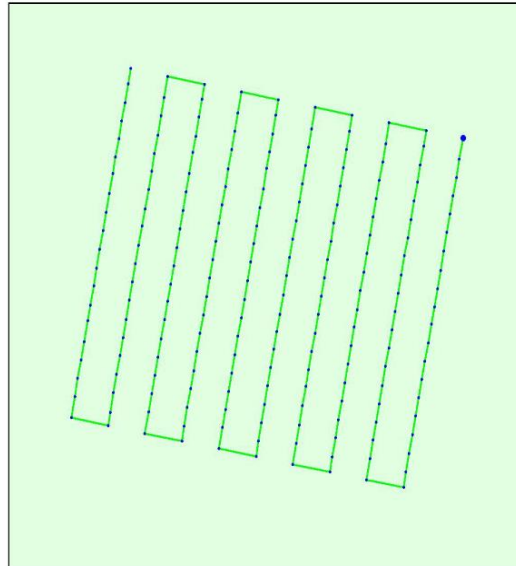
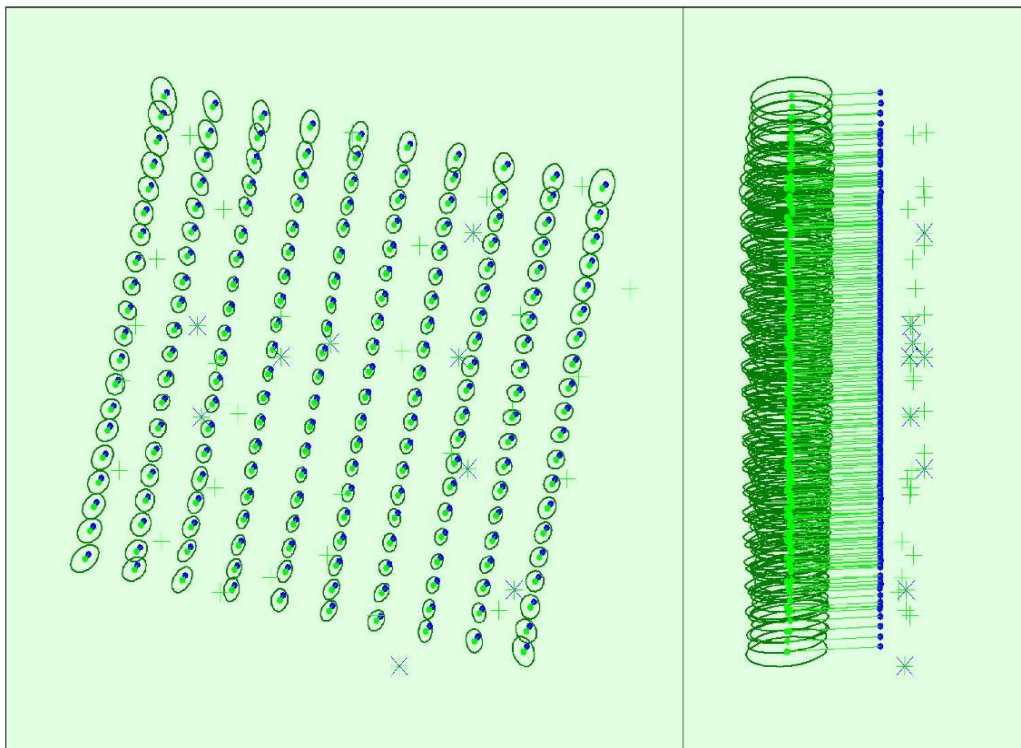
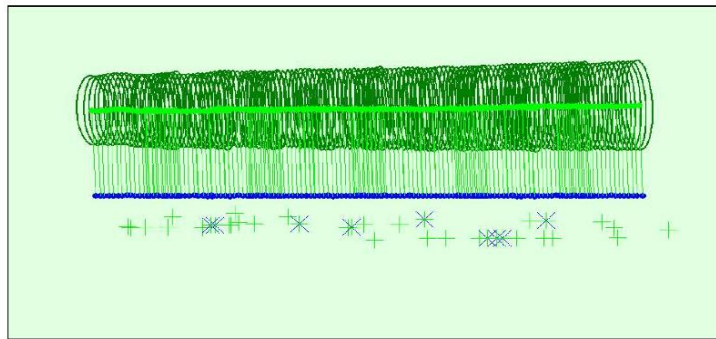


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions





Uncertainty ellipses 1000x magnified

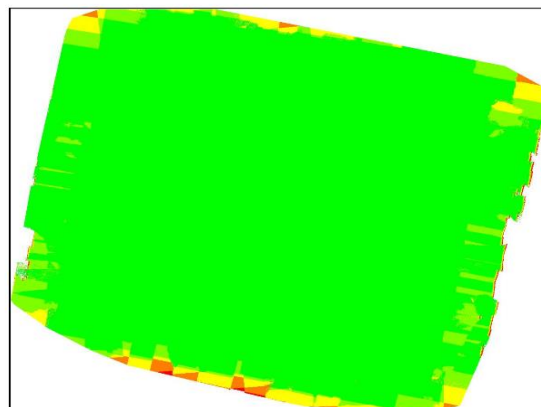
Figure 3: Offset between initial (blue dots) and computed (green dots) image positions as well as the offset between the GCPs initial positions (blue crosses) and their computed positions (green crosses) in the top-view (XY plane), front-view (XZ plane), and side-view (YZ plane). Dark green ellipses indicate the absolute position uncertainty of the bundle block adjustment result.

2 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.005	0.006	0.025	0.004	0.003	0.001
Sigma	0.001	0.001	0.002	0.001	0.001	0.000

2 Overlap



Number of overlapping images: 1 2 3 4 5+

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



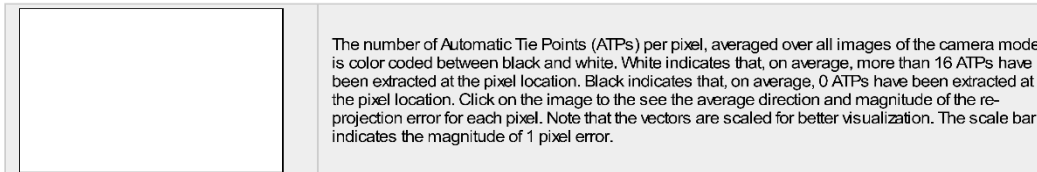
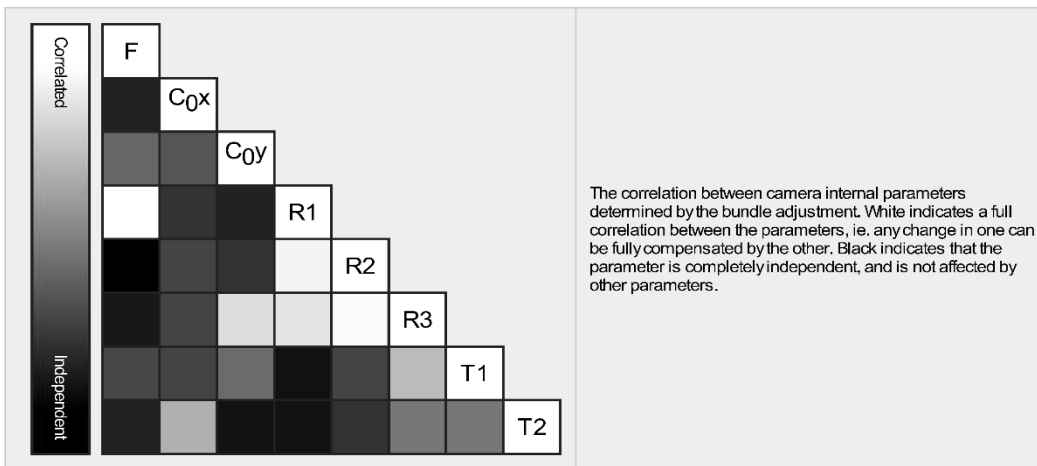
Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	4018951
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1215368
Mean Reprojection Error [pixels]	0.186

2 Internal Camera Parameters

FC6310_8.8_5472x3648 (RGB). Sensor Dimensions: 12.833 [mm] x 8.556 [mm]

EXIF ID: FC6310S_8.8_5472x3648

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	3668.759 [pixel] 8.604 [mm]	2736.001 [pixel] 6.417 [mm]	1823.999 [pixel] 4.278 [mm]	0.003	-0.008	0.008	-0.000	0.000
Optimized Values	3774.744 [pixel] 8.853 [mm]	2713.962 [pixel] 6.365 [mm]	1802.025 [pixel] 4.226 [mm]	-0.010	0.001	0.008	-0.003	-0.002
Uncertainties (Sigma)	1.242 [pixel] 0.003 [mm]	0.063 [pixel] 0.000 [mm]	0.052 [pixel] 0.000 [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	56909	18636
Min	37504	3637
Max	79878	42553
Mean	57379	20095

3D Points from 2D Keypoint Matches

	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	787380
In 3 Images	170180
In 4 Images	77830
In 5 Images	46571
In 6 Images	28876
In 7 Images	19134
In 8 Images	15212
In 9 Images	11934
In 10 Images	10065
In 11 Images	7494
In 12 Images	6450

In 13 Images	5187
In 14 Images	4454
In 15 Images	3951
In 16 Images	3183
In 17 Images	2870
In 18 Images	2720
In 19 Images	2238
In 20 Images	2083
In 21 Images	1804
In 22 Images	1728
In 23 Images	1740
In 24 Images	2239
In 25 Images	42
In 26 Images	3

2D Keypoint Matches

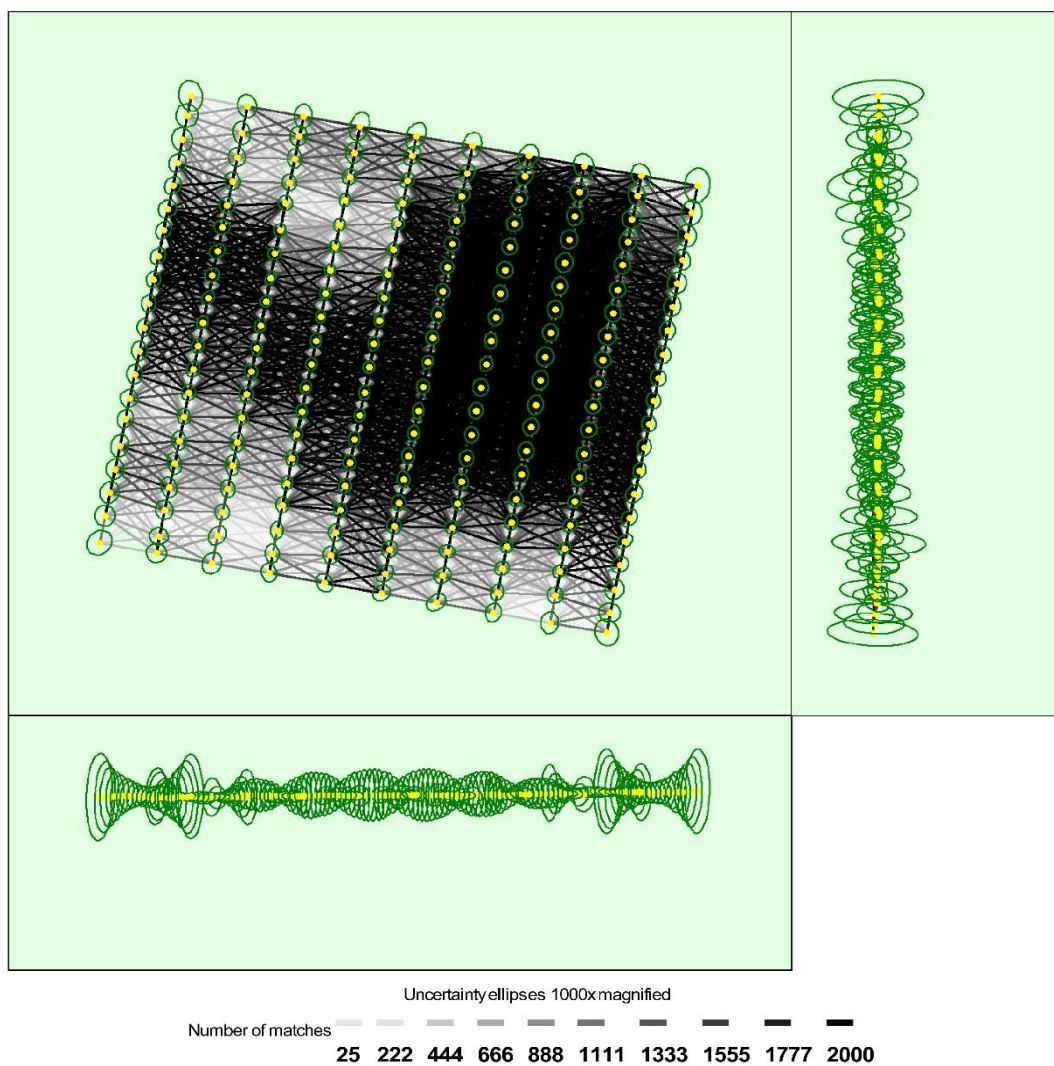


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty of the bundle block adjustment result.

Relative camera position and orientation uncertainties

	X [m]	Y [m]	Z [m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.004	0.005	0.008	0.010	0.010	0.001
Sigma	0.001	0.001	0.005	0.005	0.005	0.000

Manual Tie Points

MTP Name	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
mtp1	0.678	7 / 7
mtp2	0.851	7 / 7
mtp3	0.923	19 / 19
mtp4	1.722	12 / 12
mtp5	0.552	9 / 9
mtp6	0.949	10 / 10
mtp7	1.024	16 / 16
mtp8	1.079	16 / 16
mtp9	0.871	11 / 11
mtp10	0.739	11 / 11
mtp11	0.595	15 / 15
mtp12	0.763	12 / 12
mtp13	0.961	12 / 12
mtp14	1.137	16 / 16
mtp15	0.640	11 / 11
mtp16	0.637	9 / 9
mtp17	0.461	11 / 11
mtp18	0.933	10 / 10
mtp19	0.898	20 / 20
mtp20	0.915	15 / 15
mtp21	1.294	9 / 9
mtp22	1.298	16 / 16
mtp23	0.703	25 / 25
mtp24	0.831	24 / 24
mtp25	0.723	23 / 23
mtp26	0.860	15 / 15
mtp27	0.704	24 / 24
mtp28	0.978	19 / 19
mtp29	0.506	24 / 24

Projection errors for manual tie points. The last column counts the number of images where the manual tie point has been automatically verified vs. manually marked.

Geolocation Details

Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X [m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
PCF1 (3D)	0.020/ 0.020	-0.028	-0.038	0.014	0.602	11 / 11
PCF2 (3D)	0.020/ 0.020	0.036	-0.018	0.008	0.318	4 / 4
PCF3 (3D)	0.020/ 0.020	0.003	-0.014	0.006	0.393	15 / 15
PCF4 (3D)	0.020/ 0.020	0.014	-0.024	0.000	0.667	17 / 17
PCF5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.013	0.032	-0.011	0.643	16 / 16
PCF6 (3D)	0.020/ 0.020	0.019	0.021	0.006	0.798	17 / 17

PCF7 (3D)	0.020/ 0.020	0.005	-0.003	0.002	0.492	22 / 22
PCF8 (3D)	0.020/ 0.020	-0.022	0.002	-0.003	0.444	18 / 18
PCF9 (3D)	0.020/ 0.020	-0.001	0.031	-0.005	0.499	22 / 22
Mean [m]		0.001377	-0.001103	0.001874		
Sigma [m]		0.018993	0.023557	0.007048		
RMS Error [m]		0.019043	0.023583	0.007293		

Localisation accuracy per GCP and mean errors in the three coordinate directions. The last column counts the number of calibrated images where the GCP has been automatically verified vs. manually marked.

? Absolute Geolocation Variance



Min Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X [%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	49.00	57.50	40.00
0.00	3.00	51.00	42.50	60.00
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Mean [m]		1.880691	2.330089	-55.665106
Sigma [m]		0.178082	0.204660	0.975203
RMS Error [m]		1.889103	2.339060	55.673647

Min Error and Max Error represent geolocation error intervals between -1.5 and 1.5 times the maximum accuracy of all the images. Columns X, Y, Z show the percentage of images with geolocation errors within the predefined error intervals. The geolocation error is the difference between the initial and computed image positions. Note that the image geolocation errors do not correspond to the accuracy of the observed 3D points.

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	1.880691	2.330089	-55.665106

Bias between image initial and computed geolocation given in output coordinate system.

? Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X [%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	100.00	100.00
[-2.00, 2.00]	100.00	100.00	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
Mean of Geolocation Accuracy [m]	5.000000	5.000000	10.000000
Sigma of Geolocation Accuracy [m]	0.000000	0.000000	0.000000

Images X, Y, Z represent the percentage of images with a relative geolocation error in X, Y, Z.

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	0.717
Phi	0.306
Kappa	0.800

Geolocation RMS error of the orientation angles given by the difference between the initial and computed image orientation angles.

Initial Processing Details i

System Information i

Hardware	CPU: Intel(R) Core(TM) i7-9750H CPU @2.60GHz RAM: 16GB GPU: Intel(R) UHD Graphics 630 (Driver: 25.20.100.6617), NVIDIA GeForce GTX 1650 (Driver: 31.0.15.1748)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

Coordinate Systems i

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM 96 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	Lambert_Conformal_Conic (EGM2008 Geoid)
Output Coordinate System	Lambert_Conformal_Conic (EGM2008 Geoid)

Processing Options i

Detected Template	No Template Available
Keypoints Image Scale	Full, Image Scale: 1
Advanced: Matching Image Pairs	Aerial Grid or Corridor
Advanced: Matching Strategy	Use Geometrically Verified Matching: no
Advanced: Keypoint Extraction	Targeted Number of Keypoints: Automatic
Advanced: Calibration	Calibration Method: Standard Internal Parameters Optimization: All External Parameters Optimization: All Rematch: Auto, yes

Point Cloud Densification details i

Processing Options i

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: Medium Resolution (default) Color Balancing: yes
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	21m:51s
Time for Point Cloud Classification	03m:40s
Time for 3D Textured Mesh Generation	14m:56s

Results i

Number of Generated Tiles	1
Number of 3D Densified Points	24453262
Average Density (per m ³)	360.52

DSM, Orthomosaic and Index Details i

Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (2 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: no
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (2 [cm/pixel])
Contour Lines Generation	Generated: yes Contour Base [m]: 0 Elevation Interval [m]: 1 Resolution [cm]: 100 Minimum Line Size [vertices]: 20
Time for DSM Generation	13m:51s
Time for Orthomosaic Generation	25m:56s
Time for DTM Generation	07m:08s
Time for Contour Lines Generation	03s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

CONCLUSIONES.

- Cuantos más puntos de control fotogramétricos coloquemos sobre el área a estudiar, mayor será la precisión en cuanto a la geolocalización del proyecto.
- La fotogrametría ha tenido una gran evolución en el tiempo, sin embargo, las nuevas tecnologías siempre toman como base la fotogrametría antigua o primitiva.
- El uso de drones para topografía ha traído mucha facilidad para realizar levantamientos topográficos en zonas de difícil acceso con equipos tradicionales para topografía.
- La altura del vuelo fotogramétrico es un factor decisivo para la calidad de detalle que queramos obtener de la imagen, ya que a mayor altura tenemos menor detalle, pero más cobertura del área y a menor altura obtenemos más detalle, pero menor área de cobertura.
- Si bien es cierto, las fotografías tomadas en el plan de vuelo con el Dron ya cuentan con coordenadas siempre es necesario hacer la georreferenciación con el sistema local del país, esto para obtener valores más precisos.

RECOMENDACIONES.

- Luego de la delimitación del área a restituir, la ubicación de los Puntos de Control fotogramétrico se debe ubicar de manera que cubramos toda el área a restituir para que nos permita una perfecta georreferenciación.
- En caso de que en la zona a trabajar no se cuente con un punto base para tomar las coordenadas de los PCF, se debe trazar una red geodésica de puntos cercanos y ajustarla con los programas de procesamiento hasta nuestra zona de trabajo.
- Para la planificación del vuelo fotogramétrico, se debe hacer un estudio previo de las condiciones climática de la zona ya que si se cuenta con mucha nubosidad no tendremos imágenes claras de los objetos en la superficie.

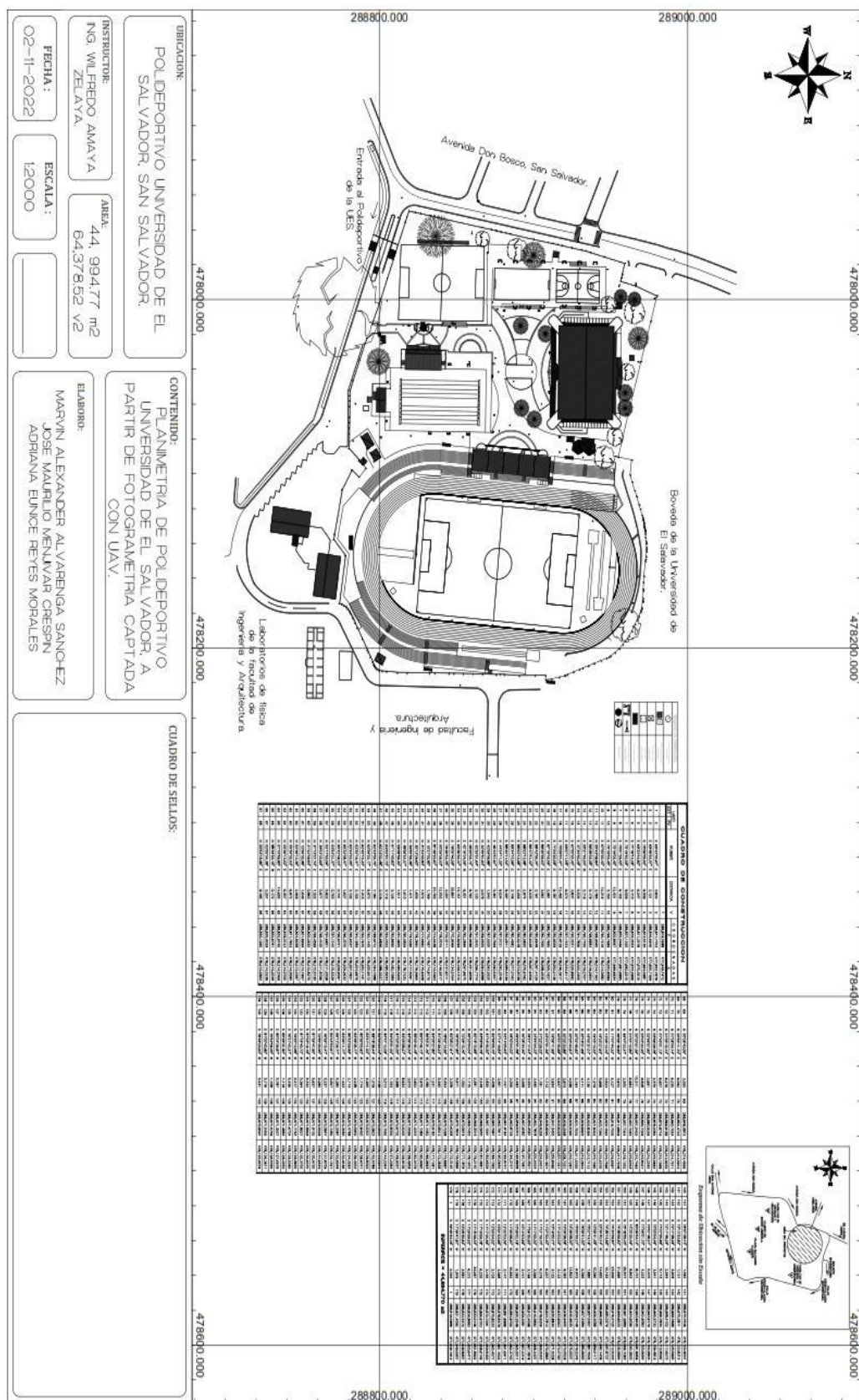
BIBLIOGRAFÍA.

- <https://es-academic.com/dic.nsf/eswiki/1095005>
- Módulo 4, curso de especialización en tecnología GPS y sensores remotos. (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- <https://djiarsmadrid.com/es/blog/dji-news/geoide-vs-elipsoide-cual-es-la-diferencia-y-por-que-es-importante>
- <https://alfageomatics.com/2019/10/que-es-el-geoide-y-el-elipsoide/>
- https://www.inegi.org.mx/temas/rgnp_vertical/
- <https://www.ngs.noaa.gov/datums/vertical/>
- Geodesia En El Salvador (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- Modelos Gravitaciones de La Tierra (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- Restitución Fotogramétrica de La Facultad De Ingeniería Y Arquitectura (2021).
- <https://concepto.de/proyeccion-cartografica/>
- Módulo 6, curso de especialización en tecnología GPS y sensores remotos. (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- Módulo 5, curso de especialización en tecnología GPS y sensores remotos. (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- Sistema Y Marco De Referencia Terrestre.
- Actualización De Las Redes Geodésicas De El Salvador/ CNR.
- Sistemas De Navegación Satelital Por GPS (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- <https://docs.emlid.com/reach/es/tutorials/basics/rtk-introduction/>
- Técnicas de Medición Satelital (Ing. Wilfredo Amaya Zelaya).
- <https://www.sutori.com/es/historia/historia-de-la-topografia--DvgQfGxWyFQmVHsH5J9ocR5k>
- Aplicación de Fotogrametría Aérea en Levantamientos Topográficos Mediante El Uso de Vehículos Aéreos no Tripulados.
- Topografía Digital con Estación Total y Colector TDS Survey Pro.
- <https://www.ceupe.com/blog/la-fotogrametria.html>

- <https://igc.com.pe/escaner-laser-que-es-tecnologia-lidar/>
- <https://acgdrone.com/fotogrametria-aerea-con-drones/>
- <https://www.inegi.org.mx/contenidos/temas/mapas/relieve/continental/metadatos/mde.pdf>
- <http://www.sigla-sas.com/restitucion-fotogrametrica-y-cartografia.html>
- <https://www.pix4d.com/product/pix4dcapture>
- DANIEL DEAGOSTINI ROUTIN., INTRODUCCIÓN A LA FOTOGAMETRÍA, BOGOTÁ COLOMBIA 1984.

ANEXOS.





UBICACION:
POL. DEPORTIVO UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, SAN SALVADOR.

INSTRUCTOR:
ING. WILFREDO AMAÑA ZELAYA

AREA:
44,994.77 m²
64,378.52 v2

FECHA:
02-11-2022

ESCALA:
1:2000

CONTENIDO:
PLANIMETRIA DE POLIDEPORTIVO UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, A PARTIR DE FOTOGRAFIA CAPTADA CON UAV.

ELABORO:
MARVIN ALEXANDER ALVARENGA SANCHEZ
JOSE MAURILIO MENVAR CRESPI
ADRIANA EUNICE REYES MORALES

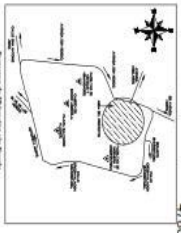
CUADRO DE SELLOS:

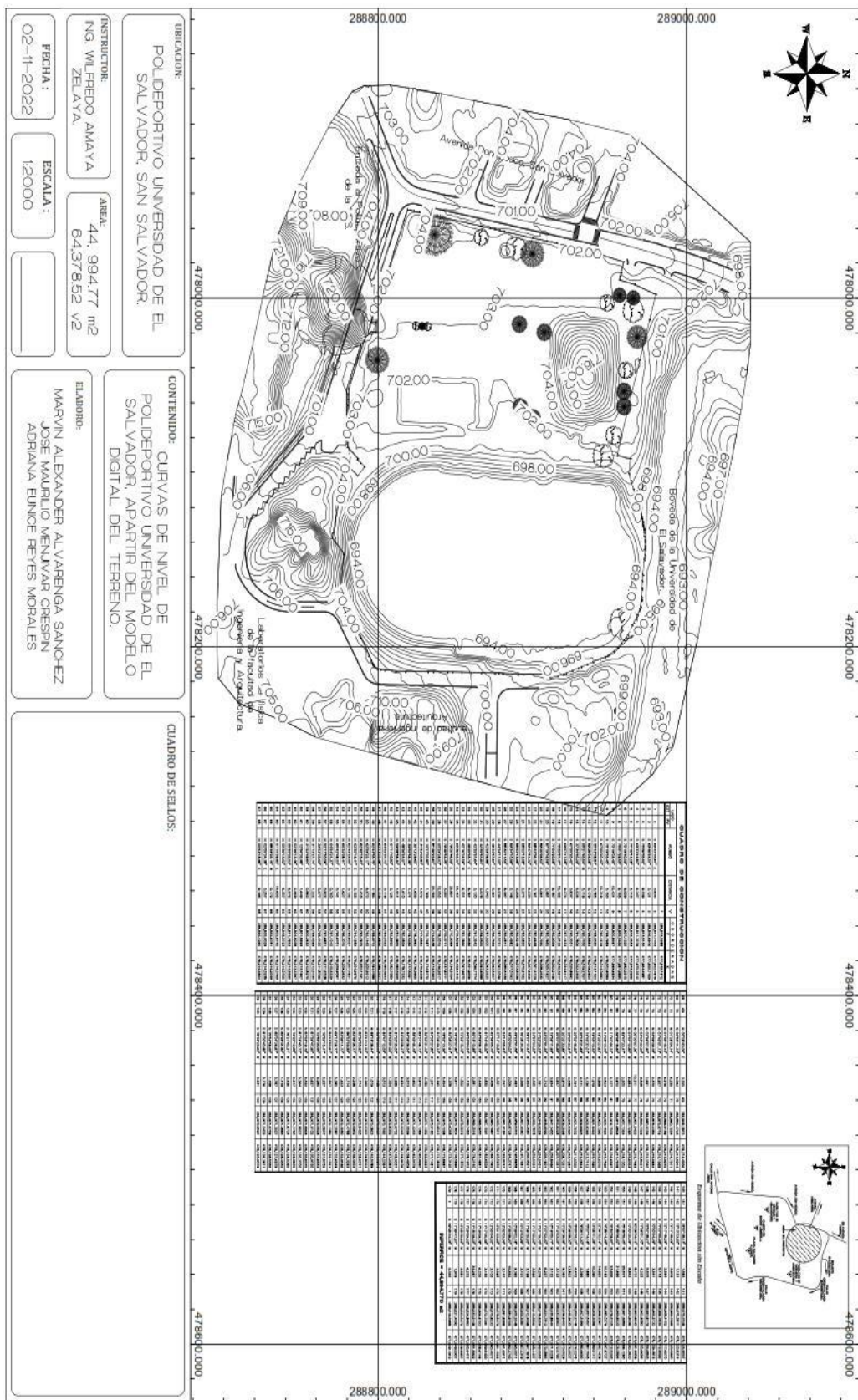
CUADRO DE CANTIDADES

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

EXAMEN DE CALIDAD

ITEM	DESCRIPCION	CANTIDAD	UNIDAD
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100





UBICACION:
POL. DEPORTIVO UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, SAN SALVADOR.

INSTRUCTOR:
ING. WILFREDO AMAÑA ZELAYA.

FECHA:
02-11-2022

CONTENIDO:
CURVAS DE NIVEL DE POLIDEPORTIVO UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR, APARTIR DEL MODELO DIGITAL DEL TERRENO.

AREA:
44, 994,77 m²
64,37852 v2

ESCALA:
1:2000

CUADRO DE SELLOS:

ELABORO:
MARVIN ALEXANDER ALVARENGA SANCHEZ
JOSE WAJLILIO MENVAR CRESPI
ADRIANA EUNICE REYES MORALES

NO.	DESCRIPCION	VALOR	UNIDAD
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100

