

UNIVERSIDAD DE SONORA

División de Ingeniería

Departamento de Ingeniería Civil y Minas

Maestría en Ingeniería Urbana



**"El saber de mis hijos
hará mi grandeza"**

Trabajo Escrito

**"INTEGRACIÓN DE LA FOTOGRAMETRÍA AÉREA CON DRONES
PARA LA ELABORACION DE UN MODELO DIGITAL DEL
CAMPUS HERMOSILLO CENTRO DE LA UNIVERSIDAD DE
SONORA"**

Que para obtener el Grado de Maestría en Ingeniería Urbana

Línea Terminal Construcción

Presenta

David Arturo Ibarra Duarte

Director de Tesis

Dr. Marco Antonio Ramos Corella

Hermosillo, Sonora

Agosto de 2021

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

I. RESUMEN

El avance de la tecnología ha permitido innovar en el desarrollo de las actividades económicas a lo largo de la historia para facilitar, mejorar y agilizar los procesos que las componen. Siendo la construcción uno de los sectores en los que más se invierte y que, según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), aporta el 13% del PIB a nivel mundial, también es una de las actividades que menores tasas de productividad muestra en los últimos 25 años según un estudio elaborado por el McKinsey Global Institute acerca de los sectores económicos con mayor crecimiento en su productividad en las últimas décadas.

En diferentes etapas de la construcción, los drones y la fotogrametría aérea se han implementado como herramienta de trabajo para alcanzar mayores niveles de productividad en los procesos de recopilación de información de campo de una manera más rápida, precisa y económica, en algunos casos. El uso de procesos fotogramétricos con la ayuda de software especializados ha ganado popularidad entre las grandes empresas que han optado por invertir en el uso de estos métodos novedosos.

La finalidad de este proyecto de investigación es proporcionar una perspectiva general de los alcances que tiene la fotogrametría aérea para realizar diferentes tareas en la construcción en general, pero principalmente se pretende ejemplificarlo por medio de un modelo digital de la unidad Centro, de la Universidad de Sonora. De una manera gráfica se buscó mostrar utilidades prácticas que fueran aplicables dentro de las tareas administrativas de la institución para fines de logística, planeación, mantenimiento y registros de avance de obra en general dentro del campus.

Como resultado se logró obtener diferentes visualizaciones del estado real de la infraestructura con fecha actualizada al 2019, 2020 y 2021 y realizar comparativas, mediciones y análisis de parámetros de precisión entre el modelo digital y el medio físico.

Palabras clave: Construcción, drones, fotogrametría aérea, productividad, análisis del sitio, modelo digital, construcción 4.0.

II. ABSTRACT

Throughout history, technology and innovations have allowed us to improve, facilitate and accelerate the development of different economic activities and the processes involved in those activities. Construction is one of the main economic activities worldwide and with increasing development that contributes around 13% of the GDP worldwide according to the OECD (Organization for Economic Co-operation and Development). In the last 25 years Construction has been one of the economic activities with fewer productivity rates (McKinsey Global Institute,2017).

During the different phases of the construction for the major engineering projects, drones and aerial photogrammetry have been implemented as a working tool to achieve higher levels of productivity in the field. Photogrammetry provides cheaper, faster, and accurate information if implemented accordingly.

The use of photogrammetric specialized software has become more popular in recent years and it is more common nowadays for construction companies to invest in the use of this technology. Lower prices in Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) had led small companies and engineers service providers to include this technique for different fields such as topography, hydrology, construction among others.

The main purpose of this project is to provide a general panorama of the range that aerial photogrammetry has to perform different tasks in construction. The case study is in Hermosillo, Sonora Mexico where a digital elevation model (DEM) of the University of Sonora was made using a commercial Drone XXX, as an alternative to producing low-cost DEMs.

This project presents a graphically and analytically comparative of low-cost UAVs for the implementation of administrative tasks, including logistics, planning, maintenance of the University of Sonora infrastructure, and to serve as a tool for progress records and development in infrastructure and maintenance within the campus.

As a result, with the use of low-cost drones, it is possible to obtain orthophotos of the current conditions of the infrastructure and get approximated surface measurements of the facilities, structures, and amenities. Furthermore, a DEM can be used in hydrologic-hydraulic models to analyze extreme precipitation events, estimate cut, and filling volumes for future projects, obtain topographic levels and measurements of the facilities, among others.

Key Words: Construction, RPAS, drones, aerial photogrammetry, Construction process, worksite analysis, construction 4.0.

III. DEDICATORIAS

En agradecimiento a mi esposa y familia quienes siempre me han apoyado en cumplir mis metas y acompañarme en este proceso, a iDrone México por su confianza en el uso y manejo de sus licencias para acceder a la plataforma de procesamiento y visualización utilizada en este proyecto de investigación. Agradezco también a mi tutor y director de tesis el Dr. Marco Antonio Ramos Corella por su constante apoyo, así como a los miembros de mi comité de proyecto de investigación el Dr. Gerardo Ramírez Uribe, la Dra. Gema Karina Ibarra Torua y el apoyo del Mtr. Ramon Saiz.

IV. ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1.	Antecedentes.....	1
1.2.	Planteamiento del problema.....	4
1.3.	Justificación	6
1.4.	Objetivo general.....	8
1.5.	Objetivos específicos	8
1.6.	Hipótesis	8
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1.	Fotogrametría.....	9
2.1.1.	Definición de fotogrametría.....	9
2.1.2.	Clasificación de la fotogrametría.....	9
2.1.3.	Origen y evolución de la fotogrametría	10
2.1.4.	Fundamentos de la fotogrametría aérea	12
2.2.	Definición de RPAS.....	13
2.2.1.	Origen de RPAS.....	13
2.2.2.	Clasificación de los RPAS	16
2.2.3.	Tipos de RPAS.....	17
2.3.	Regulaciones de vuelo	19
2.3.1.	Regulación local (México).....	19
2.4.	Características de un dron utilizado para fotogrametría	21
2.5.	Métodos de procesamiento de información	23
2.6.	Aplicaciones de los drones en la construcción	24
2.6.1.	Fotografía y video.....	26
2.6.2.	Topografía.....	28

2.6.3.	Orto fotografía	30
2.6.4.	Modelo digital.....	32
2.7.	Casos de estudio.....	35
2.7.1.	Caso 01. – Levantamiento Arqueológico de Todos Santos, Ecuador... 35	
2.7.2.	Caso 02. – Análisis estructural Puente de la Torre, Italia.....	37
2.7.3.	Caso 03. – Reconstrucción del entorno urbano en Colonia, Alemania	38
2.7.4.	Caso 04. – Construccion edificio Parkview Pitic, Hermosillo Sonora .	39
3.	DESARROLLO METODOLÓGICO.....	42
3.1.	Marco teórico.....	42
3.2.	Selección del caso de estudio.....	43
3.3.	Recolección de información de campo	44
3.4.	Procesamiento de datos.....	45
3.5.	Visualización y análisis de datos	47
3.6.	Verificación y comprobación manual de datos.....	47
3.7.	Interpretación y conclusiones	47
4.	IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGÍA	48
4.1.	Recursos de la investigación.....	48
4.2.	Comparativa de propuestas de estudio.....	50
4.3.	Planeación y ejecución de vuelo	52
4.3.1.	Reconocimiento de la zona	52
4.3.2.	Revisión de la superficie de estudio	53
4.3.3.	Reconocimiento físico del sitio.....	53
4.3.4.	Sectorización del polígono.....	55
4.3.5.	Planes de vuelo	56
4.3.6.	Selección de puntos de despegue.....	59
4.3.7.	Equipo y configuración de vuelo	60

4.3.8. Vuelo.....	60
4.4. Procesamiento de datos.....	61
4.5. Análisis de datos procesados	65
4.6. Comprobación de datos en sitio.....	73
4.6.1. Validación de modelo digital de superficie (MDS)	73
4.6.2. Mediciones horizontales	74
4.6.3. Medición de alturas.....	78
4.6.4. Factor de precisión.....	80
4.7. Interpretación y casos prácticos	82
4.7.1. Evaluación del deterioro y condiciones de las áreas verdes, 2019 – 2021 82	
4.7.2. Medición de superficie de captación solar con paneles solares en estacionamiento del Gimnasio Universitario.	83
4.7.3. Capacidad de llenado de alberca olímpica.....	84
4.7.4. Conteo de equipos de aire acondicionado central en el edificio de rectoría 85	
4.7.5. Conteo de cajones de estacionamiento del Centro de las Artes.....	85
4.7.6. Medición de superficie de losa de azotea del edificio de Derecho (10-I) para presupuestos de mantenimiento.....	87
4.7.7. Reemplazo de pasto sintético en cancha de futbol del Estadio Miguel Castro Servín. 88	
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	89
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	90
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	92
8. ANEXOS	95
ACRÓNIMOS.....	95

CAPTURAS DE PLANES DE VUELO REALIZADOS	96
MAPAS UNIVERSITARIOS.....	99

V. ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Origen y uso actual de los drones. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google.	3
Figura 1.2 Gráficas comparativas de la productividad laboral global en los diferentes sectores. Fuente: McKinsey Global Institute 2017	5
Figura 2.1 "Aparatos de toma". De izquierda a derecha: Fotogoniómetro 1853 y fototeodolito 1859. Fuente: Cheli,2011.	11
Figura 2.2 Problema fundamental de la fotogrametría. Fuente: Sánchez Sobrino 2001.	12
Figura 2.3 Evolución de los RPAS. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, Northrop BQM-74 Chukar, Ryan Firebee, Compass Cope, IAI Pioneer, MQ-9 Reaper y MQ-1C Gray Eagle. Fuente: Elaboracion propia con imágenes de Google.com	14
Figura 2.4 Monterrey N.L, Mapa de Geo zonas de restricción y vuelo seguro DJI. Fuente: https://www.dji.com/mx/flysafe/geo-map	15
Figura 2.5 Phoenix Az, Mapa de Geo zonas de restricción y vuelo seguro DJI. Fuente: https://www.dji.com/mx/flysafe/geo-map	16
Figura 2.6 Tipos de RPAS. De izquierda a derecha: Modelo Ebee X, DJI Phantom 4 pro, Wingtra One. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google imágenes.....	18
Figura 2.7 Gráfica de las mejoras de implementación de prácticas para potencializar la productividad en la construcción. Fuente: Modificada y traducida de Mc Kinsey Global, 2017.....	25
Figura 2.8. Fotografías panorámicas en vialidades principales de la ciudad de Hermosillo, Son. De arriba hacia abajo: Blvd. Eusebio Kino, altura de vuelo 25 m, Blvd. Luis Encinas intersección con Blvd. Solidaridad, altura de vuelo 80 m. Fuente: Elaboración propia.....	27
Figura 2.9. Curvas de nivel proyectadas sobre un terreno irregular en la ciudad de Hermosillo, Son. con procesador px4 autopilot de la plataforma 3DR Sitiescan. Fuente: Elaboración propia.....	29
Figura 2.10. Plano en Auto Cad de curvas de nivel extraído de un Modelo Digital de Terreno. Fuente: Elaboración Propia.....	30
Figura 2.11. Orto fotografía de terreno para predio en parque industrial de la ciudad de Hermosillo, Son. Fuente: iDrone.mx	30
Figura 2.12 Diagrama de corte y relleno extraído de orto fotografía de un predio, representado por cuadrícula y volumen de extracción de material según nivel base predeterminado. Fuente: iDrone.mx	31
Figura 2.13 Diagrama de elevación extraído de orto fotografía de un predio, representado por diferenciación de color. Fuente: iDrone.mx	31

Figura 2.14. Modelo digital de nube de puntos de acceso de fraccionamiento residencial La Jolla. Fuente: iDrone.mx.....	32
Figura 2.15. Diagrama de elevación en modelo digital. Fuente: iDrone.mx.....	33
Figura 2.16. Diferencia visual entre un Modelo Digital de Terreno (DTM) y un Modelo Digital de Superficie (DSM). Fuente: www.gisresources.com.....	34
Figura 2.17. Captura de pantalla de visualización de modelo 3D en capas y sección de nube de puntos. Fuente: (Aparicio Resco et al., 2018)	35
Figura 2.18. Orto fotografía del levantamiento fotogramétrico de la zona. Fuente: Aparicio Resco et al., 2018.....	36
Figura 2.19. Modelo digital de nube de puntos, vista norte y sur del puente. Fuente: Mongelli et al., 2017.	37
Figura 2.20. Planimetría basada en levantamiento fotogramétrico del lado Norte. Fuente Mongelli et al., 2017:.....	37
Figura 2.21. Vista frontal de nube de puntos del objeto de estudio y los edificios vecinos. Fuente: Dieter Fritsh et al., 2017	38
Figura 2.22. Determinación manual de la posición de la cámara para superposición del modelo. Fuente: Dieter Fritsh et al., 2018.	38
Figura 2.23. De izquierda a derecha, imagen histórica del objeto de estudio, modelo digital paramétrico y modelo 3D texturizado finalizado. Fuente: Dieter Fritsh et al., 2018.	39
Figura 2.24. Ruta de vuelo perimetral sobre proyecto de edificación vertical en Parkview Pitic, Hermosillo, Son. Fuente: Aplicación de 3DR Sitescan 2019.	40
Figura 2.25. Avance del proceso de construcción del proyecto Parkview Pitic con vuelos periódicos cada 30 días. Fuente: iDrone 2020	41
Figura 3.1. Proceso metodológico de investigación.	42
Figura 3.2. Mapa de geo zonas de vuelo seguro. Fuente: www.dji.com/flysafe/geo-map	44
Figura 4.1.- De izquierda a derecha: Logo de empresa iDrone México y logo de software de procesamiento 3DR Sitescan. Fuente paginas oficiales: www.idrone.mx y www.3dr.com, respectivamente	49
Figura 4.2 Polígono del campus Hermosillo Centro. Fuente: Elaboración propia con Google Earth	51
Figura 4.3 Medición del polígono de la escuela de agricultura y ganadería de la Universidad de Sonora. Fuente: Elaboración propia con Google Earth.	51
Figura 4.4. Zona de vuelo seguro. Fuente: DJI Geozones	52
Figura 4.5. Superficie de muestreo según altura de vuelo. Fuente: Pix4D	53
Figura 4.6. Infraestructura de telecomunicación dentro del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021. ...	54

Figura 4.7. Infraestructura de telecomunicación en el límite norte del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	54
Figura 4.8. Infraestructura de telecomunicación en el límite poniente del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021.....	54
Figura 4.9. Sectorización del polígono de estudio. Fuente: Elaboración propia, 2019	55
Figura 4.10. Diagramas de planes de vuelo, de izquierda a derecha: Mapeo de área y mapeo entrelazado. Fuente: Sitiescan App	56
Figura 4.11. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 01. Fuente: Elaboración propia.	57
Figura 4.12. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 01. Fuente: Elaboración propia.....	58
Figura 4.13. Plano de señalización de puntos de despegue. Fuente: Elaboración propia, 2020.....	59
Figura 4.14. Fotografías del momento de despegue. De izquierda a derecha: Campo de Softbol, estacionamiento multinivel y estacionamiento División de Bellas Artes.	60
Figura 4.15. Diagrama de procesamientos realizados para obtener el modelo digital del polígono completo. Fuente: Elaboración propia.	61
Figura 4.16 Ortofotografía y Modelo Digital de Superficie (MDS) previo a la densificación de imágenes. Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitiescan.....	62
Figura 4.17 Mapa de coincidencia de puntos clave detectados en las imágenes. Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitiescan.	63
Figura 4.18 Ubicación de fotos dentro del polígono. Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitiescan	63
Figura 4.19. Comparación visual de Ortofotografías. Parte superior elaboración propia con dron. Inferior obtenida con satélite. Fuente: Google Earth Pro.	66
Figura 4.20. Comparación de imágenes aéreas. Columna izquierda imagen Google Earth, columna izquierda imagen dron. Fuente: Elaboración propia	67
Figura 4.21. Visualización del Conjunto, lado Nor-poniente a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.....	68
Figura 4.22. Visualización del Conjunto, lado Sur- este a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia	68
Figura 4.23. Visualización del estacionamiento de la división de artes a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.....	69
Figura 4.24. Visualización del edificio de rectoría a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	69

Figura 4.25. Medición de área y perímetro de estacionamiento multinivel de la Universidad de sonora en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 4.26. Medición de perímetro de estacionamiento multinivel de la Universidad de sonora en orto fotografía. Fuente: Elaboración propia.....	70
Figura 4.27. Comparativa de las condiciones físicas del ala poniente del estadio Miguel Castro Servín. Arriba con fecha del 20 de agosto de 2019 y abajo con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.....	71
Figura 4.28. Comparativa de las modificaciones al edificio 12A y 12C de ingeniería civil y minas. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 4.29. Comparativa de las condiciones físicas de la alberca de la UNISON. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.	72
Figura 4.30. Comparativa de las condiciones físicas del estadio de beisbol y su deterioro en el tiempo. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.	73
Figura 4.31. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento multinivel 8E. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia	74
Figura 4.32. Comparativa de mediciones lineales en cancha de basquetbol. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medici[On en campo. Fuente: Elaboración propia..	75
Figura 4.33. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento de bellas artes. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.	75
Figura 4.34. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento Multinivel 8E. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.	76
Figura 4.35. Comparativa de mediciones lineales en campo deportivo. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.	77
Figura 4.36. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento de artes. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.....	77
Figura 4.37. Medición en nube de puntos y comprobación en sitio. Fuente: Elaboración propia.	78

Figura 4.38. Medición digital y comprobación en sitio de distancias verticales en estacionamiento multinivel. Fuente: Elaboración propia.	79
Figura 4.39. Medición de altura en edificio 3-N de Música en modelo digital y comprobación en sitio. Fuente: Elaboración propia.	80
Figura 4.40. Imágenes comparativas de las condiciones del campo de beisbol en relación al año 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 4.41. Imágenes comparativas de las condiciones del área de alberca en relación al año 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia.	82
Figura 4.42. Orto fotografía y nube de puntos para identificación y medición de módulos. Fuente: Elaboración propia.	83
Figura 4.43. Visualización y medición de alberca olímpica en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 4.44. Visualización de volumetría de alberca olímpica para análisis de capacidad volumétrica. Fuente: Elaboración propia.	84
Figura 4.45. Orto fotografía de azotea del edificio de Rectoría y conteo de equipos de aire acondicionado. Fuente: Elaboración propia.	85
Figura 4.46. Orto fotografía del estacionamiento del Centro de las Artes con marcadores para conteo de unidades. Fuente: Elaboración propia.	86
Figura 4.47. Medición de losas de azotea del edificio de Derecho en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	87
Figura 4.48. Estado actual del campo de futbol Miguel Castro Servín. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura 4.49. Medición de campo de futbol de estadio miguel Castro Servín en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.	88
Figura 6.1 Códigos QR de acceso para visualizador de Ortofotografía y modelo 3D.	91
Figura 8.1. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 02. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 8.2. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 02. Fuente: Elaboración propia.	96
Figura 8.3. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 03. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 8.4. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 03. Fuente: Elaboración propia.	97
Figura 8.5. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 04. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 8.6. Figura 42. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 04. Fuente: Elaboración propia.	98
Figura 0.1 Mapa universitario Unison. Fuente: Página oficial de la Dirección de Infraestructura de la Unison.	99

VI. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Clasificación de RPAS según su peso y uso específico. Fuente: Modificado de tabla de clasificación de RPAS (SCT, 2017).....	20
Tabla 2.2 Características óptimas de la estructura del RPA. Fuente: Pari Rendón 2019.	21
Tabla 2.3 Condiciones de operación óptimas de un RPA. Fuente: Pari Rendón 2019	22
Tabla 2.4 Características óptimas de la cámara de un RPA. Fuente: Pari Rendón 2019	22
Tabla 4.1. Características del Phantom 4 Advanced. Fuente: www.dji.com	48
Tabla 4.2. Comparativa de características de opciones de estudio. Fuente: Elaboración propia.....	50
Tabla 4.3 Proyección de tiempos y baterías de cada vuelo. Fuente: Elaboración propia.....	58
Tabla 4.4 Resumen de procesamiento de vuelo. Fuente: Traducido de reporte de vuelo 3DR Sitscan.....	64
Tabla 4.5. Relación y factor de precisión de mediciones realizadas en el modelo digital y en sitio. Fuente: Elaboración propia.....	81

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

Se cree que la evolución del ser humano se centra en el proceso del mejoramiento continuo hacia las actividades cotidianas que éste realiza para lograr su plenitud espacial, su confortabilidad, productividad y seguridad dentro del entorno en el que se desarrolla.

Sobrevivir, es el primer deseo de una persona y fuente de la existencia de todo ser humano, hoy la sobrevivencia es de carácter socio-económico, para lo cual el cerebro del hombre se ha ido adaptando hasta lograr dominar el lenguaje y la tecnología. La evolución de la civilización y la sociedad siempre estuvieron acompañada de los avances y creaciones del intelecto, entre ellas, las obras de ingeniería (Roces, 2013).

El desarrollo de la construcción a lo largo de la historia es un claro ejemplo del concepto de evolución al que se refiere. Éste permite evaluar de manera sistemática los procedimientos y la utilización de materiales, herramientas, métodos y sistemas constructivos empleados anteriormente y que hoy en día son un referente de la construcción.

Para la construcción los retos son cada vez mayores, la sociedad más receptiva y el usuario más exigente. Por esto, el giro de la construcción en el siglo XXI ha evolucionado de manera exponencial, apegándose hoy en día hacia filosofías de producción en serie como lo son el *Last Planner* y *Lean Construction* (Díaz *et al.*, 2014).

Para entender y modificar el mundo es necesario tener la capacidad de representarlo y medirlo de la manera más fiel posible. Para ello el ser humano ha desarrollado múltiples técnicas de investigación, desarrollo e interpretación de datos para aumentar la productividad en actividades económicas como la construcción, siendo la fotogrametría una de ellas.

Según Bonneval H, 1972, la fotogrametría se define como la técnica cuyo objetivo 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 (Sánchez Sobrino, 2001). Por otra parte, la Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) define a la fotogrametría como: “el arte, ciencia y tecnología para la obtención de

medidas fiables de objetos físicos y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos” (Fernández, 2019).

La historia de la fotogrametría comienza a mediados del siglo XIX con la invención de la fotografía y el estereoscopio y su adecuación para el análisis de características físicas de terrenos y objetos de gran extensión. A pesar de que su desarrollo fue paulatino, el avance más significativo de la fotogrametría y que más se apega a su uso en la actualidad se dio después la 1ra Guerra Mundial. En aquel entonces, esta era elaborada de manera analógica y obtenida por medio de zeppelines, aeroplanos y globos aerostáticos tras la necesidad de crear mapas cartográficos con propósitos de reconocimiento de zonas y estudios de suelos para el despliegue de tropas, estrategias de guerra y posteriormente el desarrollo de vivienda en masa, entre otros.

Con el avance de la aviación civil, el lanzamiento de satélites al espacio, el desarrollo de los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS) y el surgimiento de la fotografía digital entre los años 70´s y 90´s, dio inicio a lo que se conoce hasta el día de hoy como fotogrametría aérea digital (Fretes & Gómez, 2018).

El desarrollo de nuevas tecnologías dentro del sector de la construcción, como el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) o Sistemas de Aeronaves Pilotadas Remotamente (RPAS), conocidos popularmente como drones, han mejorado las técnicas de recopilación de información y aumentado también los alcances de la ingeniería en distintos sectores tras la aplicación de la fotogrametría y la tecnología LIDAR, entre otras técnicas (Rodríguez, 2009)

Aunque el origen de los drones se dio principalmente en el sector militar, con la finalidad de realizar misiones remotas y aumentar la seguridad del ser humano desplazando a los pilotos lejos de las zonas de conflicto, su uso evolucionó y se popularizó para facilitar trabajos de usos civiles, de vigilancia, seguridad, periodismo y entretenimiento, entre otros (González Chamorro, 2019).

Con esta premisa se sospecha que el futuro de los drones apunte hacia escenarios utópicos en los que el humano los utilizaría de manera cotidiana para trabajos que impulsen

el desarrollo económico de las empresas y sus servicios tales como las empresas de paquetería, entrega de comida a domicilio, transporte de materiales e inclusive como un medio de transporte para humanos (González Chamorro, 2019)



Figura 1.1 Origen y uso actual de los drones. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google.

Podemos observar en la Figura 1.1, algunos de los ejemplos mencionados que actualmente se están desarrollando, siendo la construcción uno de los sectores que mejor perspectiva tiene para beneficiarse de la tecnología dron con una amplia variedad de usos, herramientas, plataformas de visualización y procesamiento de información. Para esto, el uso de los drones se ha integrado desde la toma de datos físicos del terreno y su entorno, hasta levantamientos topográficos, supervisión y control durante la construcción, así como realizar inspecciones técnicas y labores de mantenimiento una vez construida la edificación (González Chamorro, 2019).

Algunas de las aportaciones más relevantes del uso de la fotogrametría aérea a la arquitectura y a la ingeniería contemporánea, se pueden ver aplicadas en la preservación y reconstrucción de edificios y/o monumentos históricos. Un ejemplo de ello fue el levantamiento en 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Ecuador con la intención de analizar, modelar y reconstruir un sitio arqueológico caracterizado por evidenciar vestigios de tres culturas diferentes. La importancia de utilizar la fotogrametría para el estudio en lugares tan emblemáticos consiste en disminuir el impacto que pudiera generarse a la autenticidad del conjunto y establecer intervenciones menos invasivas para el desgaste físico de las instalaciones (Aparicio Resco *et al.*, 2018)

1.2. Planteamiento del problema

Actualmente, en el desarrollo de la era digital, la importancia de la implementación de nuevas tecnologías como los drones en los procedimientos de planeación y gestión de proyectos, aumentan la productividad y competitividad de una empresa o institución dentro del sector constructivo.

En Latinoamérica, en los últimos años, cada vez más empresas recurren a la innovación de sus procedimientos de planeación y a la medición de la productividad aprovechando las herramientas tecnológicas que se encuentran en el mercado. Tal es el caso de las empresas grandes y bien consolidadas. Sin embargo, en las pequeñas y medianas empresas, estos avances tecnológicos no han tenido el mismo impacto (Flores *et al.*, 2019).

La etapa de terminación y mantenimiento en un proyecto representa uno de los pasos más complejos y descuidados en el sector y de esta depende la productividad del activo en el que éste se pretende transformar. En esta etapa intervienen estudios, de análisis, seguimiento, supervisión, mejoras, modificaciones, planes de inversión, planes de financiamiento, modelos de negocio, proyectos de investigación y otros, que en la mayoría de los casos requieren meses o años de trabajo dependiendo de su complejidad, sobre todo cuando se trata de proyectos a gran escala.

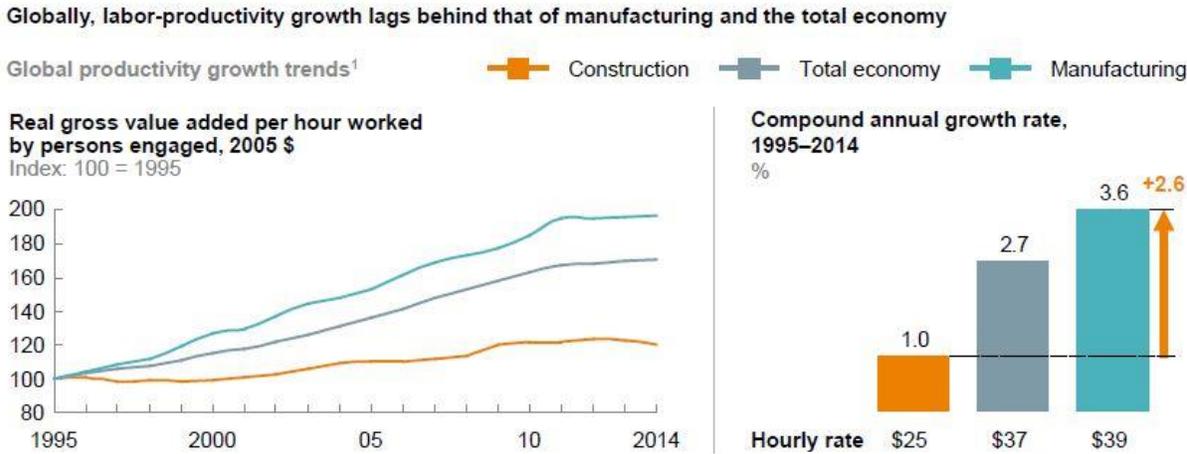
Algunos de los procesos de recopilación de información técnica más útiles para los procesos seguimiento y conservación de un proyecto son los que tienen que ver con el medio físico. Dentro de esta área se clasifican trabajos como levantamientos fotográficos del sector, imágenes cartográficas u ortofotografías, topografía y modelos 3D, principalmente.

Los procedimientos tradicionales para obtener información actualizada del sitio, curvas de nivel, modelos digitales de terreno y ortofotografías, como son la toma manual de fotografías a nivel de suelo o desde un medio de transporte aéreo, pueden resultar costosos en términos económicos y de tiempo. Entre las principales ventajas del uso de los drones están: la obtención y procesamiento de datos espaciales en periodos cortos de tiempo (Tacuri *et al.*, 2017).

A pesar de que el gasto destinado a la construcción a nivel global representa el 13% del PIB en todo el mundo, en las últimas dos décadas según la OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos), los índices de productividad laboral del sector de la construcción a nivel global, han crecido en promedio 1% anual comparado con el 2.8% de la economía mundial y el 3.6% de la industria manufacturera.

Una de las principales causas del rezago de la productividad del sector, según McKinsey Global Institute, se debe a la falta de inversión por parte de las industrias en la digitalización, innovación e implementación de nuevas tecnologías.

“Una de las siete áreas que pueden ayudar a detonar la productividad del sector es la implementación de tecnología y la innovación” (Finney Rutten et al., 2010).



¹ Based on a sample of 41 countries that generate 96% of global GDP.

SOURCE: OECD; WIOD; GGCD-10, World Bank; BEA; BLS; national statistical agencies of Turkey, Malaysia, and Singapore; Rosstat; McKinsey Global Institute analysis

Figura 1.2 Gráficas comparativas de la productividad laboral global en los diferentes sectores. Fuente: McKinsey Global Institute 2017

1.3. Justificación

El interés del sector de la construcción por aumentar su productividad, tal y como lo hace la industria manufacturera, abre paso a una nueva conceptualización de los procesos de planeación y ejecución de proyectos a gran escala. La intención de industrializar los procesos de construcción representa un gran reto a escala global ya que requiere de voluntad por parte de todos los involucrados en las distintas etapas de un proyecto (Finney Rutten et al., 2010).

En la época de la innovación digital surge un nuevo concepto de producción que se traduce como construcción digital o construcción 4.0. Un enfoque de reconversión del sector con la industrialización de los procesos constructivos con la premisa donde las obras son vistas como fábricas productivas en las que se fabrican productos tales como edificios, carreteras, túneles, etc. a través de medios productivos como maquinaria mediante métodos organizados de planeación.

En proyectos ya ejecutados, esta reconversión del sector difiere de manera directa en los procedimientos de mantenimiento del proyecto, así como en los estudios de mejoramiento de la infraestructura e instalaciones para una mejoría continua ya que de uno u otro modo todo lo que se puede ver, se puede medir.

Antes de que se popularizara el uso de los drones como herramienta de fotogrametría aérea, el manejo de la información física de un sitio resultaba ser compleja, tardada y en algunos casos se ponía en riesgo la seguridad de los operadores en campo, según fuera el caso y el sitio.

En la actualidad, el desarrollo y uso de la tecnología garantiza una fiabilidad superior al uso de métodos analógicos y manuales. De hecho la dependencia a estos equipos es tal, que en muchos casos, para la elaboración de distintos proyectos, si no existe una cartografía con una precisión adecuada a la escala del estudio y un cierto rigor en la complementación de datos y simbología, el proyecto puede carecer de valía o consistencia (Rodríguez, 2009).

Actualmente, la Dirección de Infraestructura de la Universidad de Sonora se encarga de los planes y propuestas de mejora, mantenimiento y planes de desarrollo, inversión y crecimiento de la institución. Si se habla de la información que se necesita para esto, dejando

de fuera el tema administrativo, la dirección cuenta con información técnica de sus instalaciones representada por medio de planimetría digital en dos dimensiones que, si bien brindan información técnica precisa, su interpretación queda a criterio de un especialista, algo que resulta difícil de interpretar para cualquier otra persona que lo consulte.

La importancia de que la información de una institución sea transparente y de dominio público es una vertiente cada vez más considerada, y si bien se entiende que hay información que debe manejarse con protocolos de privacidad, existe otra que debería estar al alcance de la comunidad académica, estudiantil y ser de dominio público.

La Dirección de Infraestructura de la Universidad de Sonora cuenta con lineamientos, planes y programas de mantenimiento preventivo los cuales debe de seguir para una correcta conservación de la infraestructura de la institución. Estos se rigen con base en procedimientos de seguridad civil y administrativos para el uso eficiente de los recursos.

La finalidad de un proyecto de este tipo tiende a beneficiar más que perjudicar a la institución con claridad en asuntos administrativos, de logística, infraestructura y también en temas mediáticos, publicitarios y educativos.

En el plan de Desarrollo Institucional (PDI) 2017 – 2021 destacan algunos objetivos prioritarios para tomar en cuenta, entre ellos el No. 42 que habla acerca de la creación, optimización y mantenimiento de instalaciones físicas en el cual su línea de acción menciona que se deberán de aplicar instrumentos informáticos que faciliten la gestión y conservación de la planta física y equipamiento básico asociado a ella. De manera similar se menciona el Objetivo prioritario No. 12.6 Universidad Inteligente el cual tiene como línea de acción: diseñar e implementar nuevas plataformas orientadas a la mejora en la gestión de la infraestructura (<http://infraestructura.unison.mx/plan-de-desarrollo>).

Existen casos como el de la Universidad de Arizona que proporcionan mapas digitales con información general de su infraestructura y que presentan información de dominio público muy útil. Actualmente encontramos esta información de libre acceso en sitios oficiales de la universidad a los que cualquier persona puede acceder (<https://map.arizona.edu/>).

En una entrevista para el Foro Económico Mundial, el director de “Dubai Future Foundation” Khalfan Juma Belhoul, comenta que lo más importante para convertirnos en una sociedad lista para el futuro es adoptar una mentalidad futurista que se arriesgue a innovar y a adoptar ideas innovadoras que se practican en otras partes del mundo.

1.4. Objetivo general

Elaborar un modelo digital de superficie de la unidad centro de Universidad de Sonora por medio de fotogrametría aérea con drones para integrarlo como herramienta innovadora de consulta en el área académica, de infraestructura y administrativa.

1.5. Objetivos específicos

- Implementar el uso de la fotogrametría aérea en la ingeniería como método de análisis para conservación y mantenimiento de un proyecto.
- Analizar la precisión del modelo digital obtenido por medio de mediciones reales en sitio para comprobar su fiabilidad y justificar su uso práctico.
- Proponer una plataforma digital de visualización para toda la comunidad universitaria que permitan consultar y analizar los cambios dentro de la infraestructura de los últimos tres años.
- Realizar una comparación visual del avance en las construcciones o cambios en la infraestructura dentro del campus con respecto al 2019-2021.

1.6. Hipótesis

El uso de los drones y la fotogrametría brinda información práctica y precisa en tiempo real de las condiciones físicas de un sitio para facilitar los procesos de visualización, análisis, documentación y diagnósticos generales para temas de planificación, logística y mantenimiento de infraestructura existentes.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. Fotogrametría

2.1.1. Definición de fotogrametría

El interés por la generación de modelos digitales para consulta y análisis técnicos de alta resolución ha incrementado en los últimos años. Esto debido a las grandes posibilidades que ofrecen los equipos informáticos de ejecutar aplicaciones que contienen gráficos y animaciones 3D, así como aplicaciones de realidad aumentada en las que podemos ejecutar dichos modelos con gran fluidez y realismo

La fotogrametría realizada con drones es una técnica que permite obtener modelos digitales a partir de un conjunto de fotografías. Esta técnica, más bien denominada fotogrametría aérea ha sido implementada para la creación de modelos digitales de terreno (DTM – *Digital Terrain Model*), modelos digitales de elevación (DEM – *Digital Elevation Model*) y modelos digitales de superficie (DSM – *Digital Surface Model*) los cuales, con la mejora de procesamientos y algoritmos de reconocimiento de patrones en imágenes digitales, han mejorado sus alcances de implementación en diversas actividades de topografía, cálculo de volúmenes, modelos digitales, hidrografía, orto fotografía, fotografías panorámicas, etc.(Caro, 2012).

Según Bonneval H. 1972, la fotogrametría se define como “la técnica cuyo objetivo 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” (Sánchez Sobrino, 2001).

2.1.2. Clasificación de la fotogrametría

Según el tipo de equipo y fotografía utilizada, Zelaya *et al.*, (2016) divide la fotogrametría en dos especialidades que son:

- **Fotogrametría terrestre:** Se tiene como aplicación principal la arquitectura y la arqueología, la posición de la cámara y la orientación es previamente conocida ya que esta se ubica en plano horizontal y paralela al terreno.

-
- **Fotogrametría aérea:** Es la que se aplica por medio de cámaras en movimiento, montadas sobre vehículos aéreos o alguna plataforma especial suspendida en el aire y trayectoria previamente programada. El eje óptico de la cámara se ajusta según sea la altura del vuelo en función angular y porcentaje de traslape entre foto y foto.

También dependiendo del método que se emplee, se pueden distinguir estos tres tipos diferentes de fotogrametría en:

- **Analógica:** Utiliza aparatos de restitución mecánica donde, de manera manual, el operador realiza la alineación de las imágenes para crear un modelo estereoscópico debidamente nivelado y escalado.
- **Analítica:** Con la incorporación de las computadoras se crea el restituidor analítico lo que permite agilizar los tiempos de procesamiento y niveles de detalle a diferentes escalas. También incorpora métodos de información a programas de tipo CAD.
- **Digital:** El uso de las computadoras y la programación avanzada dan origen a los modelos digitales de terreno en 3D. Para obtener estos, los softwares identifican los puntos homólogos entre una fotografía y otra, pixel por pixel. Este método se vuelve mucho más preciso que los anteriores y como resultado final obtenemos una imagen en formato raster o digital compatibles con programas de representación, cálculo y visualización específicos.

2.1.3. Origen y evolución de la fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que, si bien no es nueva, recientemente se ha popularizado gracias a su implementación en sistemas aéreos como los drones.

El origen de la fotogrametría se remonta a mediados del siglo XIX y este se asocia con la invención de la fotografía. Entre 1849 y 1851, un oficial del cuerpo de ingenieros del ejército francés llamado Aimé Laussedat desarrolla los conceptos básicos de la fotogrametría y aplica las fotos para la confección de planos. Su dedicación al tema le valió ser reconocido como el padre de la fotogrametría que en su momento se le llamaba econometría o metrografía (Cheli, 2011).

Llegado el año 1893 la fotogrametría se utilizó por primera vez en la arquitectura para el levantamiento de edificios de gran importancia en Europa, método desarrollado por el alemán Albrecht Meydenbauer quien fue el primero en reconocer el término fotogrametría o fotogrametría terrestre analógica.

Con el desarrollo de las primeras cámaras y la popularización de las técnicas fotogramétricas, con base en los principios de la estereoscopia, los ingenieros de la época se esmeraron en el desarrollo de aparatos de toma cada vez más ligeros y sofisticados adaptando las cámaras fotográficas a placas con goniómetro para su orientación, dando origen al fotogoniómetro, el fototeodolito y más tarde al estereoautógrafo (Cheli, 2011)

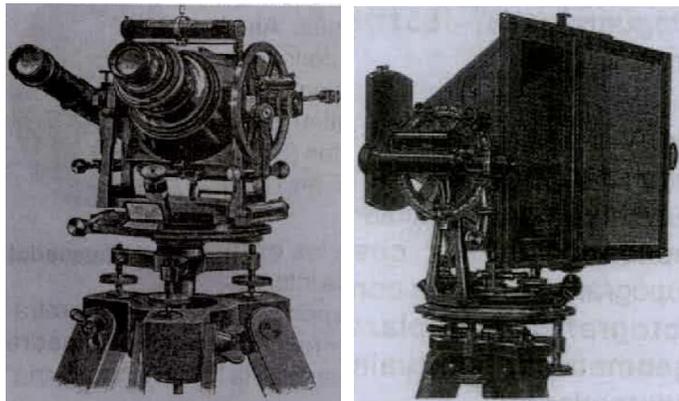


Figura 2.1 "Aparatos de toma". De izquierda a derecha: Fotogoniómetro 1853 y fototeodolito 1859. Fuente: Cheli,2011.

En cuanto a fotogrametría aérea, su desarrollo se da poco después de la evolución de la fotogrametría terrestre para ser aplicada en la milicia con fines de reconocimiento y planes de guerra con el uso de globos aerostáticos en 1855.

Fue hasta 1913, diez años después de la invención del avión por los hermanos Wright en 1903, que se confeccionó en Italia el primer mapa a partir de fotografías aéreas desde un avión. Esto marca el comienzo de la fotogrametría aérea que conocemos hoy (Cheli, 2011).

A pesar de los avances tecnológicos en la aviación, los procedimientos fotogramétricos seguían siendo analíticos y no fue hasta 1990, con el desarrollo de las computadoras, que surge la fotogrametría digital reemplazando los restituidores analíticos

por computadoras potencializadas que resolverían la relación de coordenadas, medidas y su ubicación con respecto a un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) (Zelaya et al., 2016).

Surge la fotogrametría digital y se abre paso a una amplia variedad de aplicaciones prácticas. Entre estas aplicaciones se da el surgimiento de, según lo define Antonio Cheli, la “topografía sin topógrafo” que aunque si bien no puede prescindir de la participación de este, nos permite generar información integral en un solo modelo casi de manera independiente según su grado de autonomía (Zelaya et al., 2016).

2.1.4. Fundamentos de la fotogrametría aérea

En su documento de investigación “Introducción a la Fotogrametría”, el profesor Sánchez define la reconstrucción geométrica a partir de una fotografía como un problema de reconstrucción de rayos homólogos desde dos puntos de vista diferente (Sánchez Sobrino, 2001).

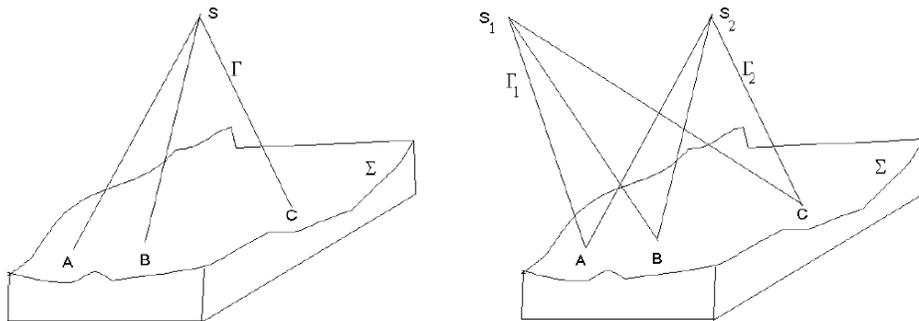


Figura 2.2 Problema fundamental de la fotogrametría. Fuente: Sánchez Sobrino 2001.

Para poder realizar un procesamiento fotogramétrico exitoso es necesario conocer ciertos parámetros que matemáticamente trabajan en el reconocimiento de puntos similares desde una diferente posición espacial. Basándose en patrones de similitud a base de vectores en áreas específicas o píxeles, un software de procesamiento utiliza algoritmos analíticos para encontrar esas similitudes y generar un modelo digital del cual se extrae la información.

Existen cuatro pasos que constituyen el método de la fotogrametría para su correcto procesamiento, estos son proporcionados por el equipo que se va a utilizar.

1. Orientación interna: La determinación del haz perspectivo por sus datos internos, conocer la forma del haz (Distancia focal y otros parámetros).

-
2. Orientación relativa: Determina la posición relativa de un haz respecto a otro, de tal forma que la intersección de puntos en la fotografía determine los puntos del objeto.
 3. Orientación absoluta: Colocación y escalado del conjunto rígido en un sistema de coordenadas.
 4. Restitución: Determinación e identificación de pares de rayos homólogos y los puntos del objeto o terreno (Sánchez Sobrino, 2001).

2.2. Definición de RPAS

El nombre comercialmente utilizado como dron, surge a partir del término en inglés “drone”, asociado a la similitud del sonido que producen los zánganos al volar. El nombre original de estos vehículos es oficialmente conocido de varias maneras, entre las más populares, que también son traducidas del inglés, se encuentran: UAV- *Unmanned Aerial Vehicle* (VANT- Vehículo Aéreo No Tripulado) y RPAS- *Remoted Piloted Aircraft System* (Sistema de Aeronave Pilotado a Distancia), siendo éstos los términos técnicos que estaremos utilizando en el presente documento. En resumen un dron o RPAS es todo aquel vehículo aéreo no tripulado que puede ser controlado de forma remota principalmente para realizar actividades que conllevan algún tipo de riesgo en su vuelo (Flores *et al.*, 2019).

2.2.1. Origen de RPAS

El desarrollo de la tecnología pilotada a distancia surgió en el ámbito militar a mediados de la Primera Guerra Mundial, desarrollada por un fabricante de aviones estadounidense para guiar un bombardero biplano de madera no tripulado. A pesar de que el método de guiado hacia su objetivo era primitivo e ingenioso, sirvió como precursor del desarrollo de armamento de largo alcance por parte de los aliados, en la Figura 2.3 se puede observar su evolución. Tras varios intentos fallidos y años de investigación, uno de los pioneros en este campo de investigación, como lo era Gran Bretaña, optó por abandonar el desarrollo de misiles crucero y mejor desarrollar blancos aéreos pilotados a distancia para la formación y entrenamiento de las fuerzas de artillería (López Carlos, 2015).



Figura 2.3 Evolución de los RPAS. De izquierda a derecha y de arriba hacia abajo, Northrop BQM-74 Chukar, Ryan Firebee, Compass Cope, IAI Pioneer, MQ-9 Reaper y MQ-1C Gray Eagle. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google.com

Al igual que los británicos, empresas estadounidenses emplearon y desarrollaron durante la Segunda Guerra Mundial estos sistemas de aeronaves pilotadas a distancia y les fueron dando diferentes usos. Con el desarrollo de nuevas tecnologías aeronáuticas como el motor de propulsión y reacción, los sensores infrarrojos, los Sistemas de Posicionamiento Global (GPS), el uso de los radares, y los sistemas de comunicación satelital, aumentó exponencialmente el potencial de los drones, lo que permitió que se usaran para más fines y propósitos militares.

Entre los usos bélicos más importantes que se les dio a los drones, desde la guerra fría hasta el día de hoy destacan: reconocimiento de terreno enemigo, misiones furtivas, de rescate y de telecomunicación. Dados estos avances en la industria de los drones, a finales del siglo XX surgen técnicas de recolección de información que, en el área civil, han permitido innovar en las formas de utilizar y procesar la información.

Los drones como herramienta de trabajo y uso civil se empezaron a utilizar desde los años 90's como herramientas de recolección de datos, pero sus costos eran muy altos y sus funciones muy limitadas. No fue hasta el año 2010 que se popularizaron y su nicho de mercado se posicionó principalmente en el sector recreativo. Ahora es posible manejarlos a través de señal wifi con un teléfono inteligente o en algunos casos por medio de inteligencia artificial.

En la actualidad, existen marcas comerciales de drones que ponen a nuestra disposición herramientas técnicas, audiovisuales, mediáticas, de trabajo, rescate y hasta deportivas. Afortunadamente sectores como el de la arquitectura, construcción, minería y la agricultura se han beneficiado ampliamente con sus capacidades, tanto así, que los fabricantes se enfocan principalmente en estas actividades y las consideran su principal nicho de mercado.

Debido al aumento exponencial de la producción de vehículos aéreos no tripulados, las leyes de aviación civil han tenido que evolucionar en todo el mundo ya que la comercialización de los drones representa un riesgo de seguridad pública, nacional y seguridad de las instalaciones gubernamentales (Ávila, 2017).

Hoy en día, los fabricantes que lideran el mercado de los drones enfrentan problemáticas de contención de riesgos civiles por actos de imprudencia por parte de sus usuarios. Tal es el caso del mayor fabricante a nivel global, la empresa china DJI Technology Co. que mantienen control sobre sus productos regulando las zonas de vuelo seguro (Figura 2.4 y Figura 2.5) según su cercanía con aeropuertos, instalaciones militares y penitenciarias principalmente, por medio de un software de georreferenciación con GPS integrado al

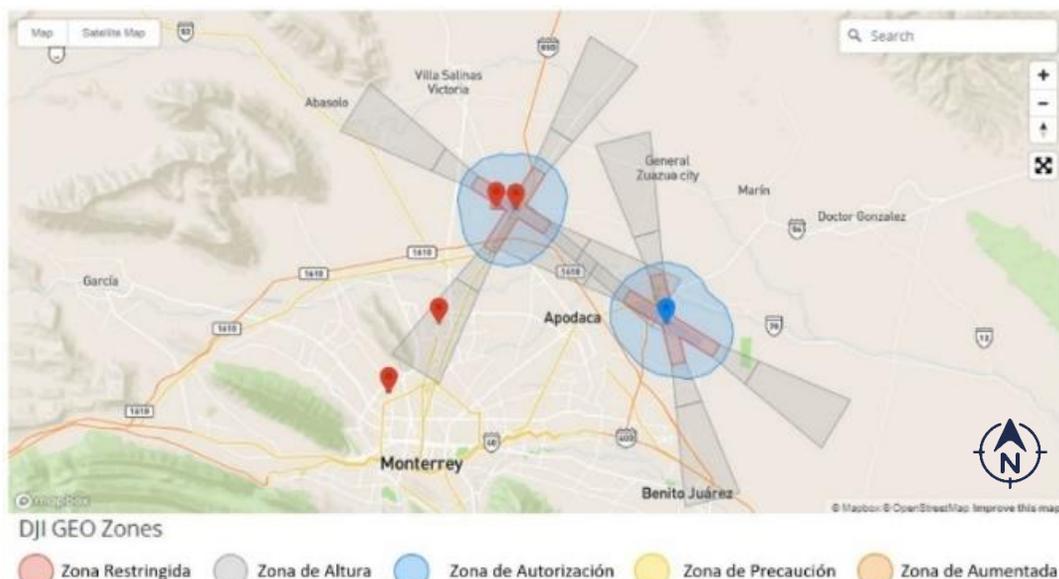


Figura 2.4 Monterrey N.L, Mapa de Geo zonas de restricción y vuelo seguro DJI.

Fuente: <https://www.dji.com/mx/flysafe/geo-map>

sistema de vuelo el cual establece cercos de seguridad y protección según una clasificación de riesgos de seguridad civil y seguridad nacional para prevenir atentados y/o accidentes.

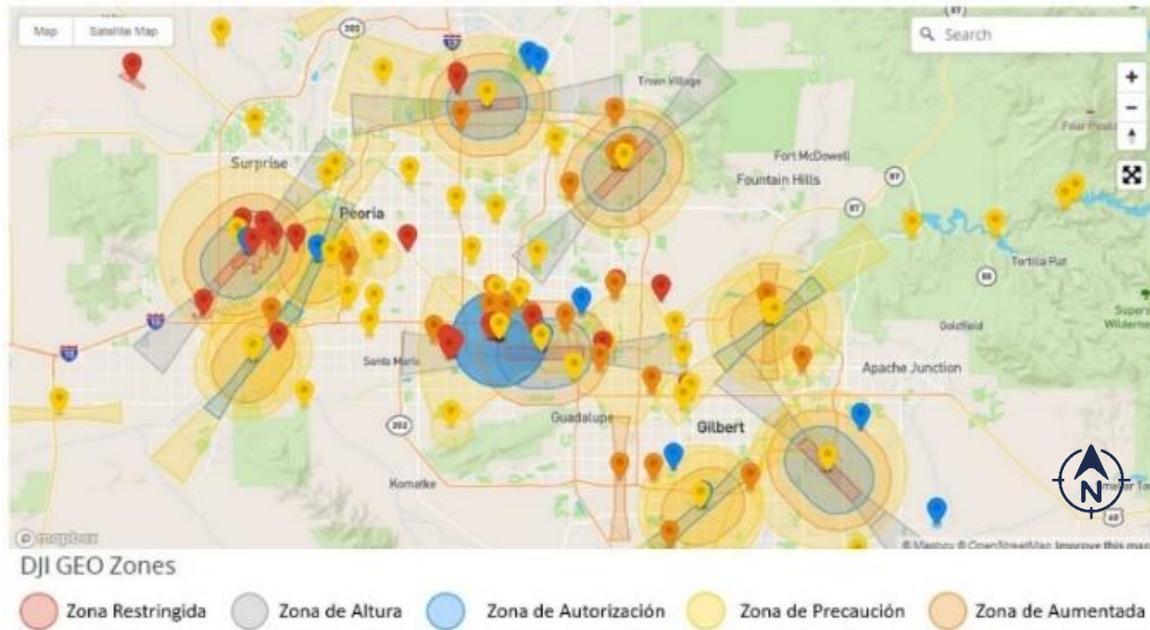


Figura 2.5 Phoenix Az, Mapa de Geo zonas de restricción y vuelo seguro DJI.
Fuente: <https://www.dji.com/mx/flysafesgeo-map>

2.2.2. Clasificación de los RPAS

Como lo describe Manuel Charfen (Charfen, 2015) en su investigación, los drones dependiendo su propósito, suelen ser clasificados en seis tipos:

- **Blanco:** Simulan aviones o ataques enemigos en los sistemas de defensa antiaéreos.
- **Reconocimiento:** Envían información militar en tiempo real, suelen ser tipo avión o helicóptero.
- **Combate (UCAV):** Para ataque y misiones peligrosas.
- **Logística:** diseñados para traslado y entrega de carga.
- **Investigación y desarrollo:** Pruebas e investigan de nuevos sistemas en desarrollo. Principalmente mediciones medioambientales.

-
- **Comerciales y civiles:** son diseñados para propósitos civiles, filmaciones, entretenimiento, deportivos, laborales y algunas aplicaciones cotidianas.

En este trabajo de investigación hablaremos acerca de los drones de tipo comerciales y civiles que son utilizados en el sector de la construcción.

2.2.3. Tipos de RPAS

La oferta de los drones en la actualidad es muy extensa, en el rubro de la construcción existen diferentes tipos según su uso, actividad y propósito de trabajo. A pesar de que se ha popularizado tanto la adquisición de estos equipos, no todos los que se encuentran en el mercado funcionan para trabajos de fotogrametría. Los tipos de drones más utilizados recientemente en la construcción los podemos ver en la Figura 2.6

Los drones se clasifican en diferentes tipos según sus características físicas y de funcionamiento, composición tecnológica, rendimiento, equipamiento, tipo de cámara, sensores, etc.

En cuanto a sus características físicas y de funcionamiento, según Pari Rendón *et al.*, (2019), se encuentran los drones de tipo:

- **Ala fija:** Presentan un diseño similar al de un avión, pero de pequeñas dimensiones, el cual es una gran ventaja ya que hace posible un excelente desempeño aerodinámico que incrementa su autonomía de vuelo de hasta 59min. Se debe a su diseño y la mínima resistencia que ofrece al aire durante el vuelo. Estos drones están orientados básicamente para sobrevolar áreas de gran envergadura, de hasta 1200ha. Por vuelo, áreas relativamente planas o relieve no muy accidentado, tienen buena estabilidad durante el vuelo, alcanzan los 110 km/h en velocidad crucero, los aterrizajes suelen ser un complicados si no se cuenta con espacio suficiente.
- **Multirrotor:** Los multirrotores o de ala rotatoria, son aquellos que tienen al menos dos hélices “helicóptero”, cuatro hélices “cuadricóptero”, seis hélices “hexacóptero”

y ocho hélices “octacóptero”; Estos son el tipo de drones más comunes, por su facilidad para volar, dimensiones pequeñas, fácil transporte y bajo costo.

La autonomía de estos drones generalmente no supera los 30 minutos de vuelo, están más orientados para registrar información audiovisual, pero también existen algunos modelos diseñados específicamente para realizar fotogrametría profesional, sus principales limitantes son: poca resistencia a la velocidad del viento y baja velocidad durante el vuelo, por tanto, el área a cubrir durante una misión es de entre 20- 60 Ha.

Un de las ventajas más importantes de los multirrotores radica en el despegue y aterrizaje vertical, ya que esta opción les permite volar casi en cualquier entorno y hasta es posible volar durante la noche.

- **Híbridos:** Son una mezcla de los drones de ala fija y los multirrotores, es de suponer que despegue y aterriza como un multirrotor, pero vuela como un avión, una de las ventajas es su gran autonomía durante el vuelo y su precisión al momento del aterrizaje, son capaces de llevar cámaras de gran resolución además de estar equipados con diferentes tipos de receptores GNSS. Entre los más comerciales se encuentra el RPA híbrido de fabricación suiza, marca Wingtra modelo WingtraOne.



Figura 2.6 Tipos de RPAS. De izquierda a derecha: Modelo Ebee X, DJI Phantom 4 pro, Wingtra One. Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google imágenes.

La posición de los drones en la escala de los medios de teledetección se ubica en una posición muy eficiente con respecto a su precisión y modos de operación dentro del campo de trabajo. Partiendo de los métodos tradicionales de topografía y cartografía que son el uso

de estaciones totales y aeronaves tripuladas principalmente, los drones generan información de igual o mejor calidad.

En el caso de los satélites artificiales estos representan una ventaja por su amplio campo de visión y aunque estos superen por mucho al de cualquier otro, su precisión en cuanto a mediciones no puede ser utilizada como medio legítimo al momento de realizar trabajos de fotogrametría de precisión.

2.3. Regulaciones de vuelo

La regulación de vuelos civil de los drones es un tema nuevo para la mayoría de los países en todo el mundo. En Estados Unidos existe una entidad gubernamental encargada de la regulación de los sistemas aeronáuticos, por medio de la Administración Federal de Aviación (FAA - Federal Aviation Administration), de aprobar, regular y controlar todas las disposiciones que traten de aviación sobre el espacio aéreo. A pesar de ello, en el tema de los drones existía hasta hace poco, un vacío legislativo acerca del tema pues la única reglamentación que podría aplicarse por principio analógico serían las de aeromodelismo y vuelo deportivo (Ávila, 2017).

Fue entonces entre el año 2006 y 2007 cuando se empezó a abordar el tema de los drones y su reglamentación para uso civil, pero hasta el 2011 se constituyó el primer paso por parte de la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), para establecer un marco normativo para la integración de los drones al espacio aéreo.

Actualmente cada país trabaja de manera vertical a las normativas internacionales de aviación civil y uso de aeronaves pilotadas a distancia, sin embargo, estos adecuan las normas según sus leyes, es decir, cada país tiene sus propias reglas y requerimientos para otorgar licencias de pilotos de aeronaves pilotadas a distancia.

2.3.1. Regulación local (México)

En México, la organización encargada de regular los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia en el espacio aéreo mexicano es la Dirección General de Aeronáutica Civil (Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT, 2019) . Ésta clasifica los drones según su peso máximo de despegue y su uso.

Esta reglamentación se encuentra en la Norma Oficial Mexicana de Requerimientos para operar un Sistema de Aeronave Pilotado a Distancia (NOM-107-SCT3-2019) y establece principalmente que, para hacer uso de un drone dentro del espacio aéreo mexicano, se debe cumplir con una serie de requisitos y con un registro del equipo ante la SCT con la finalidad de registrar al usuario, corroborar su estado de salud, capacitación y responsabilizarlo en caso de que algún accidente sea ocasionado.

La regulación del espacio aéreo se da según las características del equipo y su uso específico, esta clasificación se establece en tres tipos:

- RPA Mini: Peso máximo de despegue menor a dos kilogramos.
- RPA Pequeño: Peso máximo de despegue entre los 2.001 y los 25 kg.
- RPA Grande: Peso máximo de despegue de los 25.001 o más.

Tabla 2.1 Clasificación de RPAS según su peso y uso específico. Fuente: Modificado de tabla de clasificación de RPAS (SCT, 2017)

CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS DE AERONAVES PILOTADAS A DISTANCIA				
PESO MÁX. DESPEGUE	CATEGORÍA	USO	REGISTRO	LICENCIA
2.000 KG O MENOS	RPAS MICRO	PRIVADO RECREATIVO	-	-
		PRIVADO COMERCIAL	☞	-
		COMERCIAL	☞	-
2.001 KG HASTA 25 KG	RPAS PEQUEÑO	PRIVADO RECREATIVO	☞	-
		PRIVADO COMERCIAL	☞	☞
		COMERCIAL	☞	☞
25 KG O MAS	RPAS GRANDE	PRIVADO RECREATIVO	☞	☞
		PRIVADO COMERCIAL	☞	☞
		COMERCIAL	☞	☞

Los principales requisitos para poder registrar un drone para uso comercial sea clasificado “pequeño” o “grande” son: ser mayor de edad, de nacionalidad mexicana, comprobar un domicilio, contar con factura original del equipo, comprobante de compra, constancia de aptitud psicofísica reciente, aprobación de examen de formación aeronáutica, curso teórico de 70 horas, capacitación previa comprobada de más de 13 horas de vuelo, entre otros (Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT, 2017).

2.4. Características de un dron utilizado para fotogrametría

Las características técnicas que debe cumplir un dron enfocado a la fotogrametría varían según la marca y el tipo de aeronave. Cada dron es diseñado para uno o varios usos específicos, y aunque hay algunos modelos muy bien equipados en cuanto a tecnología, no todos se utilizan con el mismo propósito o para cualquier tipo de misión.

Una de las principales características que se toman en cuenta para misiones fotogramétricas es la altitud, estabilidad y la autonomía del vuelo pero, para poder seleccionar un equipo óptimo es necesario analizar las condiciones de operación, estructura de la aeronave y las características de la cámara con la que está equipado (Pari Rendón et al., 2019).

En su documento de investigación el Ing. Rendon enlista los valores, características y rangos aceptables de los equipos que nos pueden servir.

Tabla 2.2 Características óptimas de la estructura del RPA. Fuente: Pari Rendón 2019.

<i>Estructura del RPA</i>	
Estructura del RPA	Valor
Tipo	VTOL (despegue y aterrizaje vertical)
Estándares	MIL-STD-810F
IP	56
Peso	Máximo 8 kg.
Rastreo de satélites	GPS y Glonass
Sensores de proximidad	Si
Estructura	Fibra de Carbono, EPO Foam
Propulsión	Motor eléctrico
Material de hélices	Fibra de carbono

Tabla 2.3 Condiciones de operación óptimas de un RPA. Fuente: Pari Rendón 2019

<i>Condiciones de operación de un RPA</i>	
Especificaciones de vuelo	Rango aceptable
Resistencia al viento	65 k/h
Altitud	5000 m.s.n.m.
Tipo de vuelo	Manual / Autónomo
Limitaciones climáticas	Lluvia ligera
Tipo de batería	Polímero de litio
Temperatura	-20°C + 45°C
Altura de vuelo	750m AGL
Resolución del Sensor	42mpx
Tiempo de vuelo	59 min2
Rango de vuelo	65km
Velocidad Crucero	85 km/h
Traslape	60% 90%

Tabla 2.4 Características óptimas de la cámara de un RPA. Fuente: Pari Rendón 2019

<i>Características de la cámara</i>	
Característica	Valor
Memoria Extraíble	SD 64GB (Mínimo)
Estabilización de Imagen	SI
Enfoque	Automático
Lente	Fijo y/o Intercambiable
Batería	Recargable para 310 disparos aprox.
Compatibilidad	Debe ser compatible con el RPA
Grabación de video	En formatos estándares
Resolución	Mayor a 24 Megapíxeles
Conectividad	Wifi, Entrada USB

2.5. Métodos de procesamiento de información

Un dron por sí mismo no puede procesar las fotografías que toma en el vuelo, para esto en el área de la fotogrametría existen software o plataformas de procesamiento que se encargan del manejo, procesamiento y representación visual de la información recabada por los drones.

Entre las más populares, en nuestra región, se encuentran algunos softwares como Pix4D y Agisoft Metashape. También existen visualizadores de datos en línea que son más amigables con el usuario. Tal es el caso de Drone Deploy y 3DR Sitiescan los cuales facilitan la interacción y el manejo de datos de una manera atractiva, dinámica y fácil de trabajar.

La mayoría de estas plataformas mencionadas requieren del pago de licencias para su uso y, según un comparativo realizado en enero del 2020, sus costos de suscripción anual varían entre \$3,500 a \$4,000.00 dólares americanos por una licencia corporativa según su modalidad. A continuación, se enlistan en orden según cierta popularidad en el mercado.

Tabla 2.5. Tabla comparativa de costos de licencias de softwares para fotogrametría.

PROGRAMAS PARA FOTOGRAMETRÍA				
LOGO	NOMBRE	PLATAFORMA	COSTO ANUAL	MONEDA
	Pix4D	ESCRITORIO, ONLINE	\$ 3,500.00	DLLS
	Agisoft Metashape	ESCRITORIO, ONLINE	\$ 3,499.00	DLLS
	Drone Deploy	ONLINE	\$ 3,588.00	EURO
	3DR Sitiescan	ONLINE	\$ 3,800.00	DLLS

Para este proyecto de investigación, se realizó el procesamiento de las imágenes por medio de uno de estos softwares, capaz de procesar 3,000 imágenes y abarcar extensiones de terreno de hasta 120 ha. Este software ofrece una precisión milimétrica y brinda como resultado final archivos en formato GIS, CAD, TIFF, etc.

En resumen, la fotogrametría se logra gracias a la composición grafica de cada imagen y su relación con las demás, basándose en la similitud que hay entre una y otra tomando como puntos de conexión la orientación, coordenadas y los pixeles. Este procedimiento de empalme de imágenes requiere de una configuración de vuelo previa en la que se determina el ángulo de captura del lente y un porcentaje de empalme entre foto y foto. Este proceso de fotogrametría digital se hace por medio de algoritmos automatizados en un periodo de tiempo que puede variar entre una y cuatro horas dependiendo el volumen de información a procesar.

2.6. Aplicaciones de los drones en la construcción

Existe una amplia integración de los drones en aplicaciones de uso civil muy útiles para la vida cotidiana. Estos equipos se utilizan, por ejemplo, para fines de marketing y publicidad, detección de fugas de gases y productos tóxicos, monitorización del tráfico, asistencia de servicios de salvamento y rescate, control de riesgos, control de ganado, vigilancia, etc. (González Chamorro, 2019).

En la construcción, la evolución de los drones y los sistemas de procesamiento han permitido innovar tanto en sus métodos de recolección y visualización de datos, obtención de información y acceso a perspectivas visuales a las que el ser humano no había podido acceder antes. En el artículo Uses of Drone Applications to monitor Productivity (Tello, 2019) se agrupan las aplicaciones del uso de los drones que más impacto productivo tienen en la construcción. Algunas de estas aplicaciones se mencionan y desarrollan en este proyecto con la ayuda de un equipo DJI Phantom 4 advanced con cámara de 20 MP de resolución y sensor CMOS de 1”.

Tabla 2.6. Aplicaciones potenciales de los drones en la construcción. Fuente: Traducción propia de P. Anticona (2019)

APLICACIONES DEL USO DE LOS DRONES EN LA CONSTRUCCIÓN		
FOTOS OFICIALES DE CONTRATOS	PROMOCION Y VENTAS	FOTOGRAFÍAS DEL AVANCE
RECONOCIMIENTO DEL SITIO PREVIO A LA COMPRA	ANÁLISIS PREVIO DEL SITIO	REVISIÓN DEL DISEÑO
VERIFICACION DE CONDICIONES EXISTENTES	PREVENCIÓN DE INCONFORMIDADES	RESOLUCIÓN DE INCONFORMIDAD
INSPECCIÓN DE CONTROL DE CALIDAD	INSPECCIÓN DE SEGURIDAD	INSPECCIÓN DE EQUIPO
PLANEACIÓN DEL USO DE ENERGÍA	REVISIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE ENERGÍA	DOCUMENTACIÓN DEL PROYECTO
CONSTRUCTIBILIDAD	PLANEACIÓN DE TRABAJO	DESARROLLO DE MODELO BIM
MEDIDAS DE PRODUCCIÓN	COORDINACIÓN DE TRABAJOS	PLANEACIÓN DE ACCESIBILIDAD
MONITOREO DE PROPIEDAD ADJACENTE	RECORRIDOS	CUANTIFICACIONES
EVALUACIÓN DE DAÑOS POST-TORMENTA	RESPUESTA DE AYUDA EMERGENTE	REPARTICIÓN DE PARCELAS
SEGURIDAD EN SITIO	REVISIÓN DE LISTAS DE VERIFICACIÓN	INSPECCIÓN FINAL

Los drones en la construcción complementan el uso de tecnología, manejo de datos e integración de modelos tridimensionales útiles para la mejora de la productividad, uno de los principios de la industrialización de la construcción o construcción 4.0. El Mc Kinsey Institute determina el uso de la tecnología en la construcción como una de las siete prácticas de mejora global más potenciales para la productividad ya que esta tiene un impacto en el mejoramiento de la productividad del 14% y un ahorro del 5% en el costo (Finney Rutten et al., 2010).

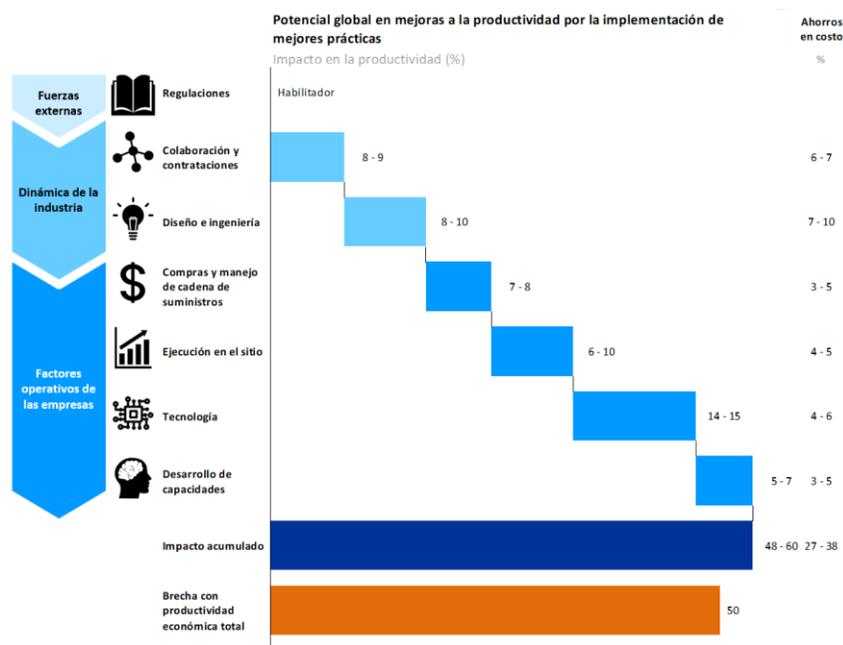


Figura 2.7 Gráfica de las mejoras de implementación de prácticas para potencializar la productividad en la construcción. Fuente: Modificada y traducida de Mc Kinsey (2017)

Para proyectos particularmente complejos, en cuanto a terrenos con características físicas y geográficas que presenten dificultades y riesgos de operación, la ingeniería demanda cada vez más el uso de la tecnología que facilite y agilice las tareas en sitio gracias a la precisión que brindan el uso del GPS, la aplicación de sensores laser y la integración del internet en campo, entre otros.

Para adecuar esta tecnología digital a nuestros procedimientos de planeación e inspección, el experto en arquitectura y construcción Luis Dávila Peniche, en su columna

publicada en la Revista Mexicana de la Construcción, recomienda considerar factores importantes que, de cierto modo, limitan el interés de las empresas por la innovación tecnológica, como la curva de aprendizaje, planes de capacitación, soporte técnico, frecuencia de actualización, monto de inversión inicial y planes de mantenimiento (Peniche Dávila, 2018).

Para el desarrollo de un proyecto, el uso de los drones y otras tecnologías pueden representar una mejora en la productividad. Principalmente en la etapa de planeación donde interfieren estudios que permiten conocer a detalle el medio físico donde se va a trabajar, éstos representan la fase crítica en la cual se hace un diagnóstico global del terreno.

En esta etapa se identifican características físicas del sitio y su entorno, características de la geografía, condiciones ambientales a las que se puede enfrentar y que podrían perjudicar o beneficiar, costos de inversión del proyecto, adaptabilidad del proyecto con la naturaleza y su relación con la mancha urbana dentro de un mismo contexto.

2.6.1. Fotografía y video

La primera interacción que se tiene como proyectistas o inversionistas con un sitio es de manera visual, para tomar decisiones o simplemente darle el valor a un terreno es importante el alcance de la perspectiva visual y así poder descubrir el potencial de un predio que sea de interés.

Las posibilidades de visualización que se tienen con el uso de los drones podrían ser casi infinitas. El hecho de que se pueda manejar por el aire y de manera remota una cámara, ayuda a conseguir ángulos de visibilidad panorámica de un entorno sin precedentes. Esto brinda información visual útil para la toma de decisiones, desde simplemente conocer la totalidad del área de trabajo y su entorno (ver el ejemplo en la Figura 2.8).



Figura 2.8. Fotografías panorámicas en vialidades principales de la ciudad de Hermosillo, Son. De arriba hacia abajo: Blvd. Eusebio Kino, altura de vuelo 25 m, Blvd. Luis Encinas intersección con Blvd. Solidaridad, altura de vuelo 80 m. Fuente: Elaboración propia.

El equipo que se utiliza para obtener estas fotografías suele ser manejado, comúnmente, de manera manual, aunque también existe la posibilidad de hacerlo con rutas previamente programadas para obtener mejores resultados. Un dron comercial con las características óptimas de operación, mencionadas en el capítulo 2.7, preferentemente de tipo multirrotores, brinda habilidad de manejarlo en dirección “x”, “y” y “z” y permanecer en vuelo estático durante el tiempo que se desee para tomar las fotografías en el ángulo y posición que más convenga, alcanzando así, techos de vuelo de hasta 500 m (AGL – *Above Ground Level*) sobre el punto de despegue.

En cualquier modalidad de vuelo se obtienen fotografías de alta resolución con parámetros de profundidad e iluminación ajustables, fotos panorámicas en diferentes proporciones y videos en alta resolución HD y 4K, 60 cuadros por segundo (FPS – *Frames Per Second*).

El uso de la fotografía y video aéreo se utiliza principalmente en el sector inmobiliario para promoción y venta del proyecto, reconocimiento del sitio de trabajo, supervisión, monitoreo y documentación de procesos constructivos. Este material obtenido puede ser utilizado de manera independiente en varios formatos de visualización y exportarse a softwares de postproducción.

2.6.2. Topografía

Se define como topografía a la ciencia que trata de los principios y métodos empleados para determinar las posiciones relativas de los puntos en la superficie terrestre por medio de medidas y ejes en un espacio. Estos ejes se determinan por “x”, “y” y “z”(Cheli, 2011).

El uso de esta ciencia ha evolucionado y se ha ido sofisticando. En la era moderna, tiene un papel indispensable en la construcción dado que determina, ubica y delimita los linderos entre un terreno y otro, además de que permite obtener información física y espacial de un sitio con relación a sus forma, superficie y elevación.

El aumento en el costo de los terrenos y su necesidad por delimitarlos ha derivado en el desarrollo de instrumentos y métodos de medición cada vez más precisos, integración de tránsito de alta precisión, distanciómetros electrónicos, colimadores láser y estaciones totales con GPS (Zelaya et al., 2016).

La aparición de la fotogrametría aérea con drones como técnica complementaria de la topografía ha impactado de manera positiva en los procesos, métodos y costos de recolección de datos. En la actualidad existen drones equipados con sistemas de navegación GNSS Y GNSS RTK que aportan información para navegación, posicionamiento y reconocimiento de puntos cinemáticos en tiempo real.

2.6.2.1. Sistema global de navegación por satélite GNSS

GNSS (*Global Navigation Satellite System*) o Sistema Global de Navegación por Satélite se refiere al conjunto de tecnologías que proveen de posicionamiento geoespacial tridimensional con una cobertura global de manera autónoma. Existen dos métodos de medición que son los más utilizados en la actualidad que son el método estático y el método RTK.

- **Estático:** se utiliza para posicionar puntos geodésicos de alta precisión unificando un solo marco de referencia que es la red geodésica nacional. Este método es principalmente utilizado por las estaciones totales o receptores fijos y necesita observar al menos dos receptores GNSS en simultáneo.

- **RTK:** También llamada navegación cinemática en tiempo real, demuestra mayor precisión. Esta utiliza un solo receptor GNSS como estación base y un número ilimitado de receptores móviles que actualizan o corrigen sus coordenadas en tiempo real.

Principalmente se utiliza en receptores terrestres en movimiento o aeronaves en vuelo, aunque no todos los drones cuentan con este sistema (Pari Rendón et al., 2019).

2.6.2.2. Levantamientos topográficos con dron

El levantamiento topográfico con el dron se hace por medio de un vuelo programado el cual sea configurado con los parámetros óptimos determinados por la forma del terreno, extensión y altura.

Una vez realizado el levantamiento se obtendrán diferentes modos de visualización (ver Figura 2.9 y Figura 2.10) dependiendo la plataforma que se haya seleccionado para el procesamiento y esta podrá ser exportada en formatos CAD y GIS para su manipulación y análisis.

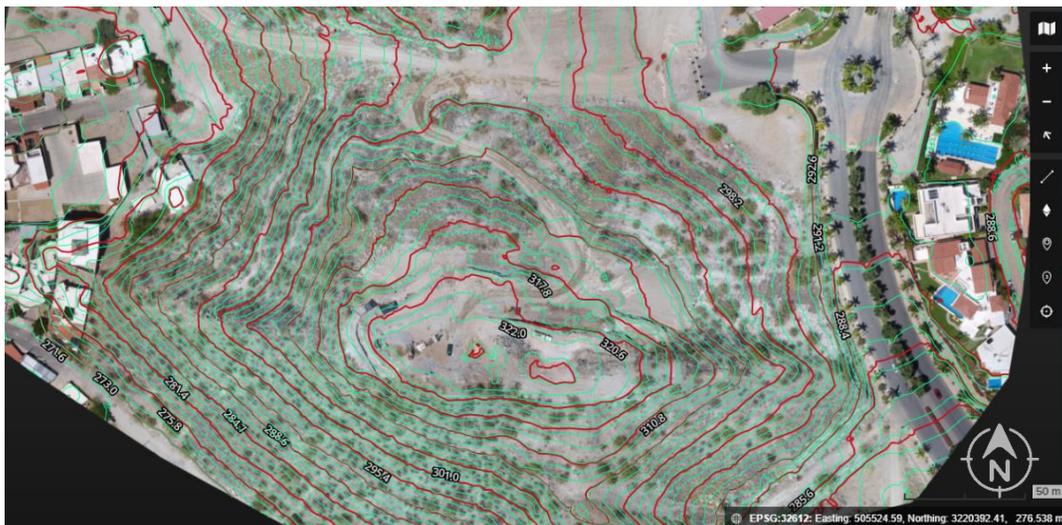


Figura 2.9. Curvas de nivel proyectadas sobre un terreno irregular en la ciudad de Hermosillo, Son. con procesador px4 autopilot de la plataforma 3DR Sitsescan. Fuente: Elaboración propia.

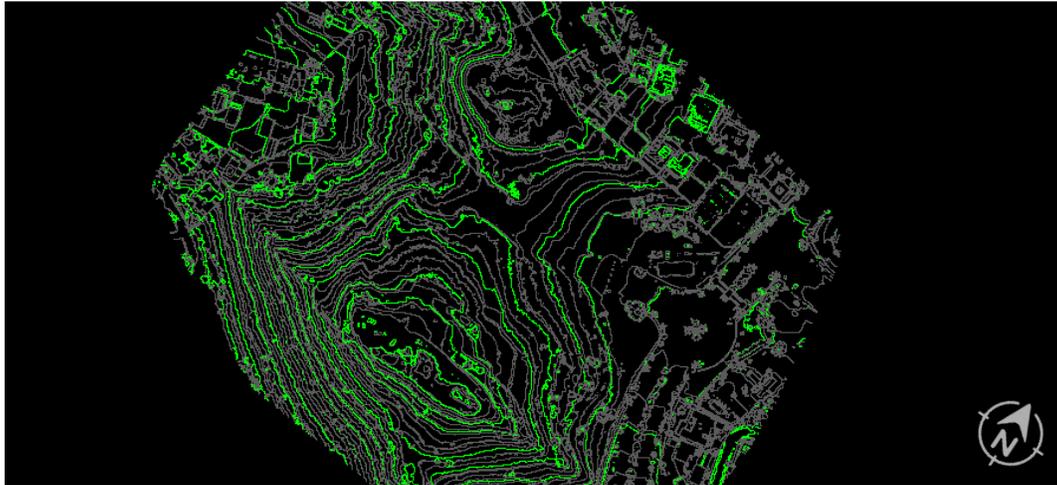


Figura 2.10. Plano en Auto Cad de curvas de nivel extraído de un Modelo Digital de Terreno. Fuente: Elaboración Propia

2.6.3. Orto fotografía

La elaboración de orto fotografías se define como una presentación fotográfica de una zona o superficie terrestre de en la cual los elementos integrados se proyectan a una misma escala, libre de errores y deformaciones. Para conseguir una orto fotografía se necesitan un conjunto de imágenes aéreas tomadas desde un vehículo aéreo o satelital que conformen una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva la cual permitirá realizar mediciones precisas a diferencia de una fotografía aérea simple, con la misma validez de un plano cartográfico.



Figura 2.11. Orto fotografía de terreno para predio en parque industrial de la ciudad de Hermosillo, Son. Fuente: iDrone.mx

Con el uso de un dron, se pueden conseguir imágenes aéreas de alta calidad a una altura que te permita conseguir mejor resolución y claridad en sus tomas. El uso de los drones para este tipo de trabajos aumenta la precisión y cada vez gana más terreno en el área de la ingeniería relegando el uso de vuelos de inspección con aviones o globos aerostáticos.

Existen herramientas de procesamiento que además de elaborar automáticamente una ortofotografía, sus algoritmos brindan mayor información obtenida de la profundidad de cada imagen, por lo tanto, permite visualizar y diferenciar perfectamente áreas, niveles, profundidades, depresiones, elevaciones. Se puede observar en la Figura 2.13 y Figura 2.13.

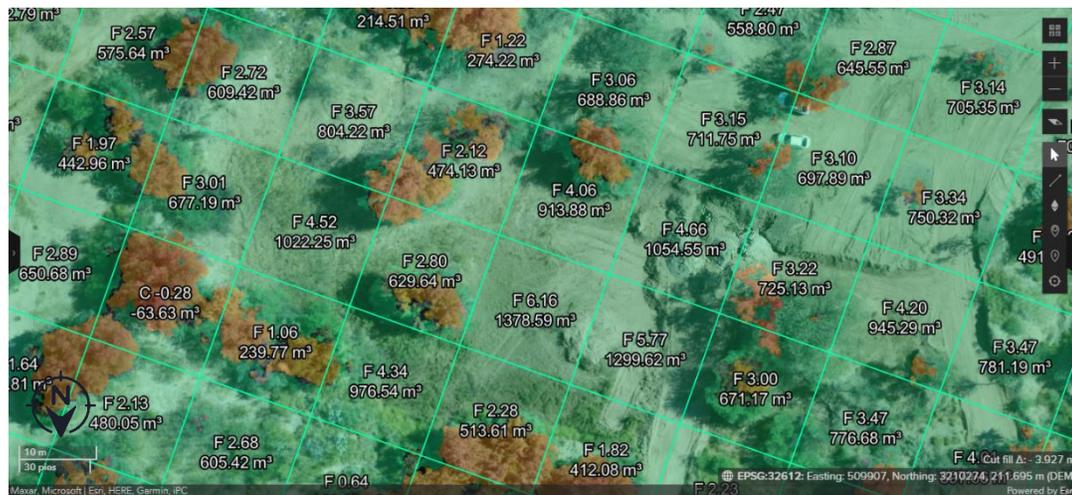


Figura 2.12 Diagrama de corte y relleno extraído de orto fotografía de un predio, representado por cuadrícula y volumen de extracción de material según nivel base predeterminedo. Fuente: iDrone.mx

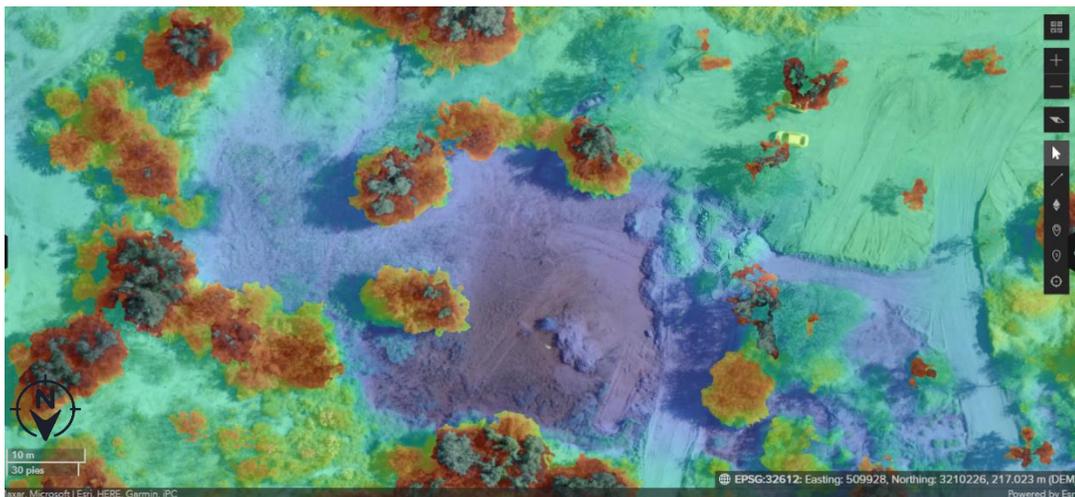


Figura 2.13 Diagrama de elevación extraído de orto fotografía de un predio, representado por diferenciación de color. Fuente: iDrone.mx

Para una mayor precisión es conveniente contar con un nivel de referencia o punto de control extraído en campo con coordenadas geográficas y que este sea visualmente reconocible por el dron a la altura que se pretenda hacer el levantamiento. De esta manera se obtendrá una georreferenciación en campo y aumentará el nivel de precisión absoluta.

2.6.4. Modelo digital

El uso de la fotogrametría en la ingeniería aplica métodos de obtención y procesamiento de imagen cada vez más eficiente, mayor precisión y compatibilidad con diferentes plataformas de trabajo. Para el caso del modelado 3D y ortofotografía existen visualizadores que permiten trabajar el modelo digital desde un teléfono inteligente o tableta electrónica.

La ventaja de utilizar drones para los levantamientos aéreos de campo es que estos integran softwares de posicionamiento geográfico que etiquetan las imágenes obtenidas de una por una para su posterior procesamiento. Este permite elaborar un mapa digital de información georreferenciada que, en conjunto con la información binaria de la imagen y su interpolación milimétrica, brindan un producto de alta resolución útil para estudios arquitectónicos, topográficos, estructurales y urbanos.

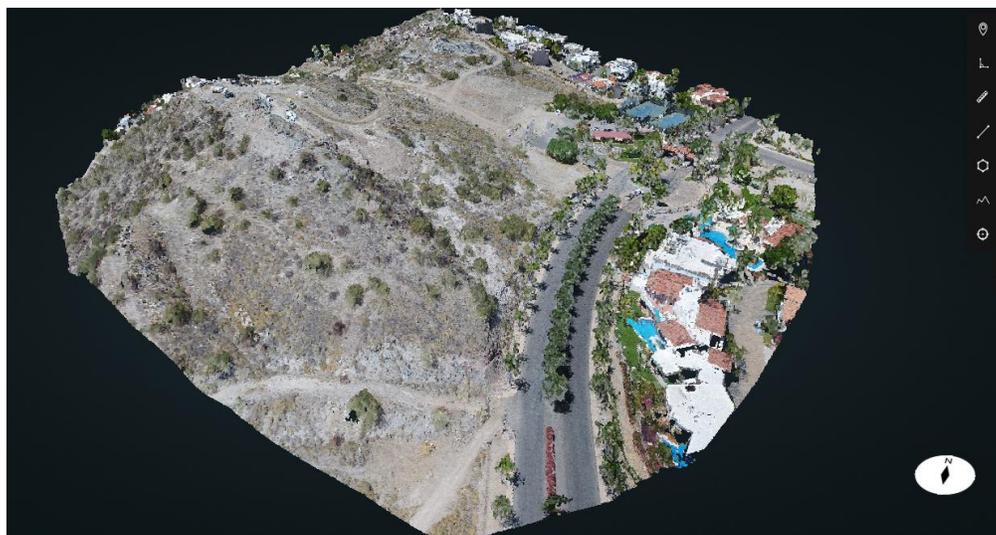


Figura 2.14. Modelo digital de nube de puntos de acceso de fraccionamiento residencial La Jolla. Fuente: iDrone.mx

Se le llama modelo digital a la composición geométrica de uno o “n” número de elementos definidos como píxeles que integran una representación gráfica en tres dimensiones, es decir, composiciones volumétricas que pueden formar mallas o nube de puntos de los cuales se extraen datos paramétricos para su estudio específico.

Los modelos digitales muestran información paramétrica de manera visualmente amigable y su composición constituye información útil para diferentes disciplinas y áreas de estudio. Aunque existen métodos de escaneo laser submétricos, la fotogrametría permite elaborar estos modelos a través de imágenes con una precisión centimétrica.

Los principales modelos digitales que se obtienen por medio de fotogrametría derivan de un modelo digital de elevación, y según su procesamiento se clasifican en dos tipos que, según el INEGI, se describen de la siguiente manera:

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 sus elementos u objetos, ver Figura 2.15. En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y el grado de detalle digital de la representación en formato digital, las cuales varían según el método que se emplea para generarlos.

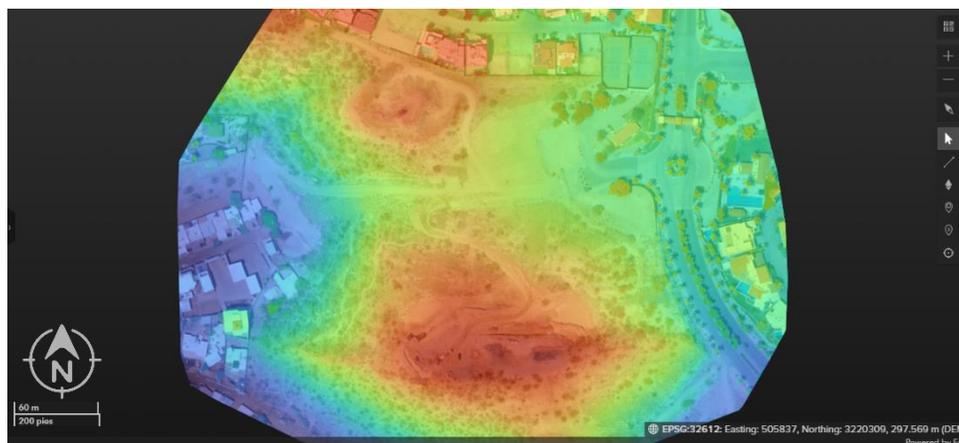


Figura 2.15. Diagrama de elevación en modelo digital. Fuente: iDrone.mx

La importancia de estas representaciones visuales radica en que constituyen una gran aportación para análisis y estudios del área de la ingeniería civil y ciencias de la tierra y un importante insumo para cartógrafos, geólogos, hidrólogos, ingenieros, militares y en la actualidad para los sistemas de información geográfica (SIG).

Estas fuentes de información digital se utilizan para el estudio de la superficie terrestre principalmente y también para el análisis de construcciones, ciudades y vialidades existentes.

Al existir dos tipos, terreno y superficie, a través de los modelos digitales de elevación es posible conocer la existencia, disposición, forma y posición de los elementos que conforman un espacio geográfico y que pueden ser de origen natural o antrópico.

Modelo digital de Terreno (DTM) Este modelo, también conocido como modelo de “Tierra Desnuda”, recrea la forma del terreno removiendo todos los elementos ajenos al mismo como la vegetación, edificaciones e infraestructura.

Modelo digital de Superficie (DSM) Es el que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra como la vegetación, edificaciones, infraestructura y terreno, ver Figura 2.16.



Figura 2.16. Diferencia visual entre un Modelo Digital de Terreno (DTM) y un Modelo Digital de Superficie (DSM). Fuente: www.gisresources.com

2.7. Casos de estudio

El uso de las técnicas fotogramétricas para levantamientos y modelado 3D de edificaciones existentes, ya sea creadas por civilizaciones antiguas o contemporáneas se han visto utilizadas en diferentes áreas de estudio como lo son la arqueología, el urbanismo y el análisis de elementos estructurales. Tales son los casos mostrados en el presente documento en donde principalmente se hace énfasis en las condiciones espaciales del elemento a estudiar, su composición física original y su intervención.

2.7.1. Caso 01. – Levantamiento Arqueológico de Todos Santos, Ecuador.

En un artículo llamado “Fotogrametría digital para el levantamiento 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador), el cual evidenciaba vestigios de tres culturas diferentes, se muestra cómo se realizó una reconstrucción digital en base a la información recabada por medio de un levantamiento fotogramétrico con drones.

Esta labor permitió realizar un modelo digital de nube de puntos sobre el cual se incorporaron procedimientos de modelado digital en capas para lograr la reconstrucción. Siendo para el autor esta una importante estrategia de vanguardia para la conservación y difusión del patrimonio cultural que permite contribuir a la construcción permanente de la memoria de la humanidad (Aparicio Resco et al., 2018).

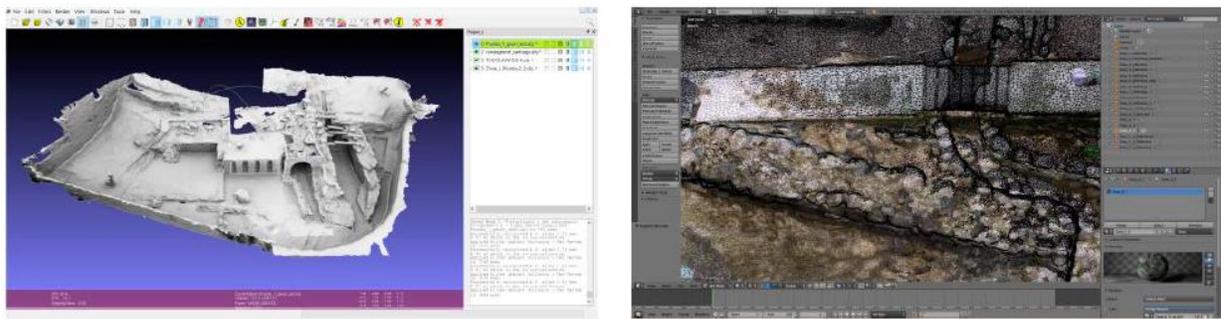


Figura 2.17. Captura de pantalla de visualización de modelo 3D en capas y sección de nube de puntos.
Fuente: (Aparicio Resco et al., 2018)



Figura 2.18. Orto fotografía del levantamiento fotogramétrico de la zona. Fuente: Aparicio Resco et al., 2018

2.7.2. Caso 02. – Análisis estructural Puente de la Torre, Italia

Como método de análisis de las condiciones físicas de una estructura, la fotogrametría aérea con drones y el uso de softwares especializados han permitido utilizar herramientas de inspección que, en base a algoritmos de reconstrucción, permiten inspeccionar construcciones para el análisis de deterioros, patologías y desgastes en estructuras con difícil accesibilidad. Tal es el caso del Puente de la Torre en Spoleto Italia, el cual con un mapeo fotogramétrico se logró analizar e identificar el patrón de agrietamiento y desgaste a lo largo del tiempo para elaborar un diagnóstico de su conservación a más de 800 años de antigüedad.

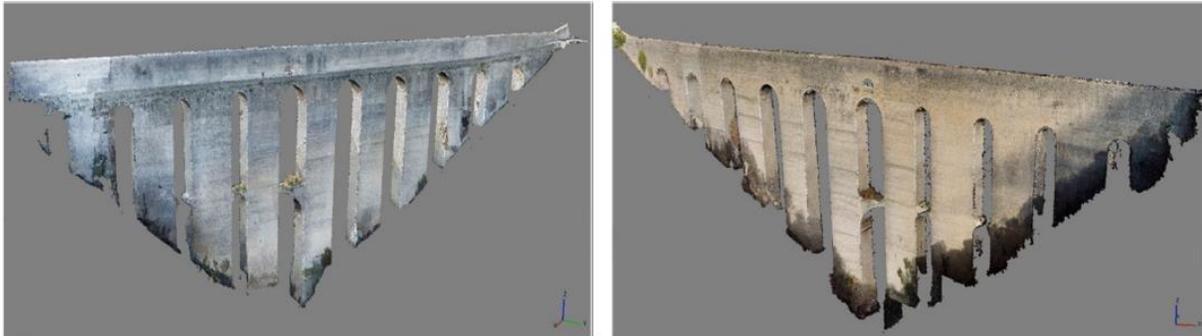


Figura 2.19. Modelo digital de nube de puntos, vista norte y sur del puente. Fuente: Mongelli et al., 2017.

El propósito de la metodología presentada en este documento fue identificar y definir la taxonomía de las grietas para dar seguimiento a su evolución con mapeos periódicos a lo largo del tiempo. En base a ortofotografías de alta resolución de cada uno de sus lados se identificaron los tipos de grieta presentadas en sus pilares y se clasificaron según su forma para establecer un indicador del daño que han sufrido (Mongelli et al., 2017).

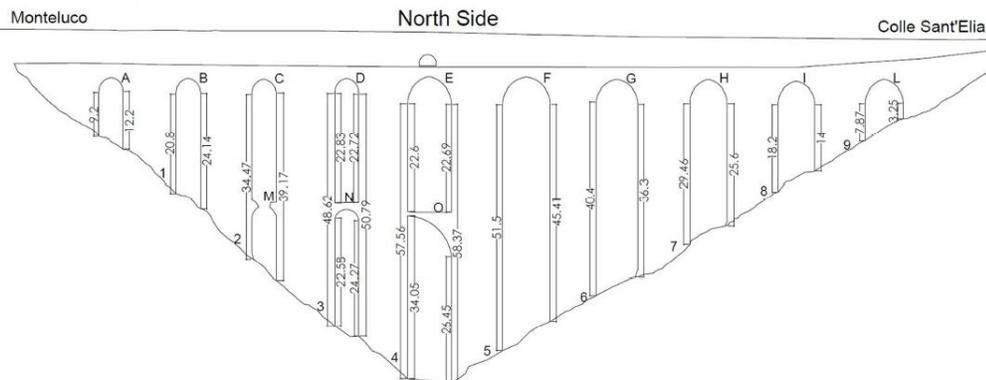


Figura 2.20. Planimetría basada en levantamiento fotogramétrico del lado Norte. Fuente Mongelli et al., 2017:

2.7.3. Caso 03. – Reconstrucción del entorno urbano en Colonia, Alemania

Un trabajo sobresaliente de fotogrametría desarrollado en un entorno urbano lo podemos ver en el trabajo realizado en la antigua ciudad de Colonia, Alemania. Para este proyecto de investigación se procuró hacer una reconstrucción digital en tres dimensiones para rescatar la identidad de un edificio emblemático de la zona que había sufrido modificaciones a lo largo de la historia, (Fritsch & Klein, 2018).



Figura 2.21. Vista frontal de nube de puntos del objeto de estudio y los edificios vecinos. Fuente: Dieter Fritsch et al., 2017

Por medio de fotogrametría aérea y terrestre y otros métodos de escaneo laser se logró digitalizar el corredor urbano donde se encuentra el punto de interés. Esto con la finalidad de elaborar un modelo 3D del objeto de estudio y los edificios aledaños.

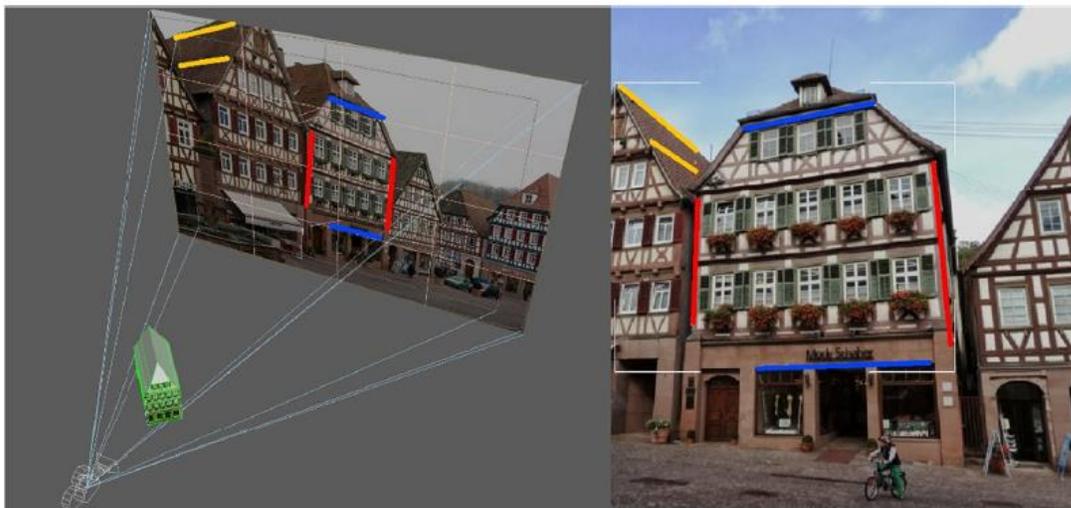


Figura 2.22. Determinación manual de la posición de la cámara para superposición del modelo. Fuente: Dieter Fritsch et al., 2018.

En este proyecto de investigación se trabajó con imágenes históricas del inmueble para hacer una superposición de éstas dentro del modelo digital para, por medio de un programa de modelado 3D. Lo que se consiguió fue elaborar un modelo digital con las medidas reales a partir de la unificación de un levantamiento fotogramétrico real con una imagen histórica. El resultado lo podemos ver en la figura 20.

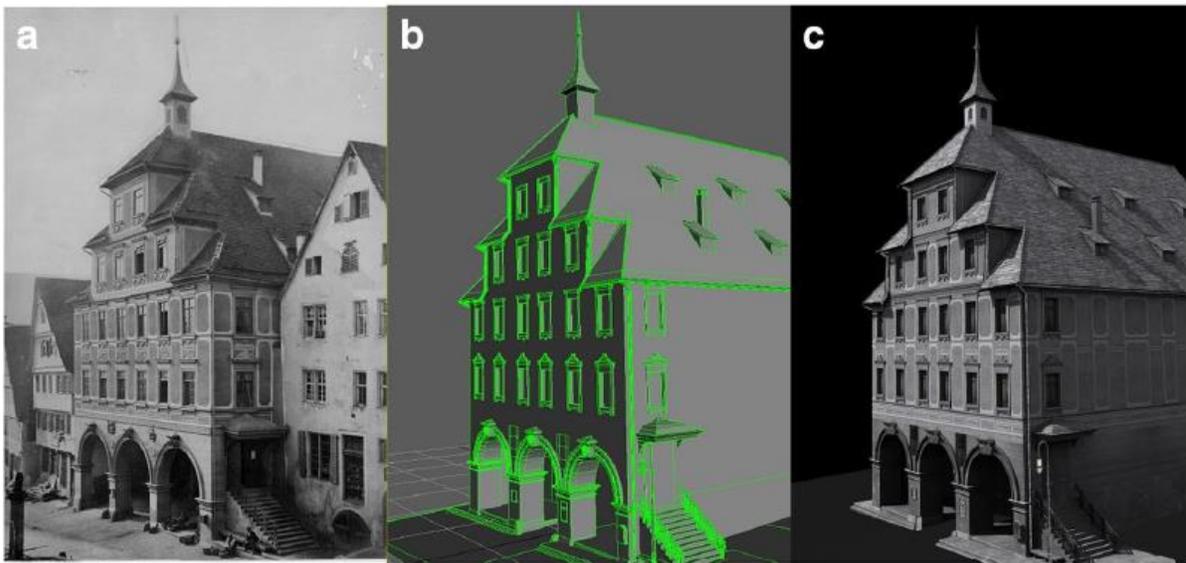


Fig. 14 The Calw Town Hall – (a) 1882 photograph (b) parametric 3D model (c) textured 3D model

Figura 2.23. De izquierda a derecha, imagen histórica del objeto de estudio, modelo digital paramétrico y modelo 3D texturizado finalizado. Fuente: Dieter Fritsh et al., 2018.

2.7.4. Caso 04. – Construcción edificio Parkview Pitic, Hermosillo Sonora

Dentro de la ciudad se colaboró con una empresa que brinda el servicio de fotogrametría e inspección de obra para documentar el avance y presentar los reportes de obra a los inversionistas y durante un periodo de un año se realizaron vuelos de supervisión una vez al mes.

El reto de este proyecto fue realizar recorridos de vuelos que no impactaran con las estructuras fijas durante el proceso ya que como se trataba de una edificación vertical que mes a mes crecía y la cual por precaución se debía programar un vuelo que la rodease, así como también a la estructura de la grúa de carga que se mantuvo fija durante la construcción.

El tipo de vuelo empleado en este proyecto fue escaneo perimetral en tres capas, es decir, se programa una ruta en la cual se toma en cuenta el tamaño o volumen del objeto de estudio, su altura y la altura del vuelo; éste de manera automática ajustaría, durante el vuelo la ruta, elevación máxima y mínima previamente configurada para realizarse en un solo viaje. En la Figura 2.24 se puede observar el trazo del vuelo descrito anteriormente.

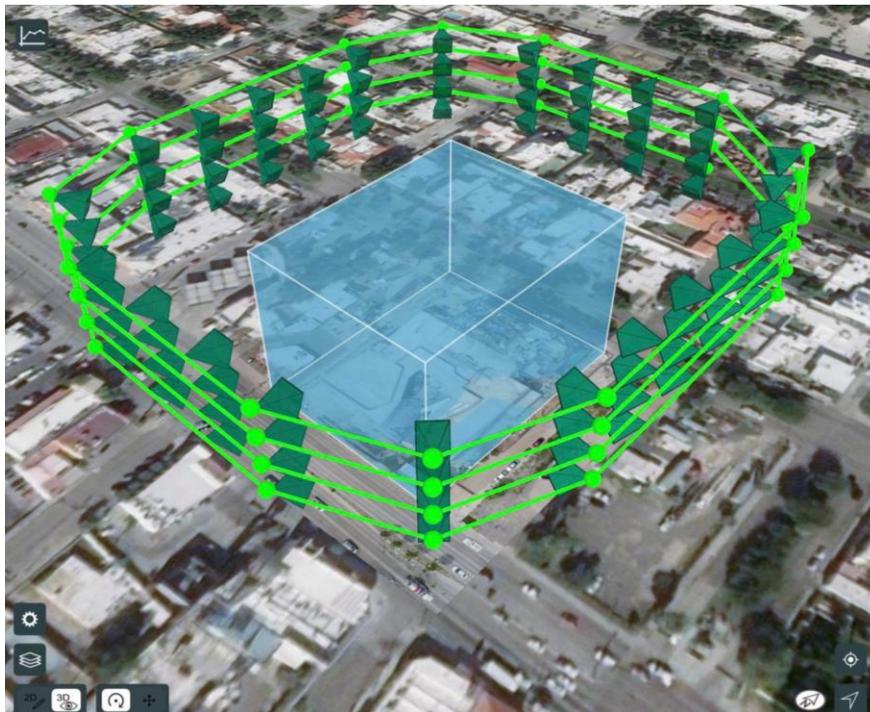


Figura 2.24. Ruta de vuelo perimetral sobre proyecto de edificación vertical en Parkview Pitic, Hermosillo, Son. Fuente: Aplicación de 3DR Sitescan 2019.

El propósito de este proyecto por el cual fue solicitado tenía dos intenciones. Una de ellas era para monitorear desde lejos el avance de los trabajos de obra y llevar control sobre las estimaciones y cumplimiento de los contratos y la segunda para documentar los procesos y mostrarlo a los inversionistas como evidencia para la recaudación del recurso económico.

En la Figura 2.25 se muestra en resumen del proceso documentado durante el año 2019 – 2020 el cual fue interrumpido en su momento por la contingencia sanitaria del COVID-19.

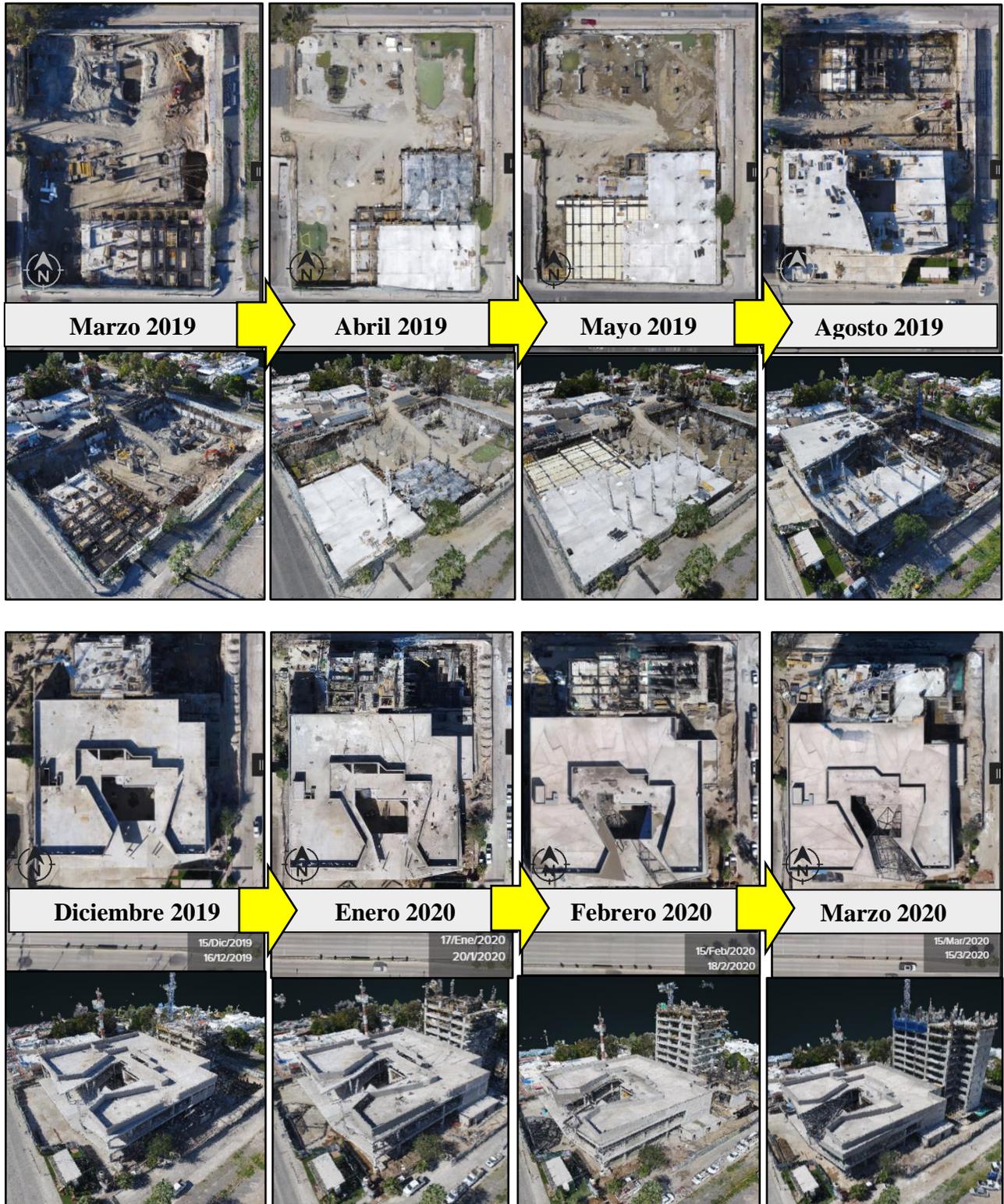


Figura 2.25. Avance del proceso de construcción del proyecto Parkview Pitic con vuelos periódicos cada 30 días.
Fuente: iDrone 2020

3. DESARROLLO METODOLÓGICO

Para establecer una metodología de trabajo se consideraron distintas etapas para las cuales se tomaron en cuenta: conocimiento del tema, el acceso a un dron y plataforma de procesamiento fotogramétrico, planeación de vuelos en campo y una redacción ordenada de la información en un documento escrito. Cada una de estas etapas que se muestran en la siguiente figura, contempla un periodo de trabajo el cual también se describe a continuación.

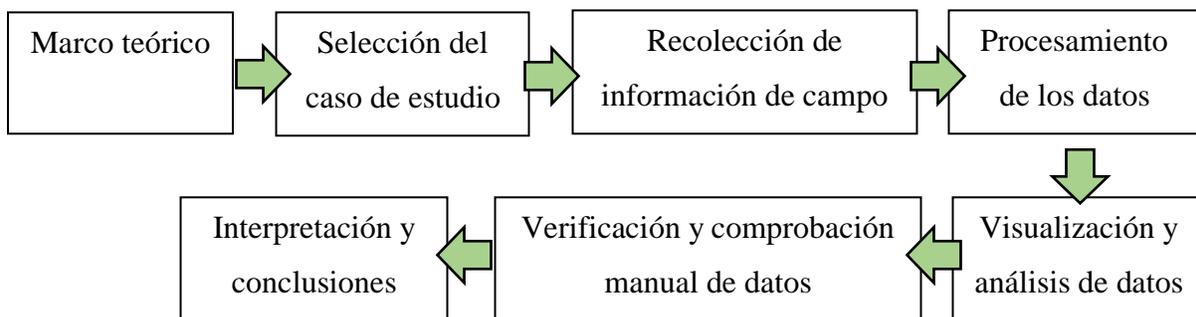


Figura 3.1. Proceso metodológico de investigación.

3.1. Marco teórico

El estudio de la fotogrametría como eje rector de las capacidades y el alcance de los medios que la complementan como lo son los drones y sus características principales nos permitieron cuestionar, implementar y desarrollar procedimientos según las necesidades y usos planteados. El uso de los drones en las diferentes áreas potenciales, que emergen con la evolución de la tecnología, ayudó a representar el objeto de estudio de una manera vanguardista y así mismo ampliar los alcances de nuestras intervenciones en un futuro. Con las referencias de métodos similares ya utilizados en casos de estudio relacionados al tema, se obtuvo una amplia noción del uso de la fotogrametría y sus aportaciones a la ingeniería para emplearlos en las siguientes etapas de la investigación.

Uno de los puntos más importantes que se procuró conocer antes de iniciar con el desarrollo de esta metodología, y que también se menciona en este documento, es la normativa de vuelos y uso de cualquier vehículo aéreo pilotado a distancia ya que el mal manejo de estos puede traer graves consecuencias de seguridad civil a terceros.

De los casos recientemente estudiados y mencionados para la realización de este documento se toman en cuenta los procesos metodológicos que se llevaron a cabo en cada uno de ellos para llegar a los resultados y de este modo se podrán plantear soluciones técnicas similares según sea conveniente.

Como parte fundamental del conocimiento del estado del arte se consultaron documentos o artículos con un periodo de publicación, de preferencia, menor a los 5 años ya que la evolución de los drones y sus características han cambiado de una manera muy apresurada.

Para el desarrollo de este trabajo fue importante conocer los alcances de la fotogrametría en la construcción y como estos se pueden integrar a métodos de trabajo y recopilación de información de una manera práctica por parte de autoridades educativas y/o administrativas afines, que si bien no todos ellos serían implementados en este proyecto, pudimos poner en práctica algunos de ellos, sin embargo queda abierta la posibilidad de explotar ampliamente esta herramienta para análisis técnicos posteriores.

Uno de los aspectos importantes a considerar en este trabajo de investigación fue elaborar un método de comprobación de datos en sitio el cual pudiera ser replicado tomando en cuenta de que se estaría trabajando con un modelo digital previo a una validación georreferenciada.

3.2. Selección del caso de estudio

Para seleccionar el caso de estudio se tomaron en cuenta las características del sitio contemplado y sus posibles aportaciones para la comunidad. Dentro de las propuestas consideradas se buscó determinar un uso práctico que beneficie a uno o varios sectores sin intereses particular o fines de lucro.

En referencia a la información obtenida en la revisión bibliográfica y a los casos de estudio fue importante, para seleccionar un sitio de estudio, analizar el impacto que el análisis de este tendrá sobre el espacio aéreo de la zona de vuelo y considerar sus posibles afectaciones en caso de que éste se encuentre dentro del cerco de seguridad de vuelo en referencia a la norma de seguridad de vuelo correspondiente.

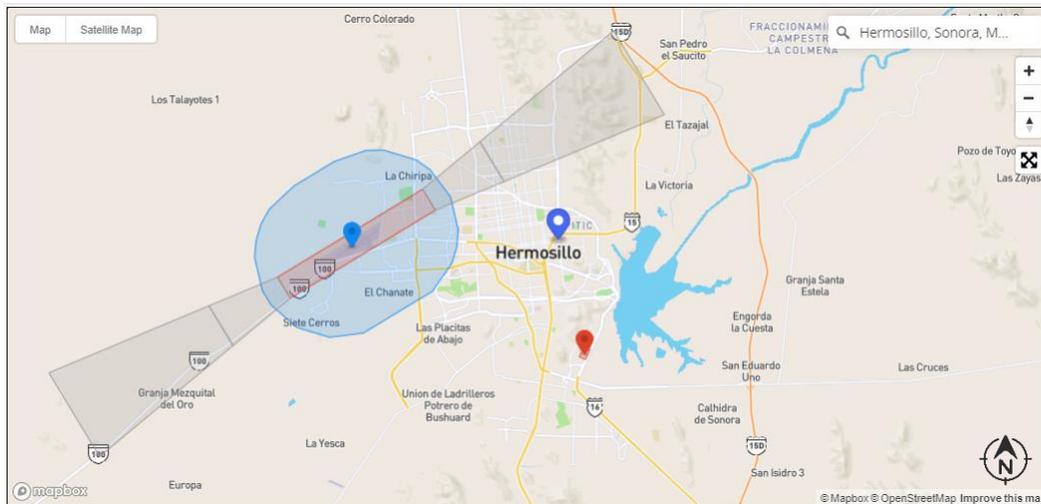


Figura 3.2. Mapa de geo zonas de vuelo seguro. Fuente: www.dji.com/flysafe/geo-map

En la Figura 3.2, del mapa de geo-zona de seguridad de vuelo se visualizan las zonas de riesgo de ocupación del espacio aéreo, las cuales, por motivos de seguridad civil, no serían invadidas con los planes de vuelo para la selección del caso de estudio.

Como propuesta inicial de caso de estudio se contemplaron preferentemente instalaciones académicas ya que se busca tener un beneficio social con un énfasis académico. Tal es el caso de las instalaciones e infraestructura de la Universidad de Sonora dentro de la ciudad de Hermosillo.

3.3. Recolección de información de campo

En la etapa de recolección de información se tomaron en cuenta las características del equipo a utilizar, así como resolución de la cámara, estabilidad y duración de vuelo del dron, alcance de la señal de control remoto y el techo de vuelo a utilizar dependiendo la infraestructura del sitio, tal es el caso de antenas de radiodifusión, parabólicas, y/o torres eléctricas de alta tensión, según sea el caso que se presente. La altura del vuelo, la luz y la

estabilidad determinan la precisión y claridad de las tomas para conseguir un mejor resultado del procesamiento fotogramétrico.

Una vez determinada el área de estudio se tomó en cuenta la extensión de la zona a sobrevolar para determinar puntos de despegue del dron y de esta manera acortar distancias de traslado al inicio y final de cada plan de vuelo.

El procedimiento de recolección de información debió ser programado en un tiempo determinado según la extensión y el rendimiento en vuelo del equipo a utilizar, es decir, en caso de que se requiera un tiempo de vuelo mayor a dos horas debió programarse el seguimiento del vuelo para el día siguiente preferentemente a la misma hora para hacer coincidir en su mayor posibilidad la cantidad de luz en las imágenes. El clima y el estado del tiempo fueron factores importantes a considerar, un día nublado y con ráfagas de viento por arriba de los 45 km/h pudiera haber perjudicado la nitidez de las imágenes, lo cual pudiera repercutir en el procesamiento de la información y tener variaciones en la precisión de las mediciones.

Fue importante también tomar en cuenta el día de la semana que se haría el levantamiento fotográfico aéreo ya que es conveniente contar con menor aforo vehicular y /o personas en circulación. Lo que nos interesaba para este tipo de trabajos era un entorno físico lo más despejado posible.

3.4. Procesamiento de datos

Para el procesamiento de datos se analizó la posibilidad de utilizar alguna plataforma o software de fotogrametría comercial y útil a la que se pudiera tener acceso por medio de la institución académica o de alguna empresa particular ya que los costos de adquisición de las licencias son altos y en el caso de las que ofrecen periodos de prueba son de herramientas limitadas para el alcance que se pretende mostrar en este trabajo de investigación.

Para este proyecto de investigación se consiguió acceder a una plataforma de procesamiento llamada 3DR Sitiescan, desarrollado por una empresa estadounidense

especializada en fotogrametría aérea con drones y visualización de datos en línea. Este proveedor de servicios permite almacenar la información en la nube sin necesidad de instalar un programa. Hacer uso de ella requiere el pago de una licencia de acceso la cual se consiguió con el apoyo de una empresa particular dedicada a la inspección de obra y procesos de construcción a distancia ubicada en la ciudad de Monterrey N.L.

Dado el tipo de proyecto desarrollado con una finalidad de análisis visual, se consideró la plataforma anteriormente mencionada gracias a su amigable interfaz, accesibilidad y capacidad de compartir información a otros programas o a terceras personas.

Como plataforma de fotogrametría para uso institucional, también se propone 3DR Sitiescan como herramienta de visualización y procesamiento debido a su sencillez, manejabilidad, su compatibilidad con otras plataformas y su asistencia técnica. Ésta consiste en ser un potente visualizador en línea que no requiere de la instalación de un software en el ordenador, es decir, desde cualquier computadora con conexión a internet se puede utilizar.

Además de ser un motor de procesamiento eficiente, 3DR Sitiescan permite integrar herramientas externas para homogenizar la información y datos paramétricos, como archivos cad, tiff, pdf e inclusive se puede incorporar a plataformas BIM 360 en caso de que se requiera utilizar para post procesamientos técnicos de mayor precisión.

Si bien el resultado procesado para este proyecto de investigación resulta ser muy acertado, con algunos procedimientos de post procesamientos se podría lograr una validación del modelo digital a un nivel de precisión aun mayor, es decir, con el apoyo de una considerable cantidad de puntos de control, dada su extensión, se podría mejorar su precisión absoluta y correlación con las coordenadas geográficas.

Para el proceso de datos obtenidos se hizo un registro de las configuraciones de los parámetros de vuelo y configuraciones del procesamiento para analizar de qué manera se podía lograr un mejor producto terminado, que en nuestro caso fue el modelo digital de superficie, modelo digital de elevación, modelo digital de terreno, mallado y nube de puntos.

3.5. Visualización y análisis de datos

Existen distintas formas de visualización de datos obtenidos y esto dependía de la plataforma o software que se haya utilizado. Se buscó organizar la información de la mejor manera y claridad posible ya que el objetivo principal de este proyecto de investigación era lograr que el modelo digital pueda ser utilizado por la comunidad estudiantil, académica y administrativa, aunque no se tuviera un conocimiento técnico avanzado del tema.

Dado que un MDS, MDT Y MDE permiten realizar estudios técnicos en diferentes áreas y con amplias especificaciones técnicas, este proyecto se enfocó principalmente en mostrar el alcance de la fotogrametría aérea con drones dentro de la ejecución, supervisión y mantenimiento de un proyecto y de qué manera ésta complementa, mas no sustituye los trabajos profesionalizantes de la ingeniería, la topografía y la arquitectura.

La presentación del modelo y sus alcances fueron expuestos en este documento por medio de imágenes a manera de análisis de investigación para su consulta y se buscó de alguna manera compartir con la Universidad de Sonora la información obtenida.

3.6. Verificación y comprobación manual de datos

Una vez desarrollado el modelo digital del caso de estudio se procedió a hacer una verificación en campo de la precisión de los datos obtenidos. Se tomaron medidas, coordenadas y niveles del modelo digital, mismos que fueron corroborados en sitio para su comprobación y poder determinar un margen de precisión relativa.

3.7. Interpretación y conclusiones

Una vez organizada la información obtenida se expuso el producto terminado, en este caso de un modelo digital del caso de estudio, y a su vez se propuso un uso práctico, así como presentar resultados de la fiabilidad, precisión y alcance del proyecto de investigación.

4. IMPLEMENTACION DE LA METODOLOGÍA

4.1. Recursos de la investigación

De acuerdo a la información que conocemos acerca de los drones y al equipo al que se tiene acceso, se realizó un plan de vuelo adecuado que permitiera obtener información útil y precisa.

El dron seleccionado para este proyecto de investigación es de uso comercial con características técnicas avanzadas capaces de realizar vuelos de reconocimiento e inspección a una altura de 120 m, un rango de alcance horizontal aproximado de 2.5 km dentro de la mancha urbana y 7 km en campo abierto. El equipo es de la marca fabricante DJI Technology Co., un dron modelo Phantom 4 Advanced fabricado en el 2017 el cual, según la clasificación de Pari Rendon, 2017, cumple con las características técnicas para elaboración de vuelos programados para fotogrametría las cuales se pueden observar en la Tabla 7.

Tabla 4.1. Características del Phantom 4 Advanced. Fuente: www.dji.com

Fabricante:	DJI Technology Co.
Modelo:	Phantom 4 Advanced
Altura Max:	500 metros S.N.D.
Rango de señal:	7.0 km en campo 2.0 km en ciudad
Cámara:	Video 60 FPS Foto 20 MP
Sensor:	1" CMOS
Velocidad máx.:	Ascenso y descenso 6 m/s Desplazamiento 72 km/h
Tiempo de vuelo:	24 minutos
Transmisión de video:	Lightbridge (Digital avanzada)
Peso	1.37 kg



En base a las aplicaciones y usos prácticos de la fotogrametría, se determinó el tipo de información que se pretende obtener y el procedimiento para lograrlo; algo similar al estado del arte revisado en este proyecto de investigación el cual integra vuelos programados,

procesamiento por medio de softwares especializados en fotogrametría y análisis de los resultados obtenidos.

Además de la necesidad de contar con un equipo especializado para hacer los vuelos, se requirió de acceso a una plataforma de fotogrametría la cual permitiera visualizar, procesar e interpretar la información recabada por el dron. Para esto se contactó a una empresa especializada en inspección aérea con drones, ubicada en el estado de Nuevo León llamada iDrone México.

Con gran disposición, esta empresa nos concedió acceso como socio y promotor de la empresa en la región de Sonora, permitiendo también hacer uso de su plataforma para fines académicos y para la elaboración de este proyecto de investigación.

Dada la situación y las facilidades obtenidas por esta empresa mexicana de análisis e inspección aérea, el software de fotogrametría que se utilizaría es la plataforma de procesamiento y visualización para fotogrametría Sitiescan de 3D Robotics.

3D Robotics, mejor conocida como 3DR, es una empresa tecnológica desarrolladora de drones fundada en 2012 y que desde su creación se dedicó a comercializar el uso de drones inteligentes y autónomos. Para el año 2016 lanzo su propia plataforma de análisis de vuelo inteligente, de nombre Sitiescan, la cual consistía en un software de procesamiento de datos fotogramétricos el cual ganó popularidad en el mercado rápidamente por su uso tan amigable y sencillo.



Figura 4.1.- De izquierda a derecha: Logo de empresa iDrone México y logo de software de procesamiento 3DR Sitiescan. Fuente paginas oficiales: www.idrone.mx y www.3dr.com, respectivamente

En 2019, 3DR fue adquirida por la empresa Esri, uno de los líderes mundiales en el desarrollo y comercialización de software especializado en Sistemas de Información Geográfica. Permitiendo así la incorporación de los motores de procesamiento de 3DR a la gigantesca nube de información perteneciente a ArcGIS y aumentar su oferta de análisis e integración con sus diferentes plataformas (Sitio oficial de Esri, www.esri.com/announcements).

Para conocer algunos casos prácticos y tomarlos como casos de estudio, así como aprender a hacer uso de la plataforma de 3DR Sitescan se programó un viaje a la ciudad de Monterrey N.L. para llevar una breve capacitación y conocer sus aplicaciones e integración a los proyectos.

4.2. Comparativa de propuestas de estudio

Para definir el caso de estudio y llevar a cabo este proyecto de investigación con un enfoque académico, se analizaron distintas opciones con la intención de definir cuál sería la más viable y se hizo una comparativa entre ellas con puntos importantes a considerar, la cual se puede apreciar en la Tabla 4.2. Entre estos se encuentran la ubicación, dimensiones del polígono, cercanía y accesibilidad, lugares cercanos, rutas aéreas y su posible obstrucción.

Tabla 4.2. Comparativa de características de opciones de estudio. Fuente: Elaboración propia.

	CAMPUS HERMOSILLO CENTRO	ESCUELA DE AGRONOMIA
UBICACIÓN	COL. CENTRO, HERMOSILLO	KM 21 CARR. HMO- BAHÍA KINO
DIST. AL CENTRO DE LA CIUDAD	0.5 KM	22.50 KM
ACCESIBILIDAD	BLVD. INTERIORES	CARRETERA ESTATAL
RESTRICCIONES DE VUELO	NINGUNA	CERESO No. 2
No. De Departamentos	25	2
SUPERFICIE DE ESTUDIO	65.8 ha	8.5 ha

Con ayuda de la plataforma de Google Earth, se realizó una medición preliminar de ambos polígonos, como se puede observar en la Figura 4.3 y Figura 4.2 y , para dimensionar cada uno de ellos, además de revisar su ubicación y cercanía con respecto al centro de la ciudad.



Figura 4.3 Medición del polígono de la escuela de agricultura y ganadería de la Universidad de Sonora.
Fuente: Elaboración propia con Google Earth.



Figura 4.2 Polígono del campus Hermosillo Centro. Fuente: Elaboración propia con Google Earth

Al analizar los puntos proyectados en la tabla se determinó que sería más conveniente tomar como caso de estudio a la Universidad de Sonora, unidad Regional Centro ubicado en la zona centro la ciudad de Hermosillo.

4.3. Planeación y ejecución de vuelo

Esta etapa del desarrollo metodológico se considera la más importante y extensa ya que es aquí donde se tomaron en cuenta factores técnicos del equipo, ambientales, planeación, accesibilidad, etc. De ello depende que la información obtenida sea precisa. Para desarrollar esta etapa de la metodología fue conveniente elaborar una lista paso a paso del procedimiento para lograr un trabajo efectivo.

4.3.1. Reconocimiento de la zona

Primeramente, se tomó en cuenta la zona geográfica donde se localiza el caso de estudio, para el campus de la Universidad de Sonora se analizó el mapa de seguridad de vuelo, que se muestra a continuación en la Figura 4.4 (Mapa de geo zonas de vuelo seguro. Fuente: www.dji.com/flysafe/geo-map) que es proporcionado por el fabricante debido a las regularizaciones internacionales de seguridad de vuelo y es de dominio público.



Figura 4.4. Zona de vuelo seguro. Fuente: DJI Geozones

Al analizar este mapa se determinó que en la zona del Campus de la Universidad de Sonora (Unison) no existen restricciones referentes a la altura de vuelo, ni se interfiere con las trayectorias de vuelos comerciales dentro de la ciudad de Hermosillo. Lo cual nos permitió volar a cualquier altura según fuera necesario.

4.3.2. Revisión de la superficie de estudio

La extensión del terreno o superficie que se va estudió determinó puntos clave para la configuración de vuelo, tal como tiempos de vuelo y cantidad de baterías necesarias según fuera el caso del equipo con el que se contaba. Esto también determinó cuantos días nos tomaría hacer el mapeo completo.

Por medio de la plataforma de Google Earth, se logró medir el polígono de la superficie que ocupa la Unidad Centro de la Unison y conocer la problemática a la que nos enfrentaríamos, Figura 4.2.

4.3.3. Reconocimiento físico del sitio

Otro punto clave para la planificación del levantamiento fotogramétrico fue el reconocimiento físico del sitio, es decir, revisar la infraestructura existente y analizar posibles obstrucciones que pongan el riesgo la seguridad de la misma y del equipo con el que se está haciendo el vuelo, ya que este se realiza de manera autónomo y una vez en ejecución no se pueden hacer correcciones en las trayectorias de vuelo.

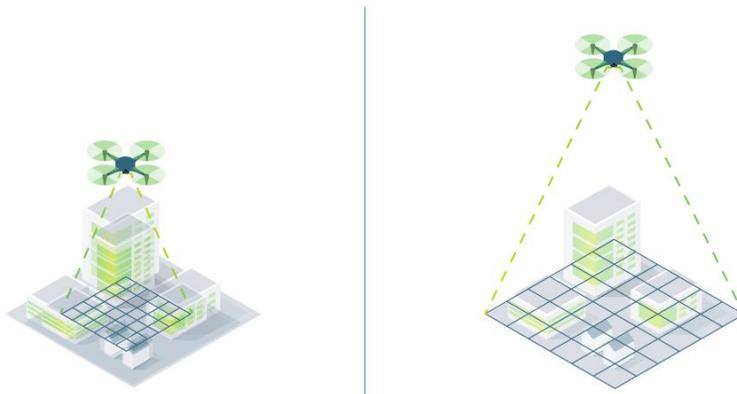


Figura 4.5. Superficie de muestreo según altura de vuelo. Fuente: Pix4D

Para el reconocimiento del sitio se realizó un vuelo preliminar en diferentes puntos del campus para ubicar las estructuras más altas distribuidas en las diferentes divisiones. Estas estructuras son principalmente antenas de comunicación, que con el mismo sensor de altimetría con el que cuenta el dron se puede obtener la altura aproximada en relación del punto de despegue. Una vez obtenida e identificada muy bien esta información se toma en cuenta como dato de suma importancia para establecer una altura mínima de vuelo.

En el vuelo preliminar realizado se identificaron los siguientes elementos como posibles riesgos y sobre los que había que tomar precauciones:



Antena 01

Ubicación: Edificio 8C – Informática

Altura: 23 m

Nivel de riesgo: Bajo

Figura 4.6. Infraestructura de telecomunicación dentro del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021.



Antena 02

Ubicación: Fuera del polígono (Norte)

Blvd. Luis encinas esquina con Blvd. Rosales

Altura: 45 m

Nivel de riesgo: Alto

Figura 4.7. Infraestructura de telecomunicación en el límite norte del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021.



Antena 03

Ubicación: Fuera del polígono (Poniente)

Blvd. Ing, Francisco Salazar

Altura: 32 m

Nivel de riesgo: Alto

Figura 4.8. Infraestructura de telecomunicación en el límite poniente del campus. Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.3.4. Sectorización del polígono

Para llevar a cabo los planes de vuelo y análisis de la información obtenida de una manera más ordenada, se sectorizó por bloques el polígono del campus de la Universidad de Sonora. El criterio que se tomó para esta sectorización fue identificar zonas que pertenecieran principalmente a una misma división y que además mantuvieran extensiones de terreno al alcance de un vuelo con el equipo que se cuenta, para mantener tiempos de vuelo no mayores a las dos horas.

De igual manera esto nos ayudó a definir los puntos de despegue que habríamos de utilizar.

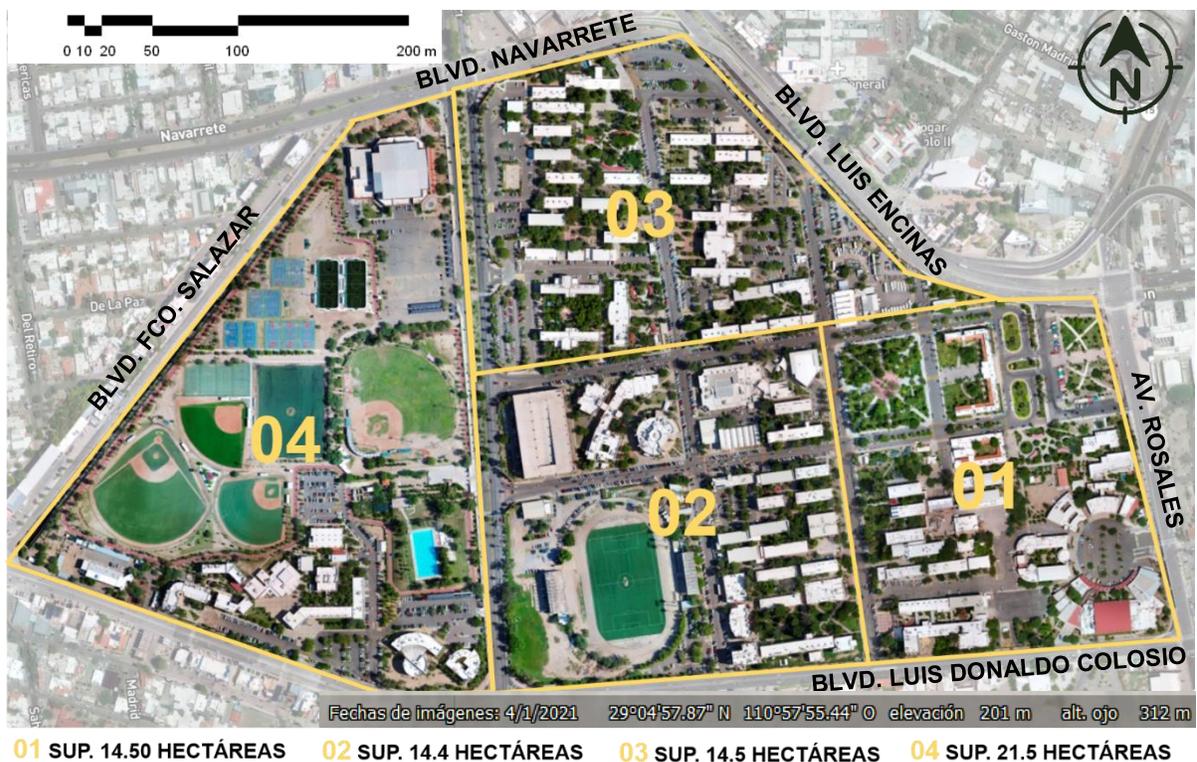


Figura 4.9. Sectorización del polígono de estudio. Fuente: Elaboración propia, 2019

4.3.5. Planes de vuelo

Una vez conocidas las características físicas del sitio es posible elaborar los planes de vuelo. Existen en la plataforma de Sitiescan siete diferentes planes de vuelo, pero para este proyecto de investigación se contemplaron solo dos de ellos que consisten en:

Mapeo de Área: Óptimo para representaciones en dos dimensiones como orto fotografías. Su principal funcionalidad es la medición de distancias horizontales y se caracteriza por la posición de la cámara a 90 grados durante el vuelo, ortogonal al plano del nivel de despegue. Su recorrido es lineal.

Mapeo entrelazado: Se utiliza para la obtención de nube de puntos y generación de superficies en tres dimensiones, proporciona imágenes en una posición angular de 35 a 60 grados dependiendo el objeto de estudio y su recorrido debe ser en diferentes direcciones.



Figura 4.10. Diagramas de planes de vuelo, de izquierda a derecha: Mapeo de área y mapeo entrelazado. Fuente: Sitiescan App

Para un que un vuelo fotogramétrico sea óptimo en su procesamiento, se recomienda un rango de traslape frontal y lateral que ronde del 60% al 70% según E. Tacuri. (Tacuri et al., 2017). Para los vuelos realizados en este proyecto de investigación se consideró el 70% de traslape frontal y el 65% de traslape lateral. Este se establece automáticamente en la plataforma de vuelo, pero para esto se toma en cuenta la altura de vuelo sobre el nivel de despegue el sensor y la distancia focal de la cámara.

Dado que las características y configuración del plan de vuelo determinan la calidad de las imágenes, traslapes, reconocimiento de luz y sombra y sobre todo un procesamiento efectivo, también era importante conseguir las condiciones favorables para realizar los vuelos como el horario y condiciones climatológicas óptimas para un vuelo seguro.

Al tener seleccionado cada uno de los planes de vuelo que se utilizaron, y como aparece en la Figura 4.11 Figura 4.12 y posteriormente en los anexos de este documento, se puede observar como el programa por sí mismo calcula el tiempo de vuelo, las baterías que requiere para cada vuelo y las imágenes que tomará, con esta información se hizo una tabla para analizar el tiempo de vuelo y con base a esto, programar un itinerario en campo.

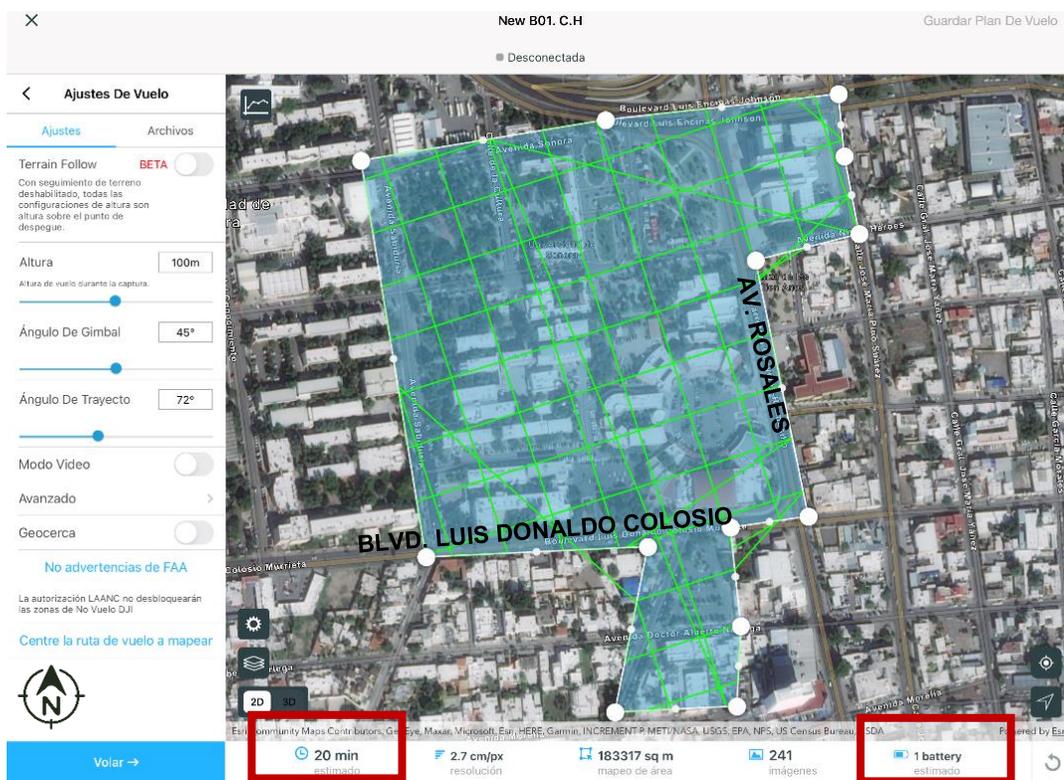


Figura 4.11. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 01. Fuente: Elaboración propia.

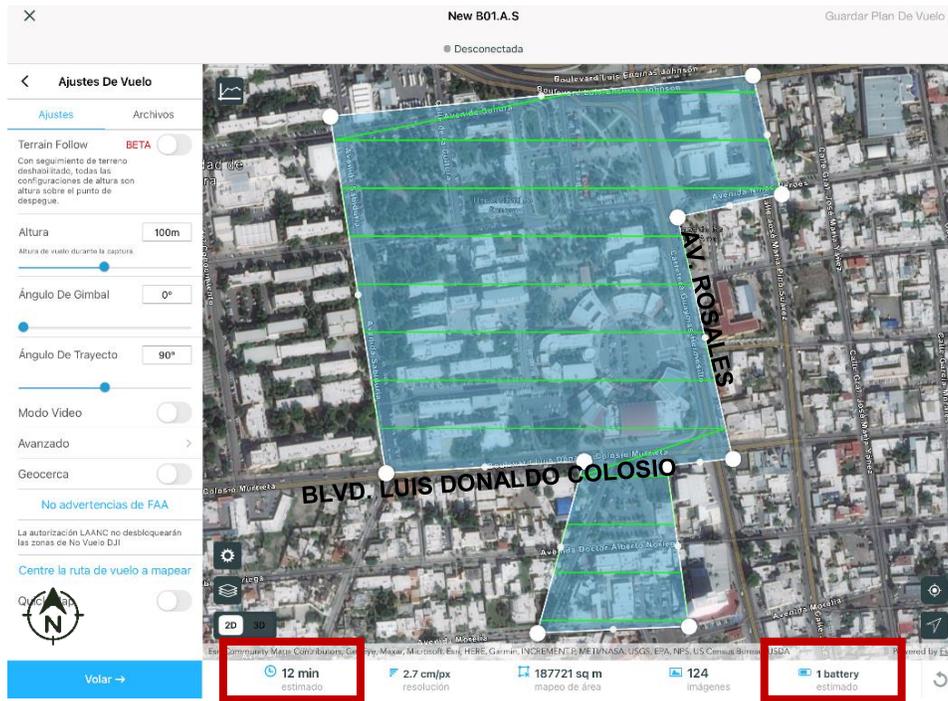


Figura 4.12. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 01. Fuente: Elaboración propia.

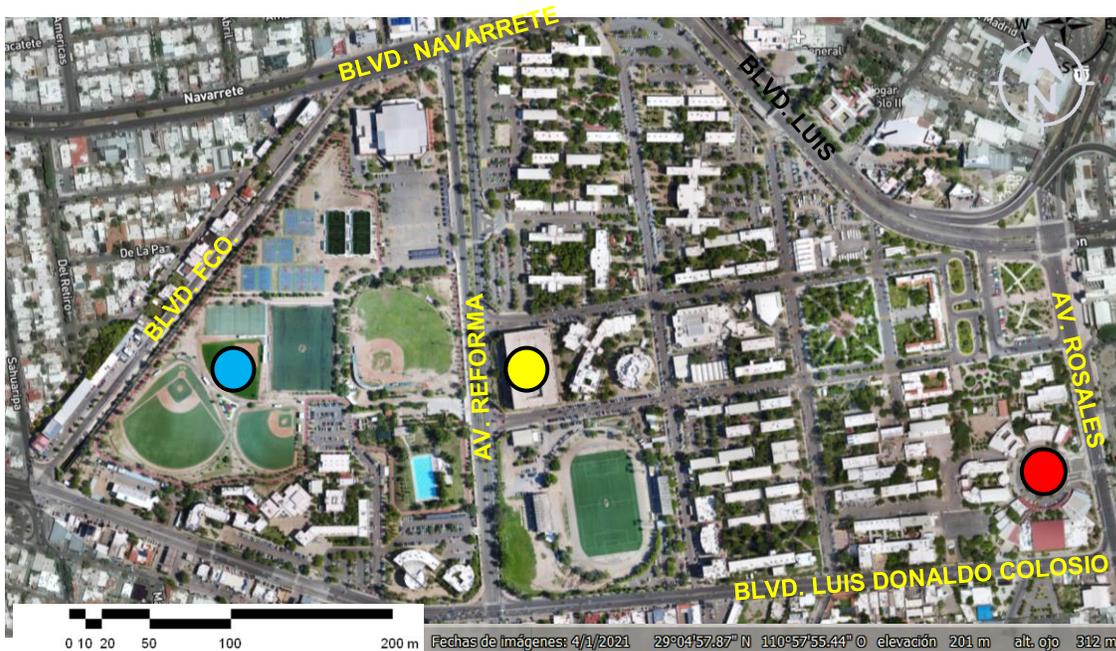
Al analizar los planes de vuelo se realizó una tabla para obtener un programa general de vuelo con una proyección del tiempo que íbamos a destinar para la actividad en campo y de esta manera proponer horario y fecha según fuera necesario, Tabla 4.3.

Tabla 4.3 Proyección de tiempos y baterías de cada vuelo. Fuente: Elaboración propia.

BLOQUE	VUELO	DURACION	BATERIAS	DIA 01	DIA 02
01	B01.A.S.	12 min	1	X	
01	B01.C.H.	20 min	2	X	
02	B02. A.S.	11 min	1	X	
02	B02. C.H.	21 min	2	X	
03	B03. A.S.	12 min	1	X	
03	B03. C.H.	19 min	1		X
04	B04. A.S.	15 min	1		X
04	B04. C.H.	32 min	2		X
TOTAL		142 min	11		

4.3.6. Selección de puntos de despegue

Para la realización de los despegues fue importante seleccionar puntos céntricos, de fácil acceso, con buena visibilidad y sin obstrucciones físicas ni electromagnéticas como vegetación y antenas. Además, estos se planearon en base a la sectorización del polígono general, Figura 4.9.



- Campo de softball, zona
- Estacionamiento
- Estacionamiento de la división de bellas artes

Figura 4.13. Plano de señalización de puntos de despegue. Fuente: Elaboración propia, 2020

Los tres puntos seleccionados se encontraban en tres diferentes sectores. Uno de ellos se encontraba en el campo de softball de la zona deportiva, otro en el quinto piso del estacionamiento multinivel (Edificio 8E) ubicado junto al estadio Miguel Castro Servín y por último en el estacionamiento del Centro de las Artes.

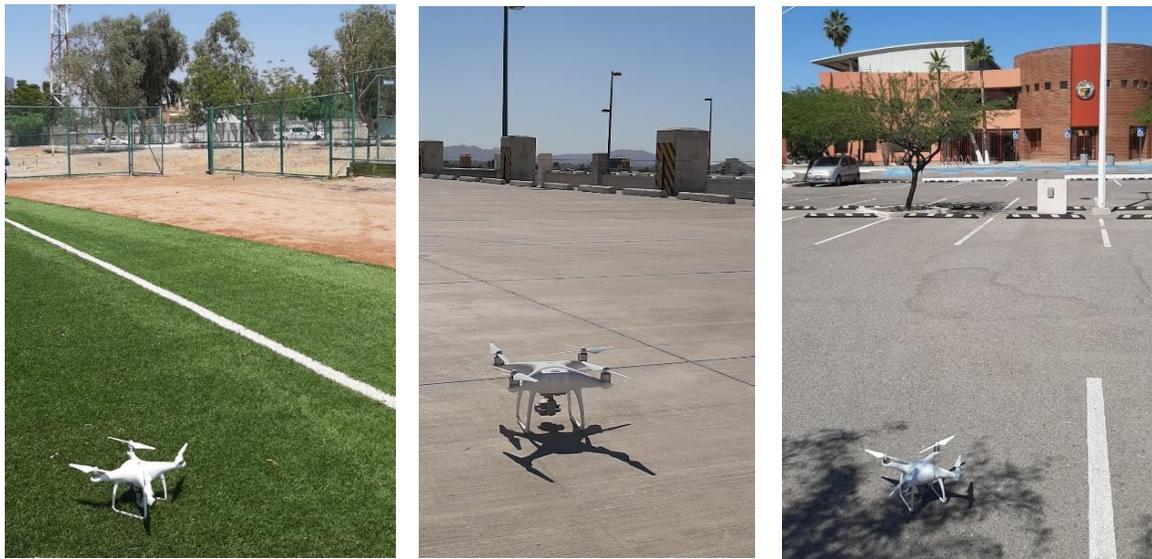


Figura 4.14. Fotografías del momento de despegue. De izquierda a derecha: Campo de Softbol, estacionamiento multinivel y estacionamiento División de Bellas Artes.

4.3.7. Equipo y configuración de vuelo

Para la realización del levantamiento fotogramétrico se preparó el equipo desde una noche antes, por lo cual se verificó la carga completa de siete baterías, control remoto y Tableta además de la configuración de los vuelos ya precargada en el equipo para su correcta ejecución sin conexión a internet.

Según sea la selección de los planes de vuelo, se procede a cargarlos en la plataforma de fotogrametría 3DR Sitiescan.

4.3.8. Vuelo

Durante la ejecución del vuelo se debe tomar en cuenta que la trayectoria del dron no se puede modificar, solamente se puede cancelar en caso de alguna emergencia y el dron regresaría al punto de despegue de manera automática.

Cuando el dron se localiza realizando el vuelo, no se pueden modificar las configuraciones y parámetros, por lo cual, para tener un vuelo seguro es importante revisar la estabilidad de la señal, la batería del control remoto constantemente y, aunque sea difícil,

se debe mantener lo mejor posible una línea de visión directa y despejada del dron para conocer la localización exacta de éste en todo momento.

Una vez concluidos los vuelos se respaldan en una memoria SD antes de cargarlos a un servidor de base de datos y borrarlos de la tableta, esto con la intención de mantener una copia de seguridad en caso de que por algún motivo se pierda la información recabada en campo.

4.4. Procesamiento de datos

Los nuevos softwares de procesamiento fotogramétrico han facilitado y automatizado los procesos y configuración de los mismos. Para el caso de la plataforma utilizada en este proyecto se toman en cuenta principalmente el sistema de coordenadas geográficas a utilizar, en caso de que se cuente con puntos de control se deben capturar sus coordenadas, la densidad de la nube de puntos que se pretende obtener, parámetros de la cámara utilizada y los formatos de salida según la información que se requiera.

Dado que se realizaron ocho vuelos distintos, dos por zona, para abarcar las casi 66 hectáreas, se decidió procesar las imágenes y unir los vuelos por sectores y posteriormente hacer uno solo de todo el conjunto, debido que al procesar la información por separado se logra obtener un modelo segmentado menos saturado. En la siguiente figura se muestra un diagrama de cómo se clasificaron los vuelos para su procesamiento y unión final, así como la cantidad de fotografías que complementan el proceso (Figura 4.15).

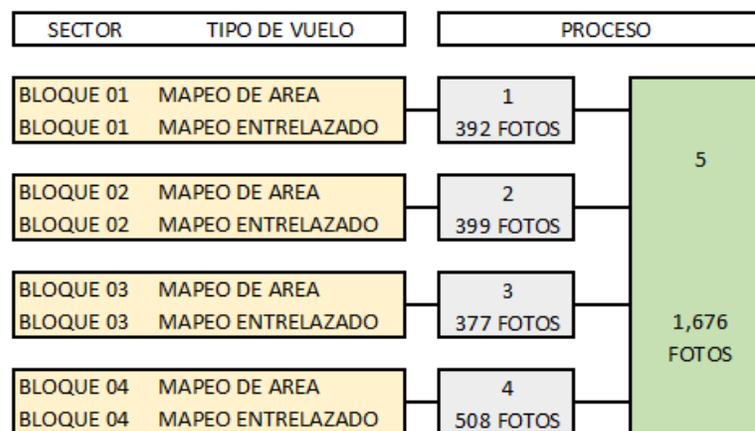


Figura 4.15. Diagrama de procesamientos realizados para obtener el modelo digital del polígono completo. Fuente: Elaboración propia.

En términos técnicos, la misma plataforma de fotogrametría muestra un reporte del vuelo realizado, en esta se observaron ciertos parámetros de calibración de imagen, puntos de coincidencia entre imágenes, rangos de traslape, varianza de geolocalización, entre otras. Este procedimiento tiene varios pasos de comprobación de metadatos que identifican a cada una de las 1,676 fotografías de este proyecto. Para esto previamente se obtiene un Modelo Digital de Superficie (DSM – *Digital Surface Model*) con el cual se identifica la composición real del elemento para posteriormente procesar la densificación de los puntos identificados en cada foto (Figura 4.16).



Figura 4.16 Ortofotografía y Modelo Digital de Superficie (MDS) previo a la densificación de imágenes.
Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitiescan

Para continuar con el procesamiento, el programa detecta la posición de la cámara en cada fotografía tomada con relación a las demás (Figura 4.18), su altura, orientación e inclinación del lente. De esta manera se buscan identificar los puntos clave de cada imagen para poder unirlos a las demás. Según el reporte de vuelo obtenido se cuenta con un promedio de puntos clave de 41,742 por imagen.

Al detectar los puntos clave en cada imagen, el programa entrelaza todas estas coincidencias, y como se puede ver en la Figura 4.17 se hace un conteo de puntos clave detectados por zona.

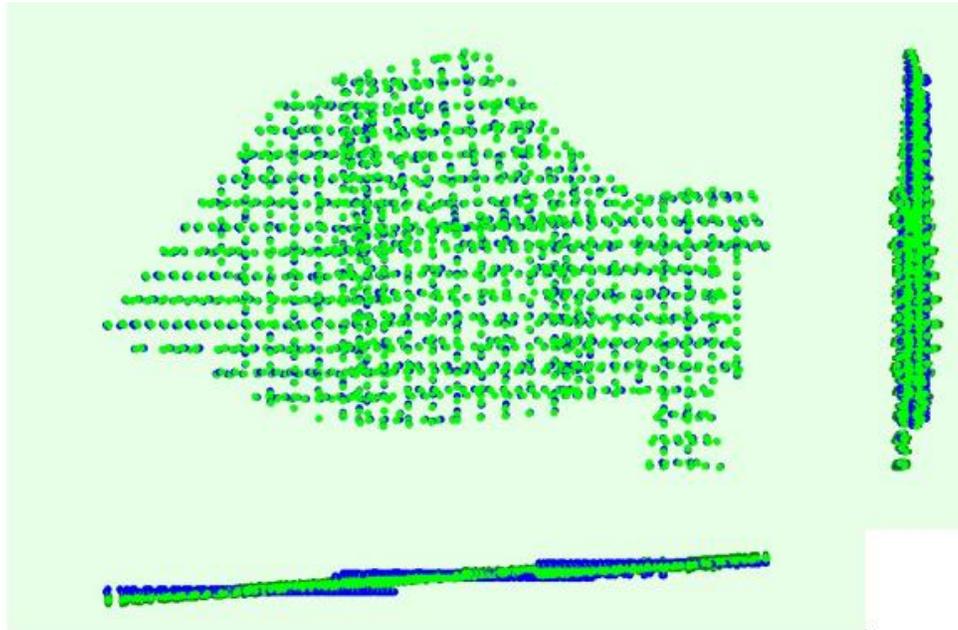


Figura 4.18 Ubicación de fotos dentro del polígono. Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitescan

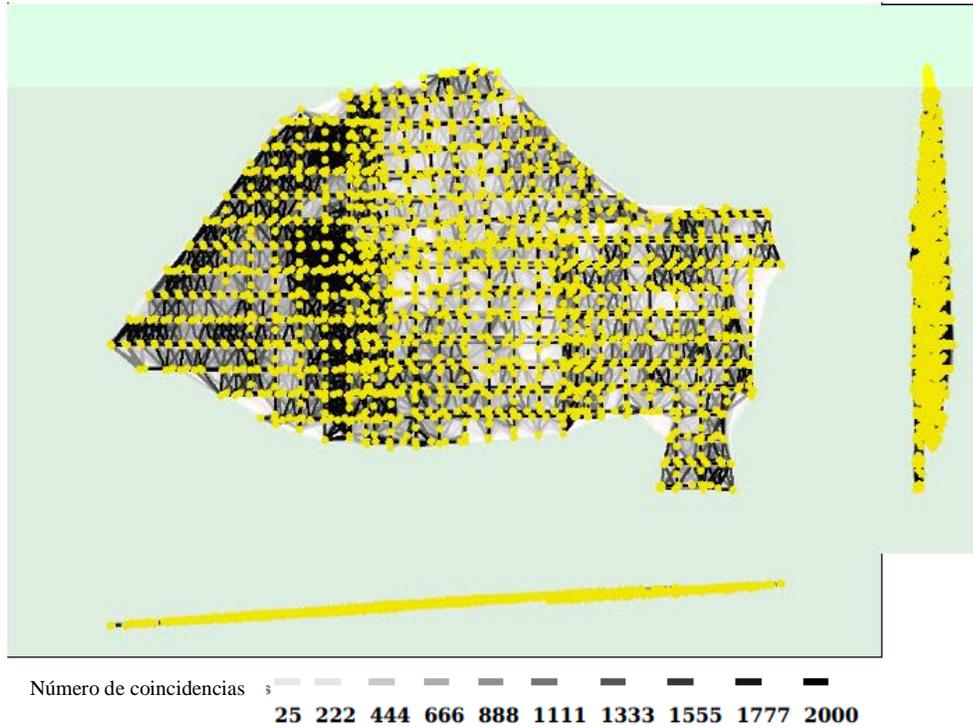


Figura 4.17 Mapa de coincidencia de puntos clave detectados en las imágenes. Fuente: Reporte de vuelo 3DR Sitescan.

Como se puede observar en la Tabla 4.4, al final del reporte se emite un resumen general del procedimiento y los aspectos generales, como calidad de imagen, duración en la generación de los modelos digitales, etc.

Tabla 4.4 Resumen de procesamiento de vuelo. Fuente: Traducido de reporte de vuelo 3DR Sitscan.

RESOLUCION Del MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE Y ORTOFOTOGRAFIA	1 X GSD (3.92 [cm/pixel])
FILTROS APLICADOS AL MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE	FILTRADO DE RUIDO: SI SUAVIZADO DE SUPERFICIE: SI, TIPO: AFILADO
RASTER DE MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE	GENERADO: SI MÉTODO: PONDERACIÓN DE DISTANCIA INVERSA FUSION DE SUPERFICIES: SI
ORTOFOTOGRAFÍA	GENERADO: SI FUSION DE SUPERFICIES: SI GEOREFERENCIA .TIFF SIN TRANSPARENCIA: NO SUPERFICIE Y FORMATO .KML DE GOOGLE MAPS : NO
RASTER DE MODELO DIGITAL DE TERRENO	GENERADO: SI FUSION DE SUPERFICIES: SI
RESOLUCIÓN DE MODELO DIGITAL DE TERRENO	5 X GSD (3.92 [cm/pixel])
TIEMPO DE GENERACIÓN DE MODELO DIGITAL DE SUPERFICIE	24m:50s
TIEMPO DE GENERACIÓN DE ORTOFOTOGRAFÍA	01h:25m:23s
TIEMPO DE GENERACION DE MODELO DIGITAL DE TERRENO	07m:28s
TIEMPO DE GENERACIÓN DE CURVAS DE NIVEL	00s
TIEMPO DE GENERACIÓN DE MAPA DE REFLECTANCIA	00s
TIEMPO DE GENERACIÓN DE MAPA DE ÍNDICE	00s

4.5. Análisis de datos procesados

El acceso a la plataforma de procesamiento fotogramétrico con la que se cuenta brinda una interfaz de visualización muy amigable la cual permite hacer un análisis de la información procesada directamente en la web o, en caso de que se requiera, importarla a algún sistema de información geográfico o cualquier programa de ingeniería y arquitectura de Autodesk.

El análisis técnico que brinda la plataforma de 3DR Sitescan resulta útil para ingenieros o arquitectos, sin embargo, como la finalidad de este proyecto de investigación es presentarlo de manera pública para cualquier interesado, se procuró ordenar la información de la manera más clara y sencilla posible.

De momento, los servicios de fotografía satelital que brinda la plataforma de Google Earth, no permite realizar una observación detallada del entorno urbano en nuestra ciudad. En algunas zonas como E.E.U.U. manejan resolución de hasta 15 cm p/pixel, que, aunque es impresionante por tratarse de una imagen tomada desde un satélite, con el uso de la fotografía aérea mediante drones se logran obtener mejores resultados.

Según el portal de EOS (Sistema de observación de la Tierra, por sus siglas en inglés), uno de los proveedores de servicios de imágenes satelitales más populares en América, la resolución de las imágenes satelitales se clasifica de la siguiente manera:

Baja resolución: más de 60 metros p/pixel

Resolución media: entre 10- 30 metros p/pixel

Alta resolución: 30 cm – 5 m p/pixel

Con el levantamiento fotogramétrico realizado en esta investigación a una altura de 100 m sobre el nivel de despegue es posible analizar detalladamente las imágenes tomadas alcanzando una resolución de 2.7 cm por pixel, por lo tanto, se generarían imágenes de alta resolución.

En la Figura 4.19 se muestra la ortofotografía procesada con los vuelos realizados en la Universidad de Sonora y a su vez, se muestra una imagen satelital obtenida por medio de la plataforma de Google Earth.

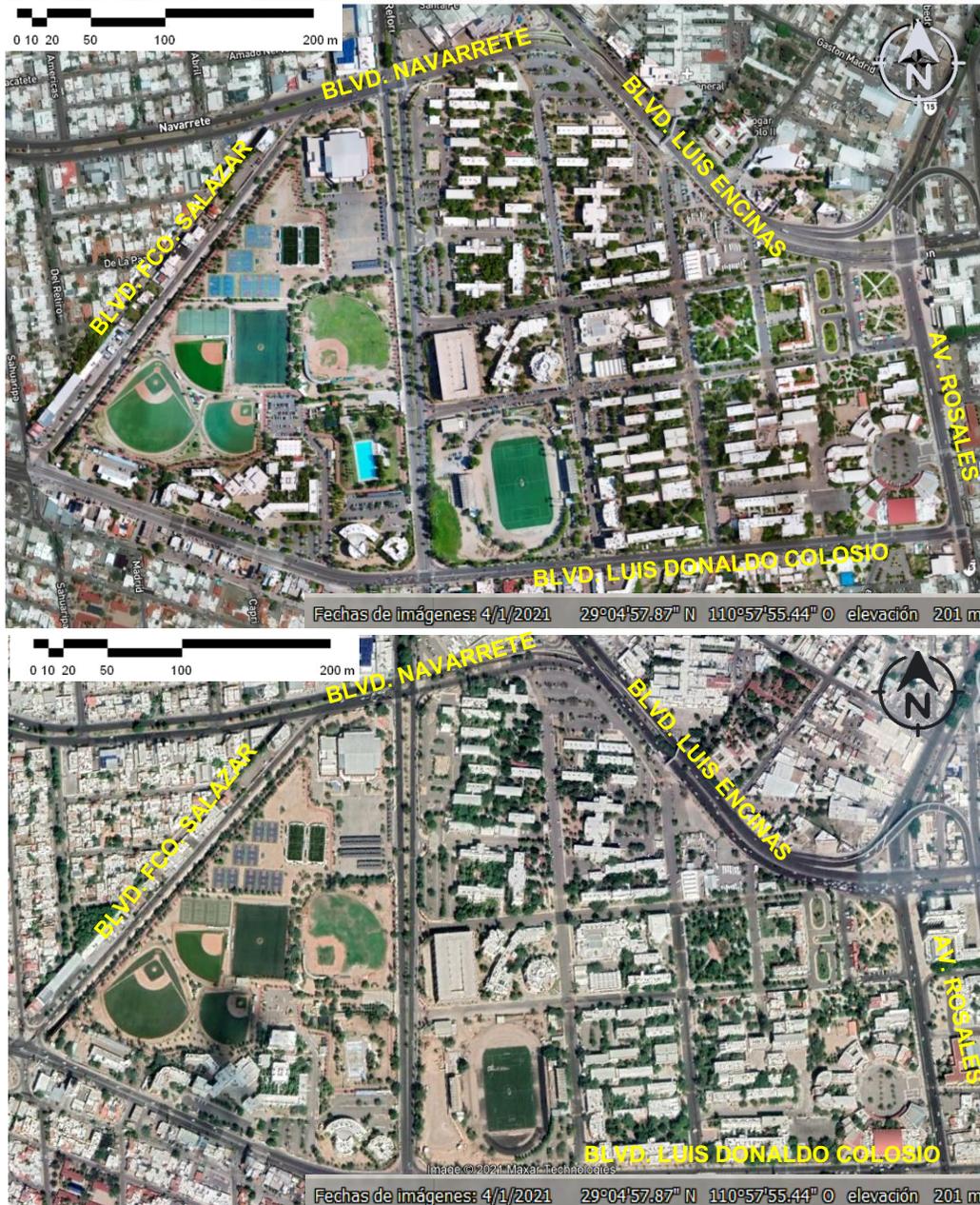


Figura 4.19. Comparación visual de Ortofotografías. Parte superior elaboración propia con dron. Inferior obtenida con satélite. Fuente: Google Earth Pro.

En la siguiente figura, muestran varios acercamientos para apreciar la diferencia en la resolución de las imágenes obtenidas con el dron en comparación de las que nos proporciona la plataforma de Google Earth.

Esta herramienta nos permite hacer mediciones lineales en 2D las cuales posteriormente serán comprobadas en campo de manera manual (Figura 4.20).



Figura 4.20. Comparación de imágenes aéreas. Columna izquierda imagen Google Earth, columna derecha imagen dron.
Fuente: Elaboración propia

Además de obtener una imagen general en 2D del campus completo de la Unison, el levantamiento fotogramétrico realizado permitió realizar un modelo 3D tipo malla y una nube de puntos. La visualización dentro del portal de 3DR Sitescan permitió también hacer análisis, mediciones y cuantificaciones físicas reales de la infraestructura en 3D (Figura 46,47,48 y 49)



Figura 4.22. Visualización del Conjunto, lado Sur- este a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia



Figura 4.21. Visualización del Conjunto, lado Nor-poniente a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia



Figura 4.23. Visualización del estacionamiento de la división de artes a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia



Figura 4.24. Visualización del edificio de rectoría a manera de nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

Para poner en práctica el análisis del modelo digital del campus se propusieron algunas situaciones hipotéticas con la intención de poner en práctica y poder demostrar y /o justificar su precisión, su uso e integración por parte de la Dirección de Infraestructura de la Unison, así como su uso con fines educativos.

En la Figura 4.25 y Figura 4.26 se aprecian algunas mediciones que se hicieron directamente en el modelo digital en 2D y 3D para posteriormente comprobarlas en campo. Durante esta medición es importante seleccionar bien los puntos de medición ya que como se trabaja con pixeles, esto puede influir en la precisión del método a utilizar.



Figura 4.25. Medición de área y perímetro de estacionamiento multinivel de la Universidad de sonora en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.26. Medición de perímetro de estacionamiento multinivel de la Universidad de sonora en orto fotografía. Fuente: Elaboración propia.

Durante el análisis de la zona de estudio se pudo observar el avance en las mejoras de la infraestructura del campus y, en contraparte, el deterioro de esta. El abandono y falta de mantenimiento puede atribuirse a la contingencia sanitaria debido a la pandemia del COVID-19, este detrimento puede ser fácilmente percibido en sectores como el ala poniente del estadio Miguel Castro Servín el cual recibió mantenimiento en sus áreas de pasto sintético y el edificio 12A y 12C del departamento de Ingeniería Civil y Minas con los trabajos de construcción de puentes de conexión, elevador y cubo de escaleras, entre otras áreas deportivas. Se aprecia la comparativa en las siguientes imágenes.



Figura 4.27. Comparativa de las condiciones físicas del ala poniente del estadio Miguel Castro Servín. Arriba con fecha del 20 de agosto de 2019 y abajo con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.

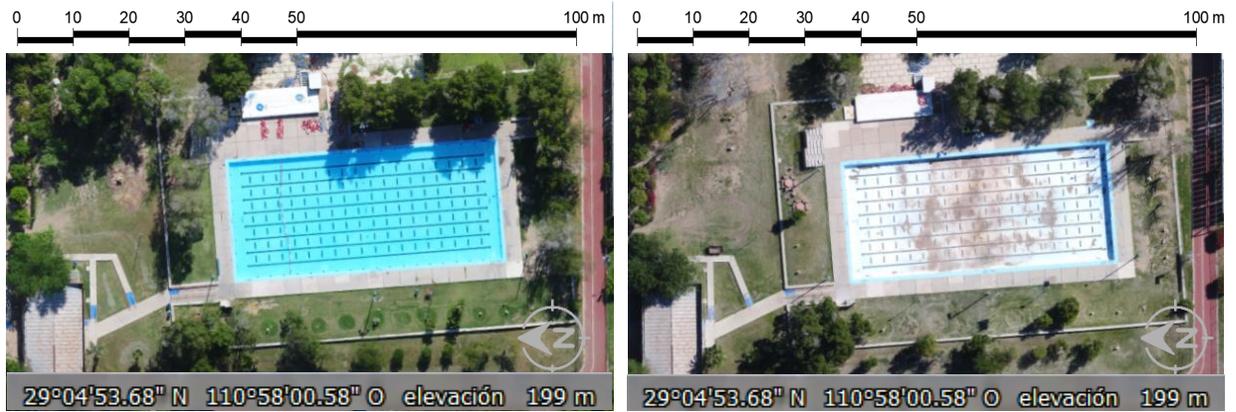


Figura 4.29. Comparativa de las condiciones físicas de la alberca de la UNISON. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.

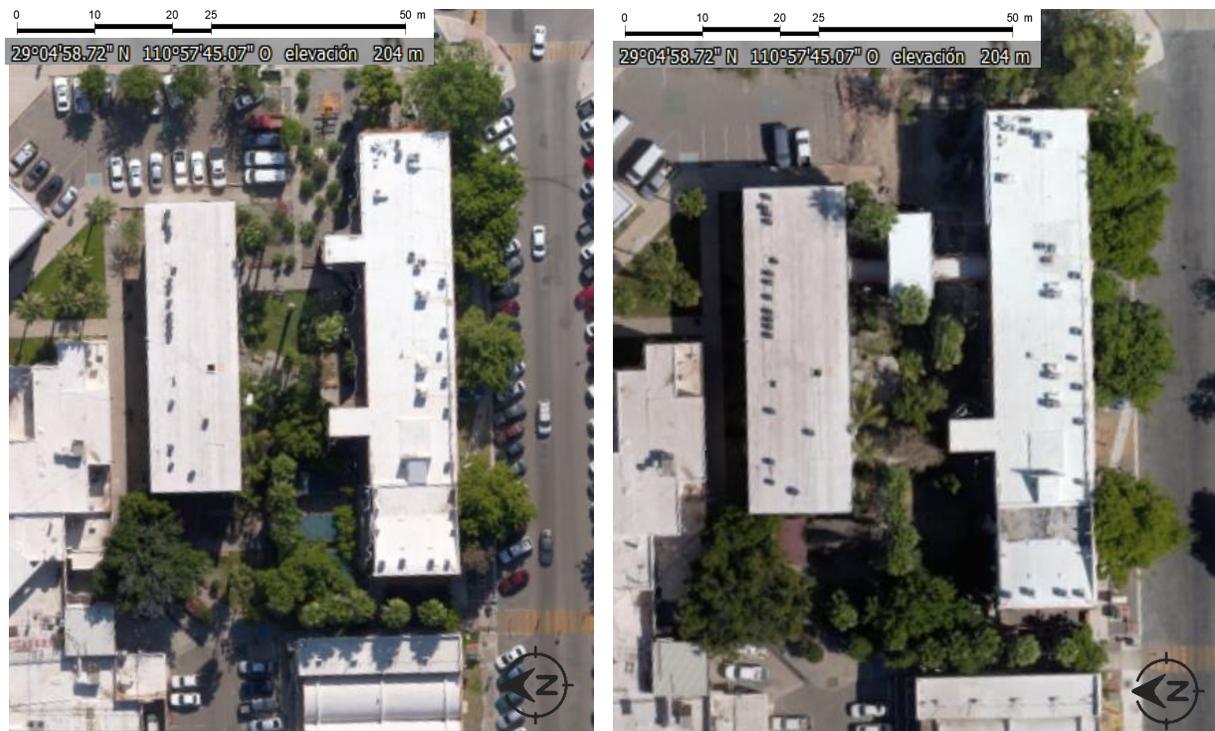


Figura 4.28. Comparativa de las modificaciones al edificio 12A y 12C de ingeniería civil y minas. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.

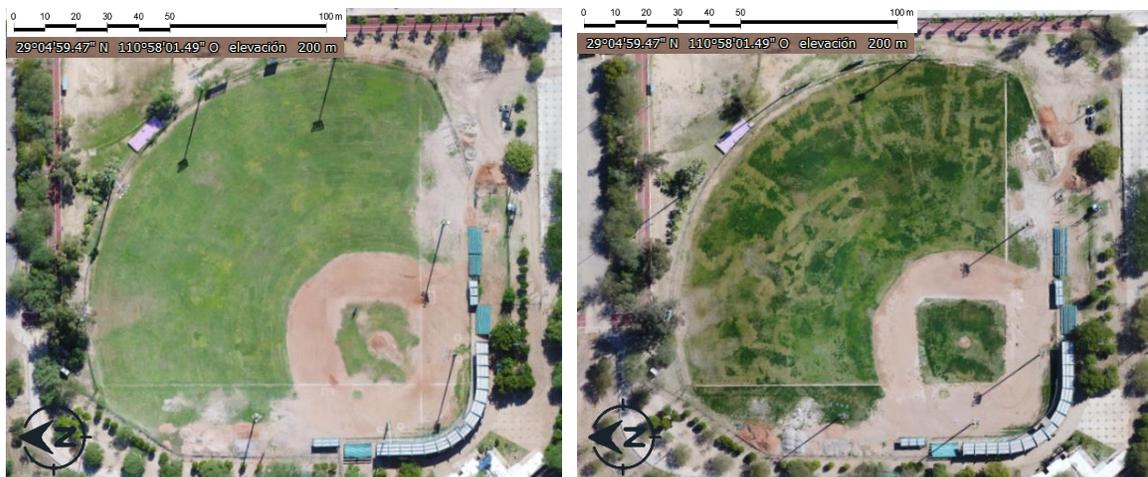


Figura 4.30. Comparativa de las condiciones físicas del estadio de beisbol y su deterioro en el tiempo. A la izquierda con fecha del 20 de agosto de 2019 y a la derecha con fecha del 28 de febrero de 2021. Fuente: Elaboración propia.

4.6. Comprobación de datos en sitio

Para verificar los datos obtenidos del modelo digital se procedió a hacer una comparativa en campo de manera manual y así obtener un rango de precisión conforme a la información obtenida con las tomas aéreas y la que se midió físicamente.

Los puntos a comprar fueron seleccionados a criterio tomando en cuenta la visibilidad dentro del modelo digital y sobre todo la accesibilidad para las personas que realizarían las mediciones. Dentro de este criterio se consideraron distancias horizontales menores a los cinco metros y mayores a los veinte, distancias verticales menores a los 3 metros y mayores a los seis.

4.6.1. Validación de modelo digital de superficie (MDS)

Los puntos de control o GCPs (por sus siglas en inglés) son puntos de apoyo de los cuales se conocen sus coordenadas geográficas y permiten georreferenciar con exactitud un modelo fotogramétrico, estos deben ser observables dentro del modelo y suelen utilizarse para lograr un mejor entendimiento entre la posición del modelo con respecto a un sistema de coordenadas.

Aunque no fue el caso en este proyecto, por cuestiones ajenas, es importante tomar en cuenta que para lograr una mejor georreferenciación es necesario integrar al producto procesado, una cantidad suficiente de puntos de control (GCPs– *Ground Control Points*) según la extensión de la superficie que ha sido estudiada. Esto con la finalidad de mejorar la precisión absoluta del proyecto y de esta manera aumentar la precisión de las mediciones en sitio, sobre todo mediciones sobre el eje z, así como la obtención de volúmenes dentro del modelo digital de elevaciones.

4.6.2. Mediciones horizontales

Para determinar la precisión del modelo para distancias menores a los cinco metros se tomaron 3 muestras en sitio con diferentes características, texturas y exposición a la luz. Estas se hicieron, como se muestra en las siguientes figuras, en el estacionamiento multinivel 8E, en la cancha de basquetbol y en el estacionamiento de la división de artes.

Primeramente, se tomó una medida en el modelo digital correspondiente al largo de la flecha utilizada como señalización en el suelo del estacionamiento multinivel, dando una distancia de 1.79 m. A su vez, se ubicó en sitio exactamente la misma flecha y se obtuvo una medición similar de 1.80 m.

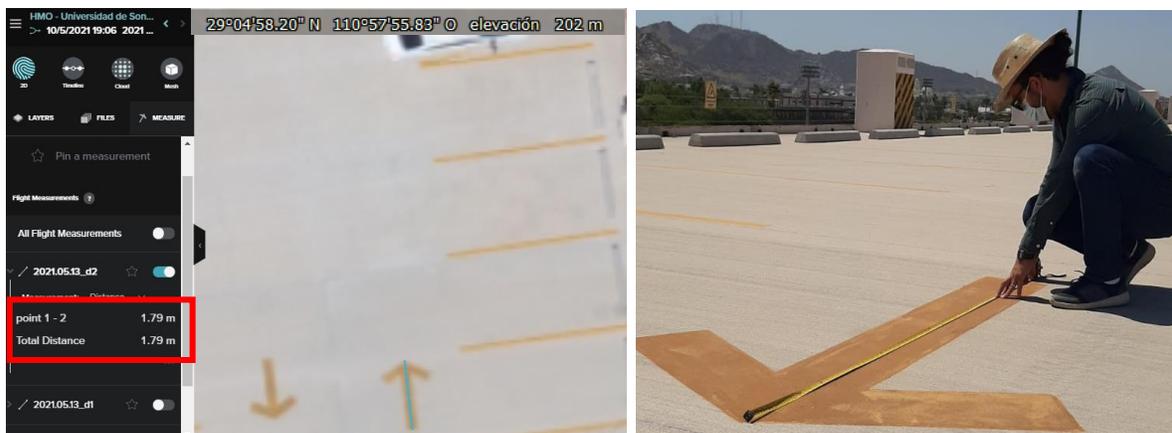


Figura 4.31. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento multinivel 8E. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia

Como segunda muestra de medición menor de 5 m, se tomó en cuenta el diámetro del área central de una cancha de basquetbol ubicada en la zona deportiva. En el modelo digital se marcó una distancia de 3.56 m y en sitio nos dio 3.57 m de largo, Figura 4.32.



Figura 4.32. Comparativa de mediciones lineales en cancha de basquetbol. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.

Como tercer muestreo de distancias cortas se hizo una medición en el estacionamiento del Centro de las Artes y como ejemplo se tomó una rampa para personas con alguna discapacidad. La muestra en el modelo digital dio 4.84 m y en sitio nos dio exactamente lo mismo, 4.84 m. Figura 4.33.



Figura 4.33. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento de bellas artes. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.

Al mismo tiempo se hicieron mediciones en las mismas zonas tomando en cuenta distancias mayores a los 20 metros para determinar el rango de precisión que presentaban. Estas se hicieron con la ayuda de una colega arquitecta y una cinta métrica enrollable.

En el estacionamiento multinivel se tomó como muestra uno de los lados cortos del polígono del estacionamiento multinivel. Para esto se utilizó una cinta de 30 m de largo para para cuidar la precisión y la tensión de la misma se hizo en 4 partes.

De este modo se puede comparar la medición en el modelo digital que fue de 56.11 m contra la que se hizo en sitio que fue de 56.22 m, Figura 4.34.

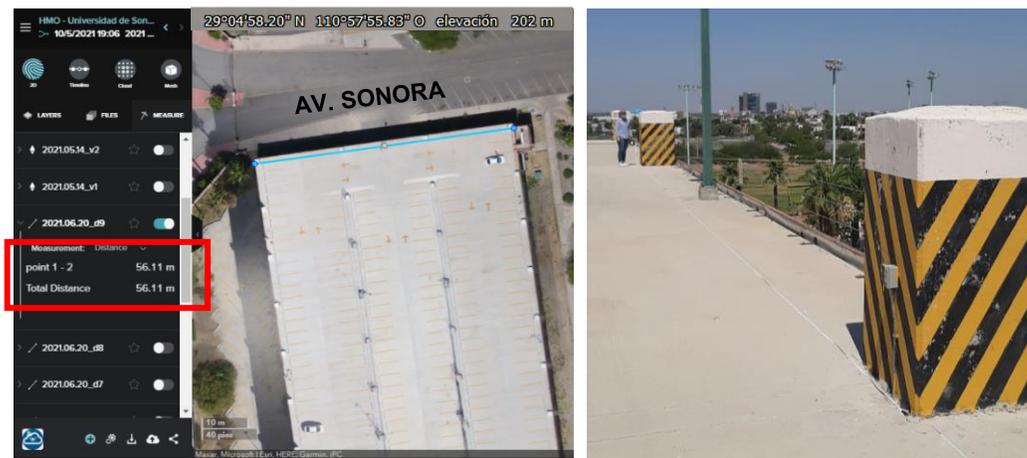


Figura 4.34. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento Multinivel 8E. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración

La segunda muestra de medición lineal de más de 20 m en sitio, Figura 4.35, se realizó en el campo de softbol. Este presentó una diferencia brevemente más notable de 16 cm teniendo el modelo digital 41.38 m contra los 41.54 m en sitio.

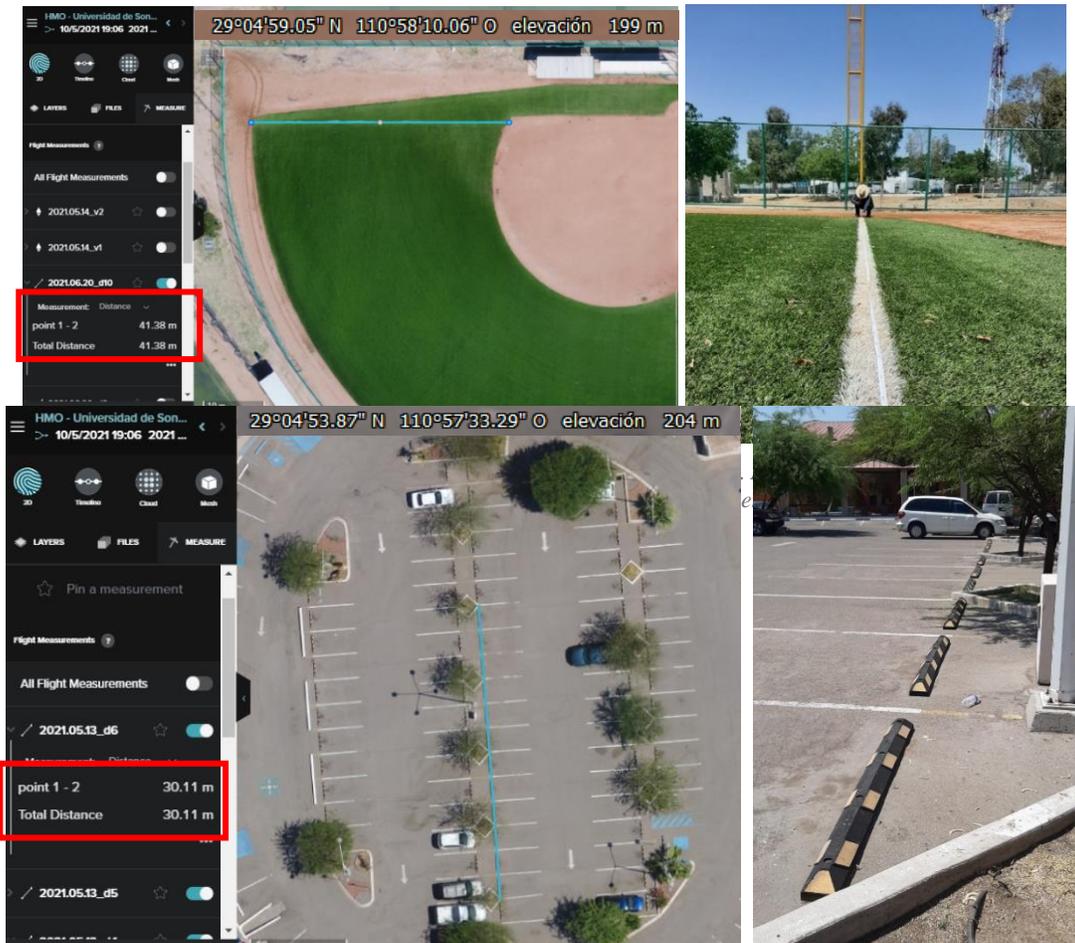


Figura 4.36. Comparativa de mediciones lineales en estacionamiento de artes. A la izquierda la imagen procesada con fotogrametría y a la derecha la medición en campo. Fuente: Elaboración propia.

En el estacionamiento del Centro de las Artes se hizo la tercera muestra de medición de más de 20 m para poder determinar el factor de precisión relativa que se busca. En este caso se obtuvo también una diferencia parecida a los ejercicios anteriores. La distancia seleccionada fue de un punto A a un punto B aleatorio el cual arrojó los siguientes resultados. En el modelo digital la distancia medida fue de 30.11 m y en sitio se obtuvo un total de 30 m.

4.6.3. Medición de alturas

Para realizar las mediciones en alturas desde la plataforma de 3DR Sitescan se utilizó la modalidad de nube de puntos. Esta permite moverse en cualquier sentido para seleccionar los puntos de interés. Durante esta medición en sitio se usó cinta métrica de 8 y 30 m de longitud.

La medición realizada en el Gimnasio Universitario permitió corroborar lo que se puede observar en las mediciones horizontales menores a 5 m. En estas, la precisión se mantiene al margen de 0.5 y 1 cm de diferencia. En este caso, el modelo digital arrojó una altura de $h_1 = 4.32$ m del piso a la parte baja de faldón del edificio 7M y $h_2 = 4.33$ m del jardín a la plataforma de acceso de las escalinatas del gimnasio, Figura 4.37.

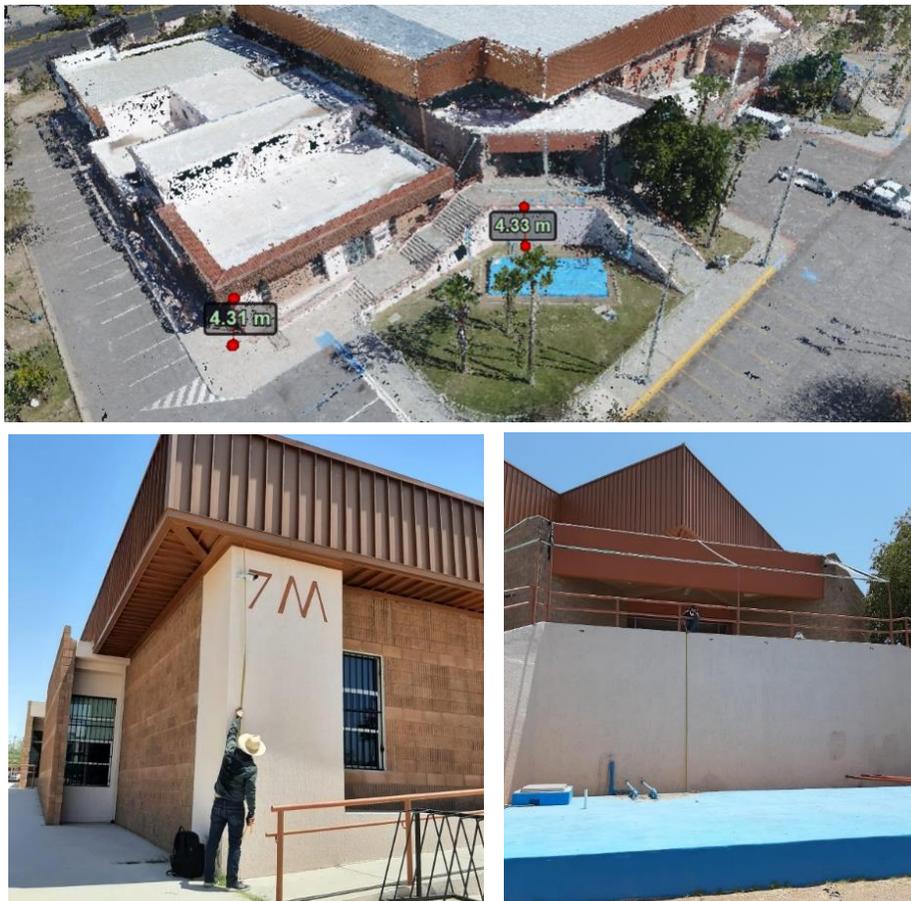


Figura 4.37. Medición en nube de puntos y comprobación en sitio. Fuente: Elaboración propia.

En sitio observamos mediciones casi iguales, con diferencias de uno o dos cm teniendo así una altura real de $h_1 = 4.32$ m y $h_2 = 4.35$ m respectivamente.

De igual manera en el estacionamiento multinivel se realizaron dos mediciones para poder obtener diferentes muestras. Para este caso se midió la distancia entre el nivel de piso terminado del tercer y cuarto nivel y la distancia entre el nivel de piso terminado de la planta baja y el cuarto nivel. Como podemos ver en la Figura 4.38, la medición dentro del modelo digital nos dio 3.36 m y 14.09 m.

La medición en sitio que se realizó arrojó medidas muy similares, en la primera se registró 3.38 m y 14.15 m en la segunda.



Figura 4.38. Medición digital y comprobación en sitio de distancias verticales en estacionamiento multinivel. Fuente: Elaboración propia.

El tercer sitio que se utilizó para la comprobación de alturas fue en el edificio 3-N de la escuela de música. Para esto se tomó una medida general en una de sus esquinas exteriores. La medición obtenida en el modelo digital fue de 4.48 m y la comprobada en sitio de 4.52 m.



Figura 4.39. Medición de altura en edificio 3-N de Música en modelo digital y comprobación en sitio. Fuente: Elaboración propia.

4.6.4. Factor de precisión

Tomando en cuenta las diferencias obtenidas en las medidas realizadas dentro del modelo digital y la comprobación en sitio podemos obtener un factor de precisión relativa el cual se deberá tomar en cuenta para cualquier ejercicio de medición dentro del modelo digital para futuras referencias.

En la Tabla 4.5 podemos observar las mediciones mencionadas anteriormente y sus diferencias Para esto tomamos en cuenta una variación total en la medida digital y la medida real en sitio para poder obtener un factor de variación por metro y un promedio. En este caso obtuvimos un promedio de entre 0.28 y 0.47 cm por metro en mediciones de entre 1 y 56 m de longitud.

Tabla 4.5. Relación y factor de precisión de mediciones realizadas en el modelo digital y en sitio. Fuente: Elaboración propia.

Medición en distancias horizontales menores a 5 m							
No.	Lugar de medición		Sitio	Modelo Digital	Variación total	Variación p/m	Promedio
1	Estacionamiento multinivel	Longitud de flecha	1.8 m	1.79 m	0.01 m	0.56 cm	0.28
2	Cancha de Basquetbol	Dímetro de marca central	3.57 m	3.56 m	0.01 m	0.28 cm	
3	Estacionamiento Centro de las Artes	Longitud de cajón	4.84 m	4.84 m	0 m	0.00 cm	

Medición en distancias horizontales mayores a 20 m							
No.	Lugar de medición		Sitio	Modelo Digital	Variación total	Variación p/m	Promedio
1	Estacionamiento multinivel	Longitud del lado corto	56.22 m	56.11 m	0.11 m	0.20 cm	0.32
2	Campo de Softball	Long. De línea lateral	41.54 m	41.38 m	0.16 m	0.39 cm	
3	Estacionamiento Centro de las Artes	Long. De puntos aleatorios	30 m	30.11 m	0.11 m	0.37 cm	

Medición en alturas							
No.	Lugar de medición		Sitio	Modelo Digital	Variación total	Variación p/m	Promedio
1	Gimnasio Universitario	Altura del edificio 7-M	4.32 m	4.32 m	0 m	0.00 cm	0.47
		Altura de plataforma acceso	4.35 m	4.33 m	0.02 m	0.46 cm	
2	Estacionamiento Multinivel	Altura entre Nivel 3 y 4.	3.38 m	3.36 m	0.02 m	0.59 cm	
		Altura total de PB a nivel 4.	14.15 m	14.09 m	0.06 m	0.42 cm	
3	Edificio de Música 3-N	Altura muro	4.52 m	4.48 m	0.04 m	0.88 cm	

4.7. Interpretación y casos prácticos

El modelo digital realizado en este proyecto puede tener “n” cantidad de funciones prácticas, estas dependen de la necesidad, situación o problemática con la que el usuario se presente. El uso de este modelo y su interpretación se desarrolla a criterio, pero para justificar su uso práctico, se plantearon escenarios donde pudiera utilizarse.

4.7.1. Evaluación del deterioro y condiciones de las áreas verdes, 2019 – 2021

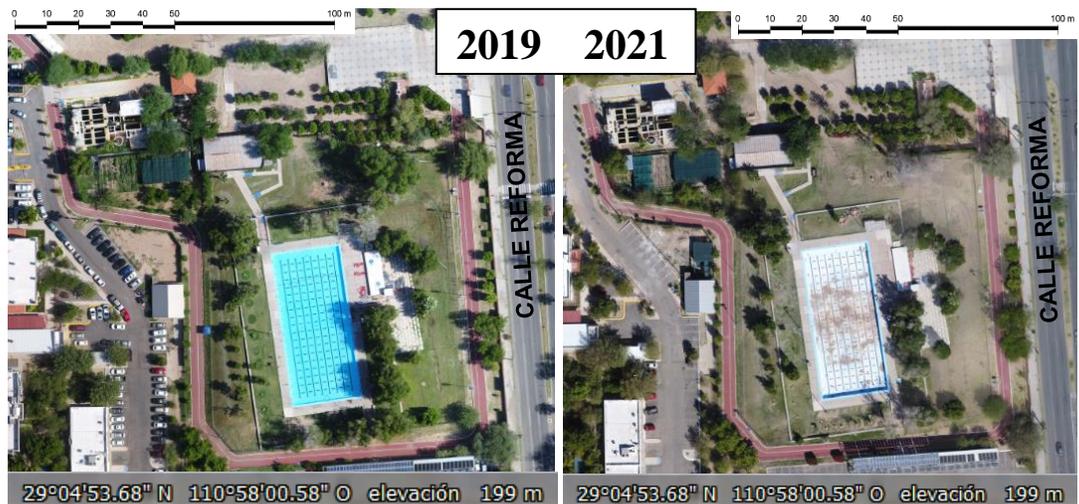


Figura 4.41. Imágenes comparativas de las condiciones del área de alberca en relación al año 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia.

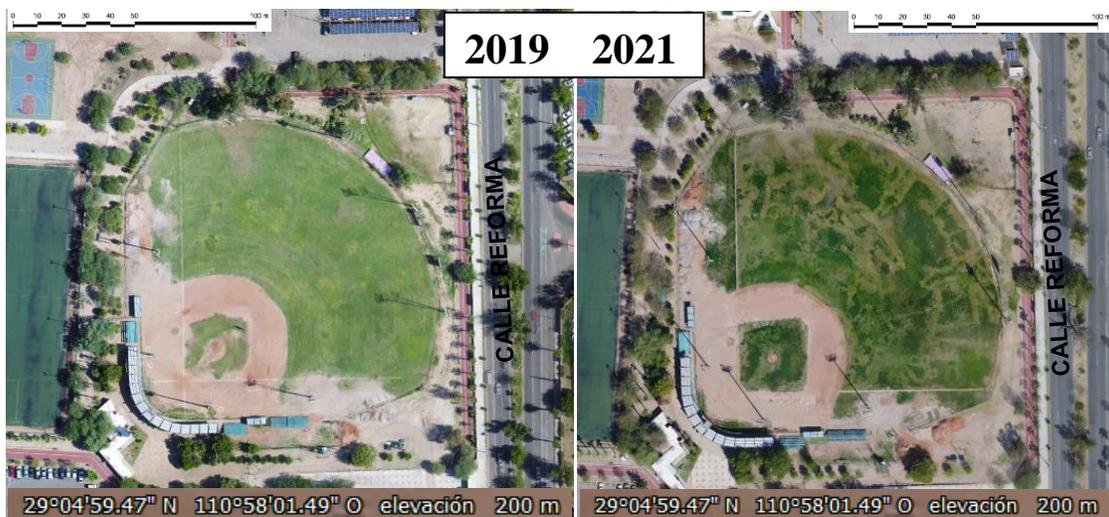


Figura 4.40. Imágenes comparativas de las condiciones del campo de beisbol en relación al año 2019 y 2021. Fuente: Elaboración propia.

4.7.2. Medición de superficie de captación solar con paneles solares en estacionamiento del Gimnasio Universitario.

Para realizar una medición rápida se utilizaron dos modelos de visualización, orto fotografía y nube de puntos. La primera fue para identificar cuantos módulos y de que tipo eran los que se encontraban dentro del área de estudio. Una vez detectados se marcaron con números para identificarlos. Después en la nube de puntos se hizo el trazo de los polígonos para obtener medidas y áreas. Con esta información sacamos la relación de superficie en metros cuadrados de producción de energía solar tanto para estudio de capacidad y generación de energía, mantenimiento y planes de inversión a futuro.

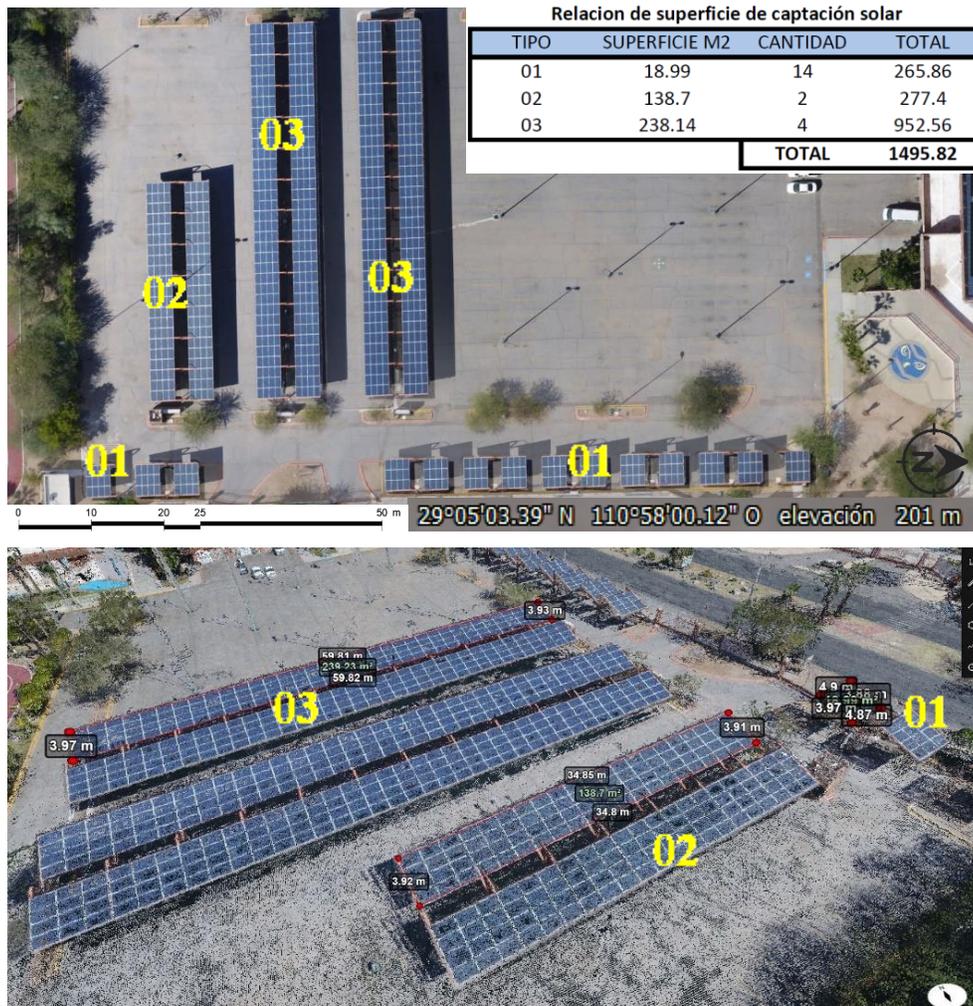


Figura 4.42. Orto fotografía y nube de puntos para identificación y medición de módulos. Fuente: Elaboración propia.

4.7.3. Capacidad de llenado de alberca olímpica

Dentro del modelo digital procesado correspondiente al 2021, y aprovechando que la alberca olímpica se encuentra vacía, se realizó un trazo del polígono en 3D para obtener el perímetro, el área y la profundidad por medio de la herramienta de medición lineal.

Par este caso, como podemos ver en la Figura 4.43, tomamos en cuenta que la alberca tiene una superficie de 1,098.94 m² y una profundidad de 1.44 m se obtuvo un volumen de 1,582.47 m³ de agua.



Figura 4.43. Visualización y medición de alberca olímpica en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia

Dentro de la plataforma de visualización también se tiene la herramienta de análisis de volumetría por medio de corte y relleno en la cual se selecciona el área deseada en planta y el programa automáticamente señala la volumetría de relleno. Para este caso nos da un total de 1,585.51 m³ de llenado.

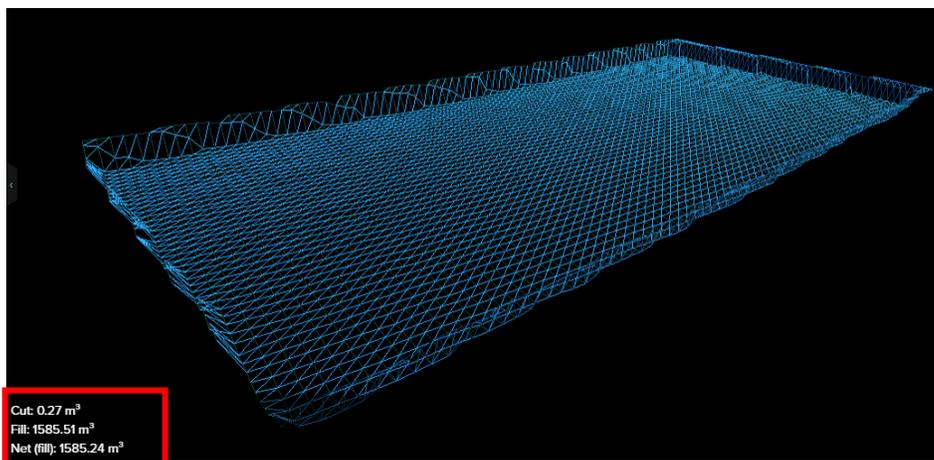


Figura 4.44. Visualización de volumetría de alberca olímpica para análisis de capacidad volumétrica. Fuente: Elaboración propia.

4.7.4. Conteo de equipos de aire acondicionado central en el edificio de rectoría

Para este ejercicio se utilizó la visualización en plano orto foto y la herramienta de contador de elementos. Para esta solamente se hizo una inspección visual sobre la azotea del edificio de rectoría y haciendo click sobre cada elemento el mismo contador te va diciendo cuantos objetos has seleccionado.

Para diferenciar cada uno de los equipos se hizo por partes de modo que se identificaron 22 equipos de aire acondicionado centrales y 25 minisplits, dando un total de 47 unidades de aire acondicionado a las cuales se deberá de estar dando mantenimiento cada año. Esta información es útil para obtener una relación del presupuesto anual necesario solo para el servicio de los aires acondicionados, ejercicio que se puede replicar en cualquier edificio siempre y cuando el equipamiento se encuentre a la vista para poder ser contabilizado.

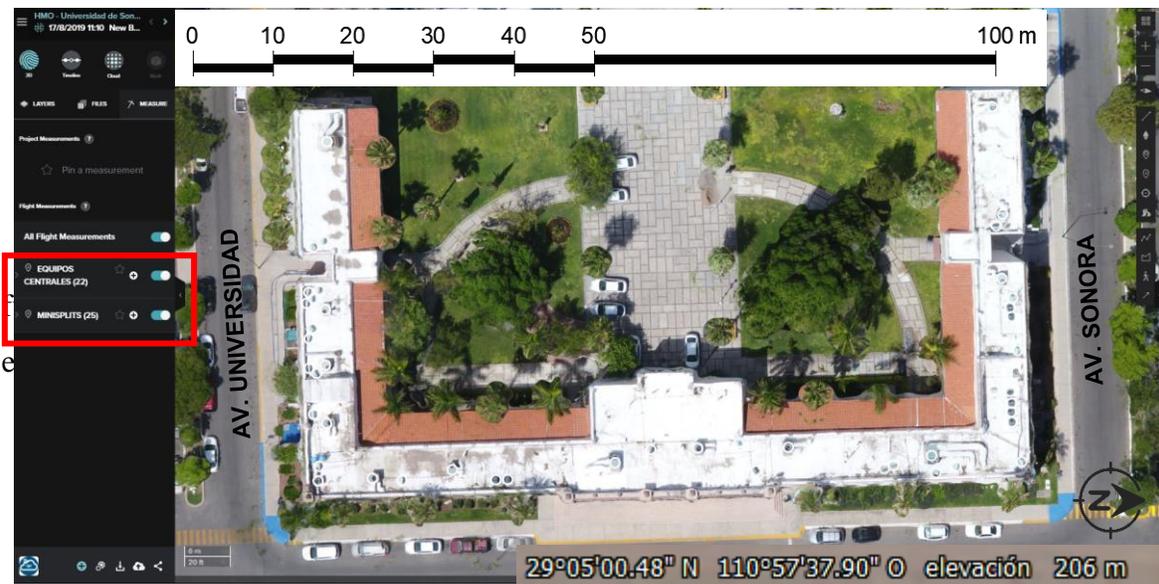


Figura 4.45. Orto fotografía de azotea del edificio de Rectoría y conteo de equipos de aire acondicionado.
Fuente: Elaboración propia.

Esta función nos va a permitir tener una noción del aforo que podemos tener dentro de esta división, así como identificar cuales corresponden al área de mantenimiento y/o discapacitados. En este caso se identificaron un total de 158 cajones de los cuales solamente 7 son destinados para discapacitados y 12 para personal de mantenimiento.

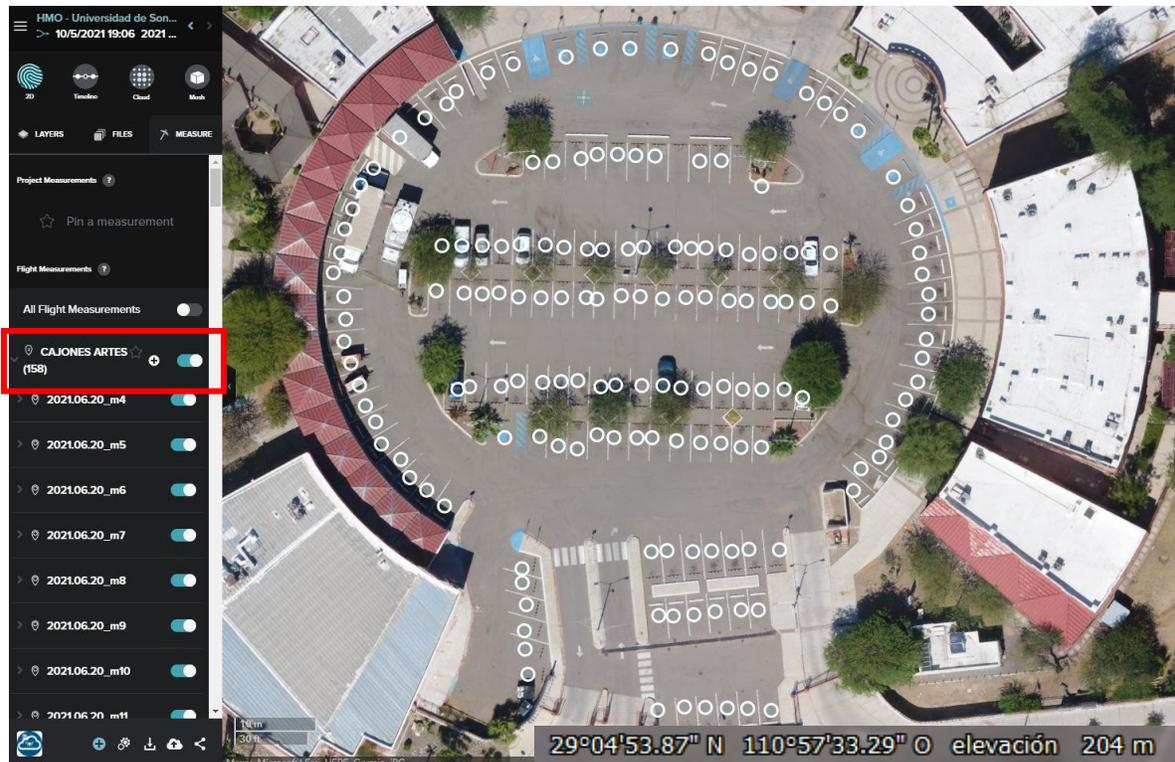


Figura 4.46. Orto fotografía del estacionamiento del Centro de las Artes con marcadores para conteo de unidades.
Fuente: Elaboración propia.

4.7.6. Medición de superficie de losa de azotea del edificio de Derecho (10-I) para presupuestos de mantenimiento.

Como otro ejercicio para el análisis de superficie y estimación de costos de mantenimiento en losa de azotea en uno de los edificios más grandes del campus de la Union, el edificio de 10-I, se hizo un trazo de polígono en la nube de puntos para obtener la superficie total de sus tres losas superiores.

Para este caso se puede observar en la Figura 4.47 que se cuenta con tres superficies contabilizadas de 782.14 m², 1,029.53 m² y 781.97 m²; sumando un total de 2,593.64 m². Si hacemos un análisis rápido considerando un precio unitario de \$160.00 m.n. por m² estaríamos hablando de un costo aproximado de \$414,982.40 pesos.

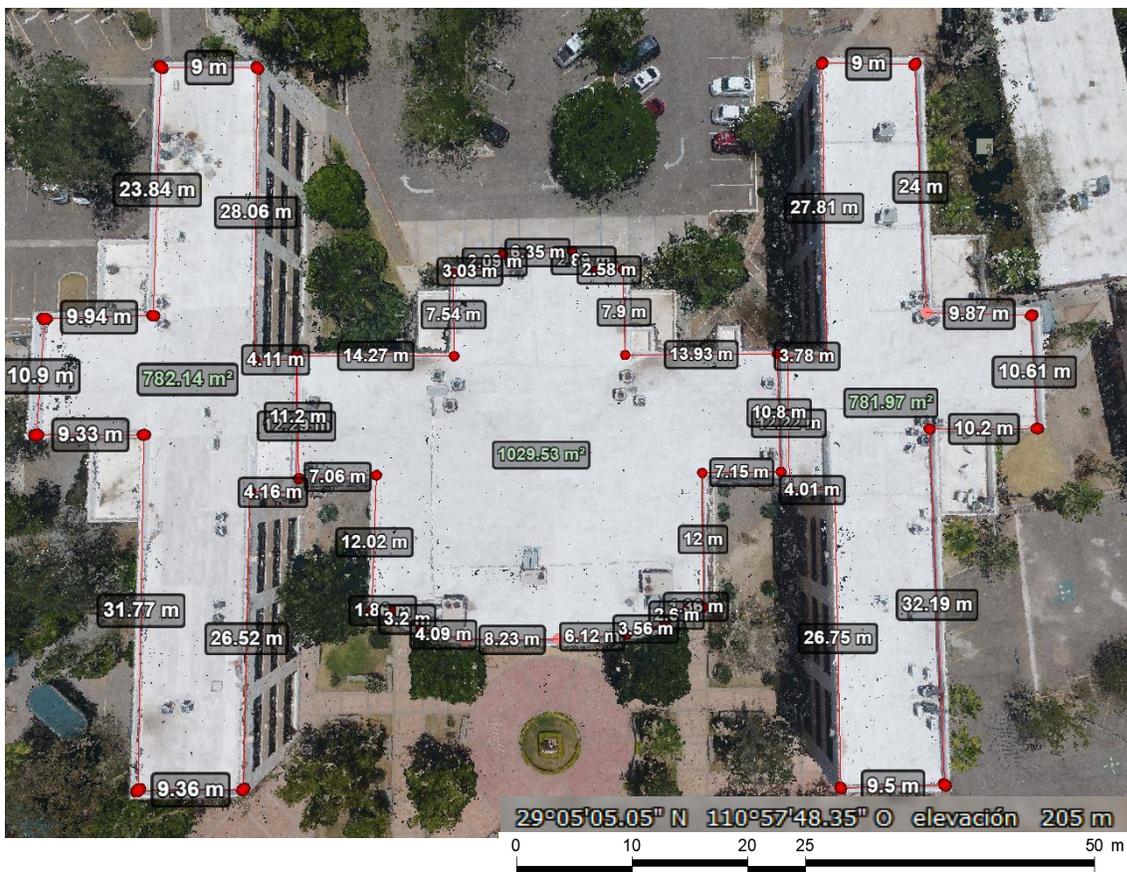


Figura 4.47. Medición de losas de azotea del edificio de Derecho en nube de puntos. Fuente: Elaboración propia.

4.7.7. Reemplazo de pasto sintético en cancha de futbol del Estadio Miguel Castro Servín.

Al momento de iniciar este proyecto de investigación el campo de futbol del estadio Miguel Castro Servín se encontraba en condiciones muy deterioradas. Durante el proceso se observó un gran avance en las modificaciones del mismo y su terminación. Como otro ejercicio práctico se hizo una medición de la superficie total de remodelación del pasto sintético la cual se observa en la Figura 4.49, dando un total de 10,181.61 m².



Figura 4.49. Medición de campo de futbol de estadio miguel Castro Servín en nube de puntos.
Fuente: Elaboración propia.



Figura 4.48. Estado actual del campo de futbol Miguel Castro Servín. Fuente: Elaboración propia.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al analizar el modelo digital del campus procesado en este documento se observó el alcance de la fotogrametría incorporada a un software de procesamiento fotogramétrico, es decir, se lograron tareas de medición, valoración de daños, planeación, gestión de recurso y estimaciones de inversión, entre otras, desde la computadora.

En comparación con las imágenes satelitales que se pueden encontrar en internet para visualizar zonas de estudio, pudimos confirmar que el uso de los drones y la fotogrametría crea un panorama más amplio para el análisis físico de los elementos, con la ortofotografía procesada se puede analizar a detalle todo aquello que es visible por el dron.

A pesar de que se realizaron diferentes mediciones (largas, cortas, horizontales y verticales) se observa que la variación entre unas y otras con respecto a las medidas reales fue aproximada. Es importante mencionar que el modelo digital 3D generado tiene un rango de precisión, comprobado en campo, por un valor promedio de ± 0.35 cm de variación por metro lineal. Es importante conocer y comprender que este factor se genera ya que la fotogrametría trabaja por medio de pixeles y depende de la resolución de la imagen y de la altura a la que se ubique el foco de la cámara. Esta resolución se calcula automáticamente durante la planeación del vuelo y depende del tipo de dron que se utilice.

Además de las mediciones realizadas se logró obtener una galería digital de más de 4,500 imágenes aéreas tomadas entre 2019 y 2021. En estas fotografías que se almacenan en la nube se puede apreciar la evolución, deterioro y crecimiento de la infraestructura de la Unison en los últimos tres años.

Dentro de las imágenes obtenidas del campus de la Unison, las que mostraron cambios más evidentes, fueron aquellas, producto del mejoramiento continuo de las instalaciones de la Institución que abarcan remodelaciones y ampliaciones. Contrario a esto, imágenes claras del deterioro ocasionado en ciertas áreas debido a la contingencia sanitaria ocasionada por la pandemia Covid-19

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo de este proyecto de investigación adopta la premisa de innovación tecnológica que demanda el Plan de Desarrollo Institucional 2017-2021 de la Universidad de Sonora acerca de diseñar e implementar nuevas herramientas orientadas a la mejora en la gestión administrativa y productiva de la infraestructura.

La innovación en el desarrollo de procesos de cualquier actividad económica, administrativa y/o institucional debe ser una cualidad integrada por defecto al sistema u organización que lo gestione, es decir, la intención de mejoría no puede ser una opción sino una necesidad ya que de ella depende el crecimiento continuo.

La finalidad de un proyecto de investigación y/o análisis de uno o más objetos por medio de fotogrametría, es capturar ángulos visuales a donde el ojo humano difícilmente pueda acceder para lograr un análisis paramétrico detallado con la ayuda de un software. En el caso de la Universidad de Sonora se consiguió generar un modelo completo del polígono del campus con una extensión de más de 65 hectáreas.

Para lograr la mejora en la gestión es importante la alimentación constante de datos a los sistemas de información en sus diferentes formatos, para lo cual, en este proyecto se buscó integrar una herramienta visual multifuncional que pudiera ser analizada por cualquier usuario.

Lo que se logró con el modelo digital generado fue complementar estos sistemas para optimizar el manejo, la visualización y su operatividad, sin embargo, con la experiencia de los sucesos ocurridos en el transcurso de esta investigación y con los resultados obtenidos podemos sugerir una serie de recomendaciones para lograr aún mejores resultados partiendo de la misma metodología.

- Gestionar la programación de vuelo por división a una menor altura para lograr mayor nitidez y mejor resolución del modelo digital.
- Contemplar un mayor número de puntos de despegue para evitar pérdida de señal y posible pérdida del equipo de vuelo.

-
- Geolocalización de tres a cinco puntos de control por bloque, esto permitiría lograr una relación de precisión absoluta más estable con referencia a los ejes x, y y z.
 - Realizar una medición de volumen de tierra y su comprobación en campo.
 - Para una segunda etapa, elaborar una base de datos dentro de un SIG con información particular de cada uno de los edificios y su planimetría. De este modo se pudiera tener un inventario más complejo de equipamiento dentro de los edificios.
 - Integrar un visualizador del modelo digital a la página oficial de la Universidad de Sonora para su acceso libre.

En conclusión, el uso de los drones y la fotogrametría en la ingeniería abren un panorama extenso de utilidades que permite ser más eficiente y productivo en los procesos relacionadas a la construcción. Su integración en la ingeniería es cada vez más importante y la innovación en estas y otras herramientas tecnológicas hacen de este sector una actividad con un gran futuro.

Por medio de un convenio con las empresas prestadoras del servicio y plataformas de fotogrametría, ya sea la utilizada en este proyecto de investigación o con la que fuera conveniente, se buscaría brindar acceso libre al público en general y generar una interacción libre por parte de los usuarios. De momento se otorgaría solamente un acceso como visitante por medio de códigos QR.



ORTOFOTOGRAFÍA



MODELO 3D

Figura 6.1 Códigos QR de acceso para visualizador de Ortofotografía y modelo 3D

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio Resco, P., Espinoza-Figueroa, F., Aguirre Ullauri, M. del C., Mejía Coronel, P., & Matovelle Jara, C. (2018). Fotogrametría digital para el levantamiento 3D del sitio arqueológico de Todos Santos, Cuenca (Ecuador). *Estoa*, 7(13), 25–35. <https://doi.org/10.18537/est.v007.n013.a02>
- Ávila, C. (2017). *Drones vs. aeronáutica civil, licencias para pilotos y sus procedimientos*. <https://doi.org/10.14718/NovumJus.2017.11.2.6>
- Caro, J. L. (2012). Fotogrametría modelado 3D: un caso práctico para la difusión del patrimonio y su promoción turística. *IX Congreso Tecnologías de La Información y Las Comunicaciones. TURITEC2012*, 15. <http://hdl.handle.net/10630/5134>
- Charfen, A. M. (2015). *Recomendaciones para la aplicación de los drones en el mundo de la arquitectura*.
- Cheli, A. E. (2011). *Introducción a la fotogrametría y su evolución*.
- Díaz, H. P., Giovanni, O., Rivera, S., Alberto, J., & Guerra, G. (2014). Filosofía Lean Construction para la gestión de proyectos de construcción: una revisión actual. *AVANCES Investigación En Ingeniería*, 11(1), 1794–4953.
- Fernández, S. (2019). *Influencia de los puntos de control sobre el terreno en la precisión de modelos digitales de superficies generados mediante fotogrametría aérea*.
- Finney Rutten, L. J., Yaroch, A. L., Colón-Ramos, U., Johnson-Askew, W., & Story, M. (2010). Poverty, Food Insecurity, and Obesity: A Conceptual Framework for Research, Practice, and Policy. *Journal of Hunger & Environmental Nutrition*, 5(4), 403–415. <https://doi.org/10.1080/19320248.2010.527275>
- Flores, A., Stefano, J., Manzanares, D., Francisco, C., Zarate, V., Fidel, J., Castro, A., & Narciso, A. (2019). Propuesta de negocio enfocado en la mejora de la productividad en la construcción de edificaciones haciendo uso de drones. In *Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC)*. Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC).

-
- Frete, H., & Gómez, M. (2018). *Análisis e implementación de fotogrametría digital aplicada a imágenes aéreas*. 201–217.
- Fritsch, D., & Klein, M. (2018). 3D preservation of buildings – Reconstructing the past. *Multimedia Tools and Applications*, 77(7), 9153–9170. <https://doi.org/10.1007/s11042-017-4654-5>
- González Chamorro, A. (2019). *Arquitectura y construcción digital*. 159.
- López Carlos, M. D. (2015). Los drones y sus aplicaciones en la ingeniería civil. In *Los Drones y sus aplicaciones a la ingeniería civil*.
- Mongelli, M., De Canio, G., Roselli, I., Malena, M., Nacuzzi, A., & De Felice, G. (2017). 3D photogrammetric reconstruction by drone scanning for FE analysis and crack pattern mapping of the “bridge of the Towers”, Spoleto. *Key Engineering Materials*, 747 KEM, 423–430. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.423>
- Pari Rendón, R. W., Mateo, S., Pág, F., Wiston Pari Rendon Fredy Diogenes Sedano Mateo Asesor, R., & Alejandro Vildoso Flores, I. (2019). *Análisis, desarrollo y comparación de un levantamiento fotogramétrico realizado con un RPA frente a un levantamiento topográfico convencional realizado con GNSS*.
- Peniche Dávila, L. (2018). *BIM, la transformación digital*.
- Roces, J. L. (2013). *La ingeniería y el comportamiento humano en las civilizaciones*.
- Rodríguez, O. (2009). *Lidar Vs. Fotogrametría En La Obtención De Modelos Digitales De Elevaciones Para Estudios Hidrológicos*. 93.
- Sánchez Sobrino, J. A. (2001). Introducción a la Fotogrametría Digital. *E. T. S. I. Caminos, Canales y Puertos.*, 1–58.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte SCT. (2017). Circular obligatoria CO AV-23/10 R4. Que establece los requerimientos para operar un Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. In *Dirección General de Aeronáutica Civil* (p. 55). <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC->

archivo/modulo3/co-av-23-10-r4.pdf%0Ahttps://goo.gl/FnChN

Secretaria de Comunicaciones y Transporte SCT. (2019). *Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano*. <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>

Tacuri, E., Lupercio, L., Lupercio, G., & López, M. (2017). Uso de imágenes de RPAS para generación de topografía a detalle. *Revista Geoespacial*, 14(1), 32–42. <https://doi.org/10.24133/geoespacial.v14i1.1594>

Tello, P. A. (2019). Uses of Drone Applications to Monitor Productivity 1. In *PM World Journal Use of Drone Applications to Monitor Productivity: Vol. VIII*. www.pmworldlibrary.net

Zelaya, C., Aguiar, R. G., Cruz, A. E., & Ricardo, N. (2016). *Aplicacion de fotogrametria aerea en levantamientos topograficos mediante el uso de vehiculos aereos no tripulados*. 319. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/14218/1/50108282.pdf>

8. ANEXOS

ACRÓNIMOS

RPA	Remotely Piloted Aircraft (Aeronave Pilotada a Distancia)
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System (Sistema de aeronave pilotada remotamente)
UAV	Unmanned Aircraft Vehicle (Vehículo Aéreo No Tripulado)
GPS	Global Positioning System (Sistema de posicionamiento global)
VTOL	Vertical Take Off Landing (Despegue y aterrizaje vertical)
GNSS	Global Navigation Satellite System (Sistema Global de Navegación por Satélite)
RTK	Real Time Kinematic (Cinemático en tiempo Real)
GCP	Ground Control Point (Punto de Control Georreferenciado)
GSD	Ground Sample Distance (Distancia de muestra en el suelo)
DEM	Digital Elevation Model (Modelo Digital de Elevación)
DSM	Digital Surface Model (Modelo Digital de Superficie)
DTM	Digital Terrain Model (Modelo Digital de Terreno)
AGL	Above Ground Level (Sobre Nivel del Suelo)
VANT	Vehículo Aéreo No Tripulado

CAPTURAS DE PLANES DE VUELO REALIZADOS

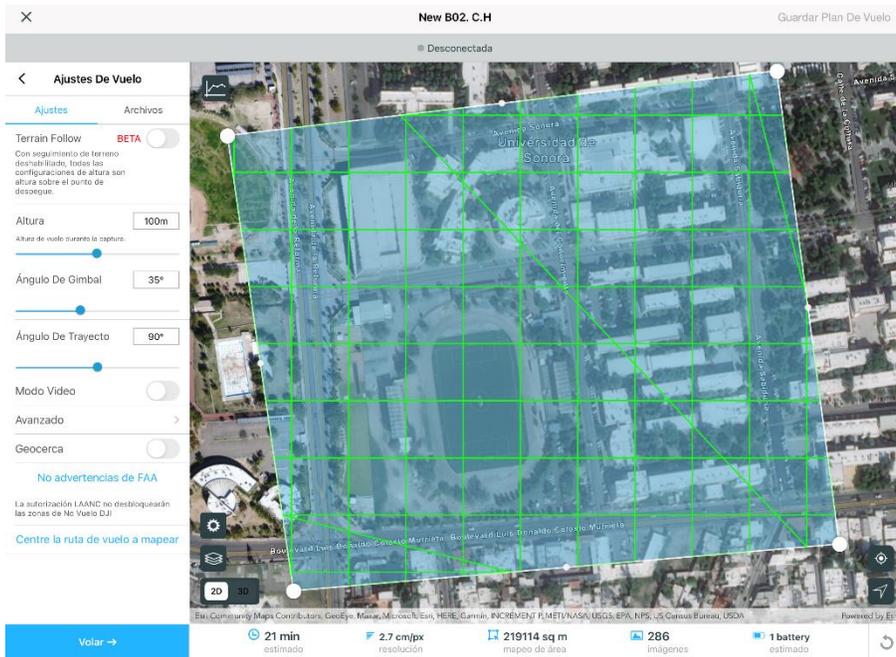


Figura 8.2. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 02. Fuente: Elaboración propia.

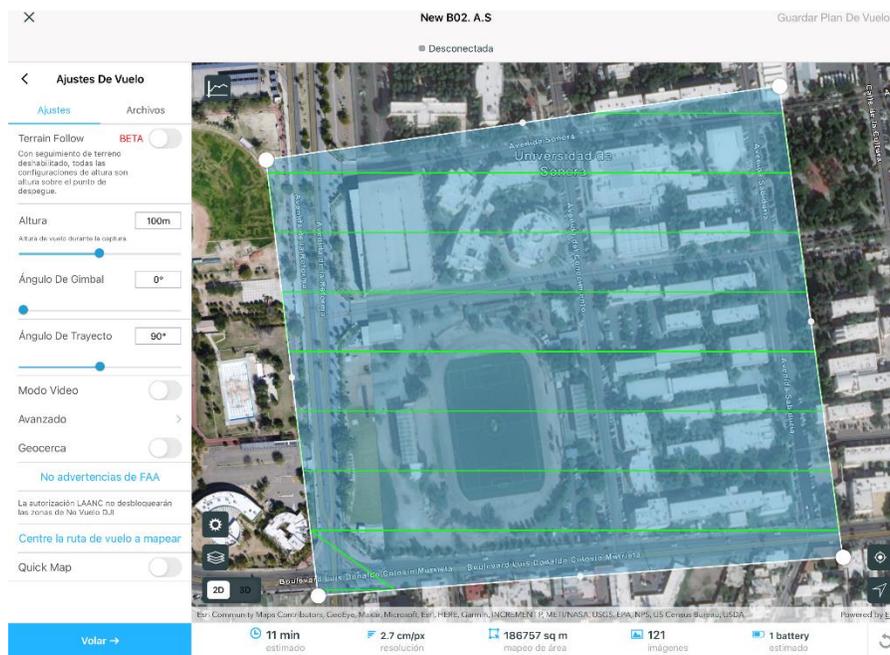


Figura 8.1. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 02. Fuente: Elaboración propia.

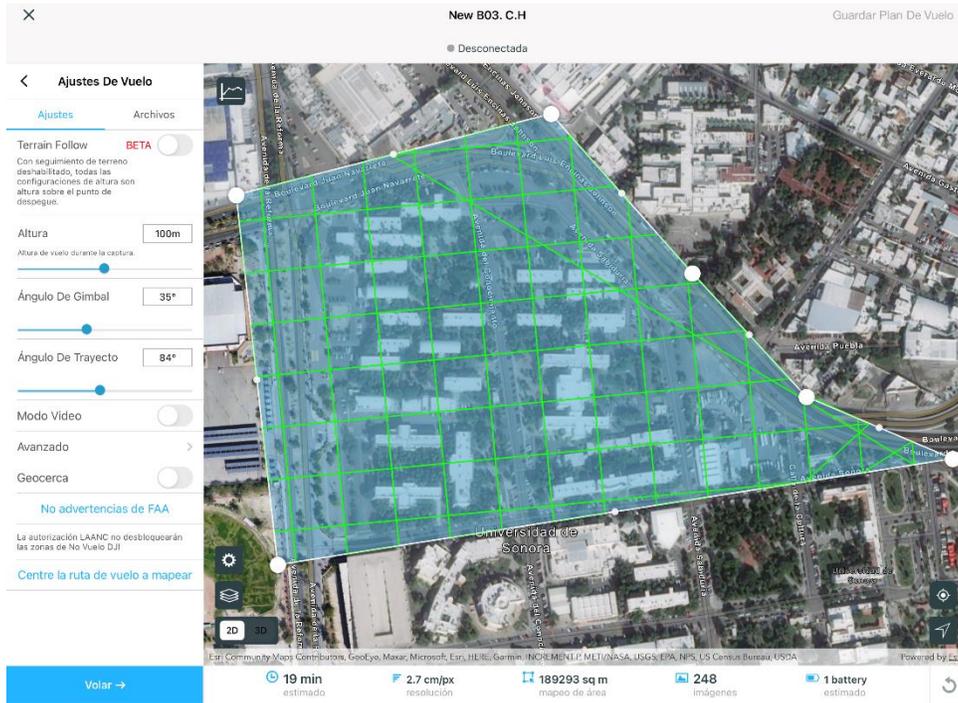


Figura 8.3. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 03. Fuente: Elaboración propia.

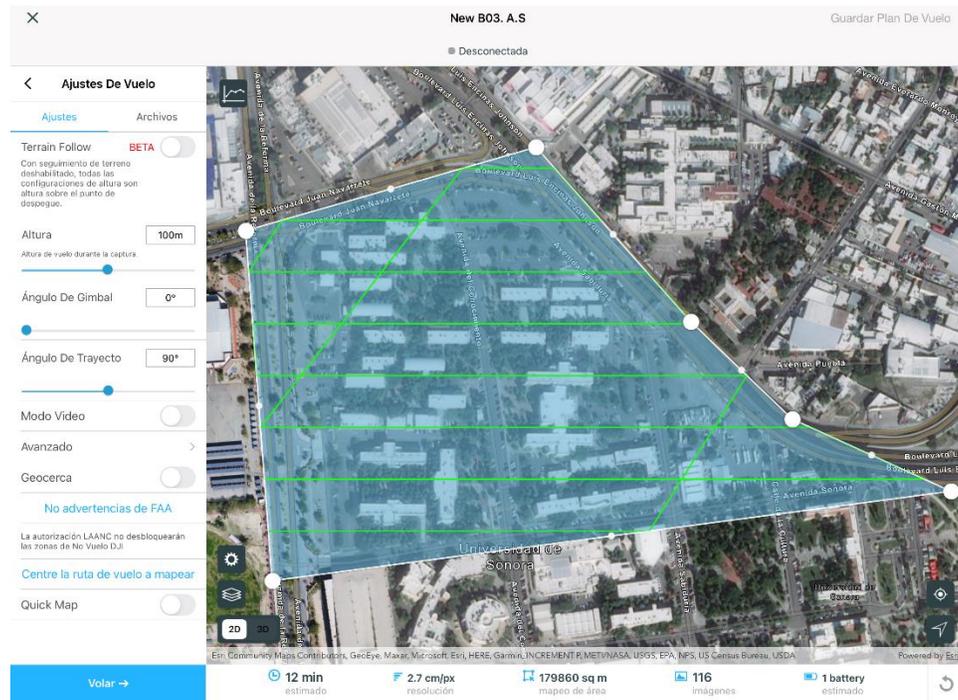


Figura 8.4. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 03. Fuente: Elaboración propia.



Figura 8.6. Figura 42. Configuración de vuelo tipo mapeo entrelazado para bloque 04. Fuente: Elaboración propia.

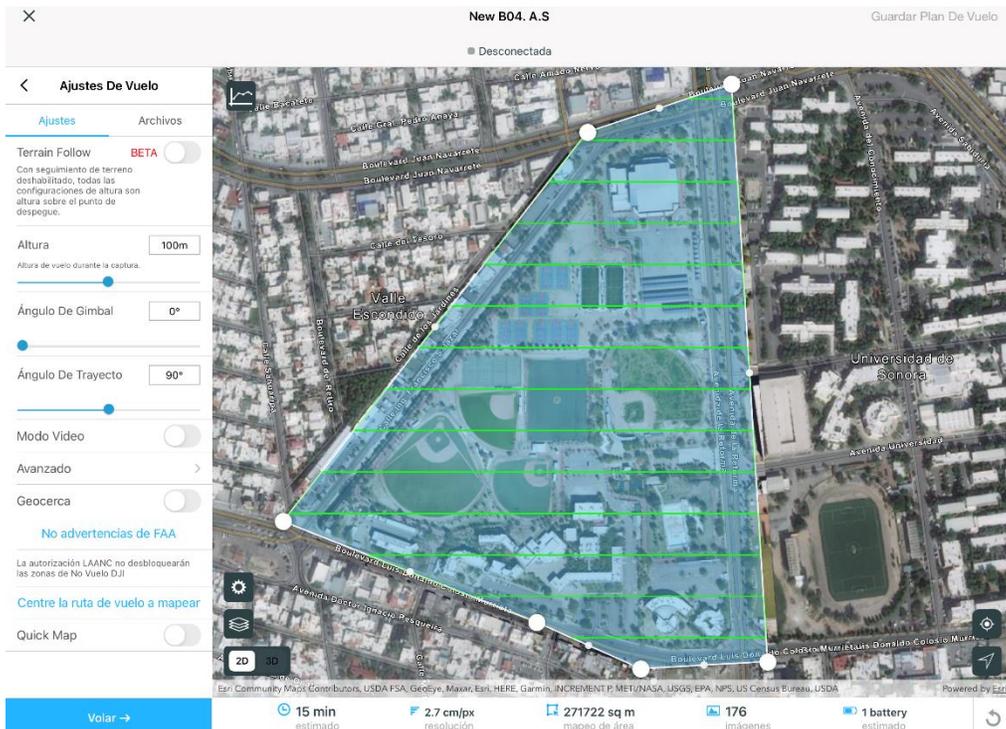


Figura 8.5. Configuración de vuelo tipo mapeo de área para bloque 04. Fuente: Elaboración propia.

MAPAS UNIVERSITARIOS

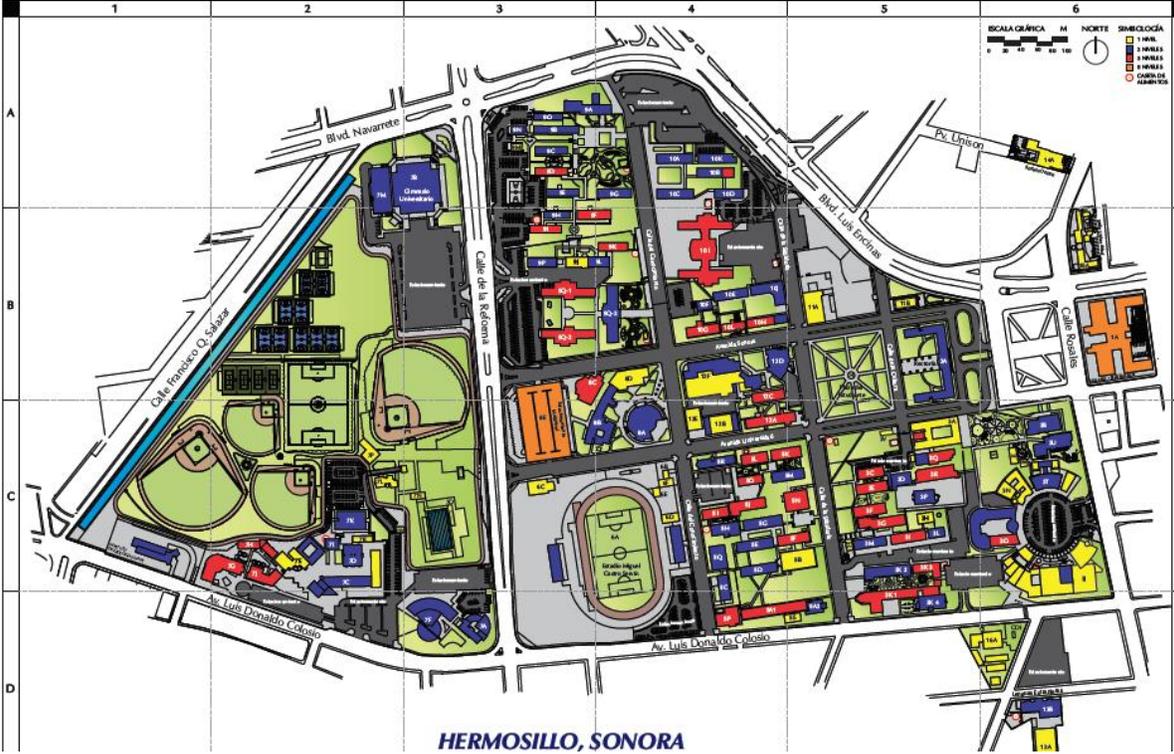


Figura 0.1 Mapa universitario Unison. Fuente: Página oficial de la Dirección de Infraestructura de la Unison.