



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Reducción del tiempo para diagnóstico de pavimentos dañados por subsidencia mediante vehículo aéreo no tripulado y sistema de posicionamiento global

Tesis

Que como parte de los requisitos para
obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Victor Manuel Galeana Pérez

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Querétaro, Qro. a 25 de junio , 2021



Universidad Autónoma de Querétaro

Facultad de Ingeniería

Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Reducción del tiempo para diagnóstico de pavimentos dañados por
subsistencia mediante vehículo aéreo no tripulado y sistema de
posicionamiento global

Tesis

Que como parte de los requisitos para obtener el Grado de
Maestro en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Presenta

Ing. Victor Manuel Galeana Pérez

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

Dr. Omar Chávez Alegría

Presidente

Dra. María de la Luz Pérez Rea

Secretario

M.I. Gerardo Medellín Aguilar

Vocal

Dr. Jesús Pacheco Martínez

Suplente

Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro

Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.

25 de junio, 2021

México

Esta tesis es dedicada:

A Dios y a la vida por permitirme culminar esta etapa de mi vida con éxito.

A mis padres y a mi hermana, por apoyarme en cada una de mis decisiones y por siempre ofrecerme su ayuda incondicionalmente en esta vida. En especial a ti papá, que despertaste en mí el amor por la ingeniería y continuamos creciendo en ella, ¡Lo logramos!

A Tania, pilar fundamental en esta etapa de mi vida, quien me dio su amor, apoyo y tiempo sin medida alguna.

A mis amigos, compañeros y profesores de la Universidad Autónoma de Querétaro.

A todos ellos, que siempre creyeron en mí y en culminar esta etapa.

Y a todos aquellos que formaron parte de todo este sueño, quienes pusieron su fe en mí, para que lograra todo aquello que me propusiera durante cada etapa de mi vida.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios por guiarme durante este arduo camino, por otorgarme la bendición de poder disfrutar cada etapa de mi vida y por permitirme seguir creciendo profesionalmente.

A mis padres y a mi hermana por su apoyo incondicional, por nunca dejarme solo y por haberme apoyado a llegar a este punto de mi vida profesional y por ayudarme a cumplir cada uno de mis sueños; a Tania por su infinito amor, apoyo y tiempo invertido, por ser un pilar fundamental en la conclusión de esta etapa y por contribuir a que cada uno de mis sueños se siga haciendo realidad... ¡Este logro también es tuyo! ¡Gracias por formar parte de mi vida!

A mi asesor, el Dr. Omar Chávez por su apoyo y su orientación para realizar este trabajo, además de brindarme la oportunidad de ir más allá de lo superficial y aprender mucho más durante este trayecto.

A mis sinodales, la Dra. María de la Luz Pérez Rea, el M.I. Gerardo Medellín, el Dr. Jesús Pacheco Martínez y el Dr. Sergio Aurelio Zamora Castro, por sus grandes contribuciones para esta tesis, por compartir sus conocimientos y por su excelente atención durante todo el proceso.

A mis compañeros de la maestría, Misael, Antonio, José Miguel y Jennifer; que tuve el honor de conocer en esta etapa de mi vida y que se han convertido en grandes amigos, además de ser gran parte de este proyecto con sus excelentes contribuciones.

A mis amigos, quienes a pesar de la distancia siempre estuvieron ahí dándome el ánimo y compartiéndome las palabras necesarias en el mejor momento.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por la oportunidad de estudiar de tiempo completo en un programa de Maestría.

A la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ) por sus magníficos docentes, programas, capacitaciones, laboratorios, infraestructura y personal en general.

ÍNDICE

	Pág.
AGRADECIMIENTOS	II
ÍNDICE DE FIGURAS	VI
ÍNDICE DE TABLAS	XIII
ABREVIATURAS Y SIGLAS	XIV
RESUMEN	XV
ABSTRACT	XVI
CAPÍTULO 1	10
INTRODUCCIÓN	10
1.1 Descripción del problema.....	11
1.2 Justificación	13
1.3 Hipótesis.....	15
1.4 Objetivo.....	15
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 SUBSIDENCIA.....	16
2.1.1 Antecedentes.....	16
2.1.2 Concepto	18
2.1.3 Tipos de subsidencia	19
2.1.4 Importancia de la subsidencia en las vías terrestres.....	22
2.1.5 Pavimentos.....	26
2.1.6 Tipos de pavimentos.....	26
2.1.7 Diferentes daños en los pavimentos	28

2.2	SISTEMAS PARA CAPTURA DE INFORMACIÓN	31
2.2.1	Sistemas de Información Geográfica	31
2.2.2	Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT).....	31
2.2.3	Sistema de posicionamiento global (GPS).....	35
2.2.4	Interferometría	36
2.2.5	Imágenes.....	36
2.2.6	Sensores	40
	CAPITULO 3. METODOLOGÍA.....	42
3.1	Recolección de información.	43
3.2	Definición del área de estudio.	43
3.3	Ubicación y colocación de puntos de control terrestres.....	51
3.4	Calibración de VANT.....	52
3.5	Medición y procesamiento de puntos de control terrestres.....	53
3.6	Captura y procesamiento de imágenes.....	55
	CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	59
4.1	Procesamiento de datos del Sistema de Posicionamiento Global ..	59
4.2	Procesamiento de imágenes capturadas por el VANT	67
4.2.1.	Inspección de visual de daños.....	112
4.2.2.	Identificación de patologías de pavimentos mediante ortomosaicos obtenidos por VANT.....	116
4.2.3.	Distorsión angular en la Colonia “El Ensueño”.....	120
4.2.4.	Perfiles de la zona de escalonamiento de la falla por subsidencia mediante ArcGIS.....	121

4.2.5. Limitaciones de los levantamientos realizados en la zona de estudio “El Ensueño”	125
4.2.6. Comparación entre Agisoft Metashape y PIX4D.	127
4.2.7. Comparativa de tiempos y costos del método tradicional y el método propuesto en la investigación.	129
4.3 Validación y verificación de metodología.....	132
CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES	139
BIBLIOGRAFÍA O REFERENCIAS	146
ANEXOS	157
GLOSARIO	157
Fundamentos geodésicos	157
Teledetección.....	158
Modelo digital de elevación (MDE).....	159
Fotogrametría	161
Precisión de fotogrametría	162
Nube de puntos.....	162
Tipos de resolución	163
Resolución Espacial.....	163
Resolución Temporal	163
Reconstrucción de fotografías en 3D.	164
Puntos de Control Terrestres	165
NORMATIVA DE LA SCT PARA EL VUELO DE LOS VANT	166

ÍNDICE DE FIGURAS

Pág.

Figura 1. Clasificación del fenómeno subsidencia. Fuente: Prokopovich (1979) ...	20
Figura 2. Distribución de cargas de un pavimento flexible. Fuente: Adlinge y Gupta (2013)	27
Figura 3. Distribución de cargas de un pavimento rígido. Fuente: Adlinge y Gupta (2013)	28
Figura 4. Componentes del sistema VANT Inspire 1 Pro. Fuente: Salas (2019) ...	33
Figura 5. Cubo RGB. Fuente: Burger y Burge (2009).	37
Figura 6. Cono HSV. Fuente: Burger y Burge (2009).....	38
Figura 7. Doble pirámide HSL. Fuente: Burger y Burge (2009).....	38
Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia	42
Figura 9. Principales fallas, fracturas y fenómeno de subsidencia en la ciudad de Querétaro. Fuente: INEGI (2019).....	44
Figura 10. Ubicación de todos los pozos profundos de agua potable en el Municipio de Querétaro (2021).	45
Figura 11. Ubicación y estado actual de los pozos profundos en el Municipio de Querétaro de la CEA, periodo 2009 – 2014 (Medellín, 2015).....	46
Figura 12. Localización del graben de Querétaro y ubicación de las fracturas y fallas dentro del Municipio de Querétaro. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).	47
Figura 13. Elementos considerados para el nuevo mapeo de fallas y fracturas. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).....	48
Figura 14. Sistema de fallas en la Zona Centro. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).	49
Figura 15. Sistema de fallas en la Zona Occidental. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).	49
Figura 16. Sistema de fallas en la Zona Oriental. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).	49

Figura 17. Ubicación de la Colonia Ensueño. Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth (2019)	50
Figura 18. Colocación de punto de control. Fuente: Elaboración propia (2019)	51
Figura 19. Resultado final de la colocación de punto de control. Fuente: Elaboración propia (2019).....	51
Figura 20. Ubicación de los puntos de control en la colonia Ensueño. Fuente: Elaboración propia (2019).....	52
Figura 21. Medición del punto de control BN-1. Fuente: Elaboración propia (2019)	53
Figura 22. Medición del punto de control BN-2. Fuente: Elaboración propia (2019)	53
Figura 23. Medición del punto de control BN-5. Fuente: Elaboración propia (2019)	53
Figura 24. Medición del punto de control BN-7. Fuente: Elaboración propia (2019)	53
Figura 25. Estación Activa de la Red Geodésica Nacional Activa. Fuente: INEGI (2019)	54
Figura 26. Ruta de vuelo en la colonia El Ensueño para el VANT.....	55
Figura 27. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 1. Fuente: Elaboración propia (2019)	59
Figura 28. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 1. Fuente: Elaboración propia (2019)	60
Figura 29. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)	61
Figura 30. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon de la Medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)	61
Figura 31. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)	62
Figura 32. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)	63

Figura 33. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)	64
Figura 34. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)	64
Figura 35. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)	65
Figura 36. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)	66
Figura 37. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020).....	67
Figura 38. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 1.	68
Figura 39. Reconstrucción del MDT de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020)	70
Figura 40. Reconstrucción del MDS de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020)	71
Figura 41. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020).....	72
Figura 42. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020).....	73
Figura 43. Reconstrucción del MDT de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)	75
Figura 44. Reconstrucción del MDS de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)	76
Figura 45. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020).....	77
Figura 46. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020).....	78
Figura 47. Reconstrucción del MDT de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)	80

Figura 48. Reconstrucción del MDS de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)	81
Figura 49. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020).....	82
Figura 50. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020).....	83
Figura 51. Reconstrucción del MDT de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)	85
Figura 52. Reconstrucción del MDS de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)	86
Figura 53. Ortomosaico del área de estudio en la colonia Ensueño de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020).....	87
Figura 54. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020).....	88
Figura 55. Reconstrucción del MDT de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)	90
Figura 56. Reconstrucción del MDS de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)	91
Figura 57. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 1. Elaboración propia (2020).	92
Figura 58. MDT de la medición 1. Elaboración propia (2020).	93
Figura 59. MDS de la medición 1. Elaboración propia (2020).	93
Figura 60. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 2. Elaboración propia (2020).	95
Figura 61. MDT de la medición 2. Elaboración propia (2020).	95
Figura 62. MDS de la medición 2. Elaboración propia (2020).	96
Figura 63. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 3. Elaboración propia (2020).	98
Figura 64. MDT de la medición 3. Elaboración propia (2020).	98
Figura 65. MDS de la medición 3. Elaboración propia (2020).	99

Figura 66. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 4. Elaboración propia (2020).	101
Figura 67. MDT de la medición 4. Elaboración propia (2020).	102
Figura 68. MDS de la medición 4. Elaboración propia (2020).	102
Figura 69. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 5. Elaboración propia (2020).	104
Figura 70. MDT de la medición 5. Elaboración propia (2020).	104
Figura 71. MDS de la medición 5. Elaboración propia (2020).	105
Figura 72. Relación estadística del BN-1 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	108
Figura 73. Relación estadística del BN-2 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	109
Figura 74. Relación estadística del BN-3 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	109
Figura 75. Relación estadística del BN-4 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	110
Figura 76. Relación estadística del BN-5 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	110
Figura 77. Relación estadística del BN-6 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	111
Figura 78. Relación estadística del BN-7 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	111
Figura 79. Relación estadística del BN-8 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020).....	112
Figura 80. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Antonio Pérez Alcocer.	113
Figura 81. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Federico Samaniego. ..	113
Figura 82. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Cayetano Rubio (Sentido 1).	113
Figura 83. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Cayetano Rubio (Sentido 2).	113

Figura 84. Pavimento articulado en la calle Paseo del Gorrión.	114
Figura 85. Pavimento articulado en la calle Federico Samaniego.	114
Figura 86. Pavimento articulado en la calle Cayetano Rubio (Sentido 1).	115
Figura 87. Pavimento articulado en la calle Cayetano Rubio (Sentido 2).	115
Figura 88. Daños a infraestructura habitacional en la calle Paseo del Gorrión....	116
Figura 89. Daños a infraestructura habitacional en la calle Salvador Septién.	116
Figura 90. Ortomosaico obtenido mediante vuelo con un VANT y levantamiento de PCT en la colonia “El Ensueño”.	117
Figura 91. Acercamiento a la capa superficial en las Calles Cayetano Rubio.	118
Figura 92. Acercamiento a la capa superficial en la Calle Salvador Septién.	118
Figura 93. Acercamiento a la capa superficial en Calle la Salvador Septién esquina con Paseo del Gorrión.	119
Figura 94. Perfil de escalonamiento, obtenido mediante la herramienta LAS Dataset de ArcGIS. Fuente: Elaboración Propia (2021).	122
Figura 95. DEM para obtención del perfil S-01 de escalonamiento. Fuente: Elaboración propia (2021).	123
Figura 96. Perfil de escalonamiento Calle Cayetano Rubio. Fuente: Elaboración propia (2021).	123
Figura 97. DEM para obtención del perfil S-02 de escalonamiento. Fuente: Elaboración propia (2021).	124
Figura 98. Perfil de escalonamiento Calle Salvador Septién. Fuente: Elaboración propia (2021).	125
Figura 99. Ubicación de “Valle de Santiago”, geología estructural y agrietamientos por subsidencia en Querétaro.	132
Figura 100. Ubicación de PCAs y SPT en los estudios previos realizados.	133
Figura 101. Vuelo programado en Pix4D para la captura de información en Valle de Santiago. Elaboración propia (2020).	134
Figura 102. Ortomosaico de los fraccionamientos en Valle de Santiago. Elaboración propia (2020).	135

Figura 103. MDT de los fraccionamientos en Valle de Santiago. Elaboración propia (2020).....	136
Figura 104. MDT y ubicación de falla en Valle de Santiago. Elaboración propia (2020).....	137
Figura 105. Parámetros que definen el elipsoide. Fuente: Olaya (2014).....	157
Figura 106. Elementos que intervienen en la teledetección. Fuente: Tomado de Salas (2019), adaptado de Chuvieco (1995).....	159
Figura 107. Modelo Digital de Superficie LIDAR del Distrito Federal. Fuente: INEGI (2019).....	160
Figura 108. Modelo Digital de Terreno LIDAR del Distrito Federal. Fuente: INEGI (2019).....	161
Figura 109. Procesamiento de imágenes y construcción de modelos 3D. Fuente: Elaboración Propia	165

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Tipos de subsidencia.	22
Tabla 2. Daños del pavimento.	30
Tabla 3. Clasificación de VANT de acuerdo a su peso y tamaño.	33
Tabla 4. Clasificación de los RPAS según su peso.	34
Tabla 5. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 1.	60
Tabla 6. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 2.	62
Tabla 7. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 3.	63
Tabla 8. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 4.	65
Tabla 9. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 5.	66
Tabla 10. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 1.	69
Tabla 11. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 2.	74
Tabla 12. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 3.	79
Tabla 13. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 4.	84
Tabla 14. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 5.	89
Tabla 15. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 1.	94
Tabla 16. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 2.	97
Tabla 17. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 3.	100
Tabla 18. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 4.	103
Tabla 19. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 5.	106
Tabla 20. Elevaciones obtenidas de las mediciones en el sitio de estudio.	107
Tabla 21. Diferencia de elevaciones ente las mediciones realizadas.	107
Tabla 22. Límites máximos tolerables para la distorsión angular.	121
Tabla 23. Comparación de tiempos entre los equipos de medición.	129
Tabla 24. Ventajas y desventajas de los equipos utilizados.	130
Tabla 25. Costos y beneficios de los equipos utilizados.	131
Tabla 26. Coordenadas y elevaciones de PCT en Valle de Santiago.	134

ABREVIATURAS Y SIGLAS

CEA – Comisión Estatal de Agua.

CONAGUA – Comisión Nacional de Agua.

GNSS – Global Navigation Satellite System (*Sistema Satelital de Navegación Global*, en español).

GPS – Global Positioning System (*Sistema de Posicionamiento Global*, en español).

INEGI – Instituto Nacional de Estadística y Geografía

InSAR – Interferometric Synthetic Aperture Radar (*Radar de Apertura Sintética Interferométrica de Alta Resolución*, en español).

MDE – Modelo Digital de Elevación.

MDS – Modelo Digital de Superficie.

MDT – Modelo Digital de Terreno.

PCT – Punto de Control Terrestre.

RGNA – Red Geodésica Nacional Activa.

SCT – Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

SIG – Sistema de Información Geográfica.

UTM – Universal Transverse Mercator (*Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator*, en español).

VANT – Vehículo Aéreo No Tripulado.

RESUMEN

En la actualidad, parte de los asentamientos y agrietamientos que se presentan en las vías terrestres son generados por el fenómeno subsidencia. El proceso de identificación de los movimientos usando herramientas topográficas en grandes áreas, demandan elevados tiempos para la recolección de información en campo, sin mencionar el arduo procesamiento de la información. Es por ello que utilizando una metodología, usando un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y un Sistema de Posicionamiento Global (GPS), se pueden identificar y conocer los valores de los asentamientos en menor tiempo, realizando un procesamiento de imágenes obtenidas por un VANT y postprocesando los datos obtenidos por un GPS empleando un programas de computación, con la finalidad de evaluar el estado actual de los pavimentos y conocer las zonas vulnerables de sitio en particular. El presente trabajo, muestra por primera vez ortomosaicos, Modelos Digitales de Elevación (MDE), Modelos Digitales de Superficie (MDS) y Modelos Digitales de Superficie (MDT) del sitio de estudio, usando Puntos de Control Terrestre (PCT) para corregir los modelos resultantes y obtener más precisión de las imágenes obtenidas durante los vuelos del VANT. Los resultados obtenidos muestran errores totales de hasta 8 centímetros más en Pix4Dmapper que en Agisoft Metashape, mediante el procesamiento los PCT se obtuvieron asentamientos con un valor de 5.70 centímetros en un periodo de 11 meses. Así mismo, se obtuvo una precisión mínima de +/- 2.70 centímetros con la unión de ambas tecnologías y a también se crearon MDT y MDS que son una excelente referencia para la ubicación de la falla por subsidencia, en estos se muestra el trazo real de la misma. Mediante el uso de los ortomosaicos fue posible conocer el índice de la severidad de los daños en los pavimentos.

Palabras clave: VANT, GPS, subsidencia, ortomosaicos, asentamientos, fotogrametría.

ABSTRACT

At present, part of the settlements and cracking that occur on land roads are generated by the subsidence phenomenon. The process of identifying the movements using topographic tools in large areas, demands high time for the collection of information in the field, not to mention the arduous processing of the information. That is why using a methodology, using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) and a Global Positioning System (GPS), it is possible to identify and know the values of the settlements in less time, processing images obtained by a UAV and postprocessing the data obtained by a GPS using a computer program, in order to evaluate the current state of the pavements and to know the vulnerable areas of a particular site. The present work shows for the first time orthomosaics, Digital Elevation Models (DEM), Digital Surface Models (DSM) and Digital Surface Models (DTM) of the study site, using Ground Control Points (GCP) to correct the resulting models and obtain more accuracy from the images obtained during the UAV flights. The results obtained show total errors of up to 8 centimeters more in Pix4Dmapper than in Agisoft Metashape. By processing the TCPs, settlements were obtained with a value of 5.70 centimeters in a period of 11 months. Likewise, a minimum accuracy of +/- 2.70 centimeters was obtained with the union of both technologies and also MDT and MDS were created, which are an excellent reference for the location of the subsidence fault, in these the real trace of the same is shown. Through the use of orthomosaics it was possible to know the severity index of pavement damage

Keywords: UAV, GPS, subsidence, orthomosaics, settlements, photogrammetry.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la actualidad uno de los principales problemas que se presentan en la ciudad de Santiago de Querétaro, en México y en distintas partes del mundo, son los asentamientos diferenciales y agrietamientos que acontecen en los suelos derivados del fenómeno llamado subsidencia; dicha irregularidad ha inducido el daño a distintas obras civiles, principalmente en las vías terrestres quienes tienen un papel sumamente importante en las actividades económicas de cualquier ciudad (Pacheco, 2007; Chávez, 2008; Medellín, 2015; Lira, 2016, Ochoa *et al.* 2018).

Habría decir que, en diferentes ciudades en los estados de la República Mexicana, como lo son Aguascalientes, Celaya, Ciudad de México, Irapuato, León, Morelia, Querétaro, Salamanca, San Luis Potosí, entre otros; se ha presentado el fenómeno de subsidencia, el cual se atribuye a la sobreexplotación excesiva de los mantos acuíferos para el abastecimiento de agua potable de las mismas (Carreón *et al.*, 2006).

Desde la década de 1970, el nivel piezométrico del agua subterránea ha disminuido de 2 a 5 metros por año, debido a una rápida explotación de agua potable (Carreón *et al.*, 2016). Es por ello, que la demanda desmesurada del vital líquido en las zonas áridas y semiáridas de Querétaro sigue provocando la extracción del mismo, para lo cual no se percibe una pronta solución para evitarla, en consecuencia, el abatimiento del agua subterránea puede continuar, y derivado a esto, las afectaciones puede incrementarse de una forma excesiva debido a la subsidencia que se ha originado (Chávez, 2008).

Es así como a través de las nuevas tecnologías que se han incorporado en el desarrollo de las distintas áreas de investigación, debido a las facilidades y condiciones de trabajo que otorgan; una de ellas son los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), los cuales han sido utilizados desde la inspección de obra hasta

el servicio de emergencias y desastres, así como también hasta en el modelado en 3D de algunas áreas (Siebert y Teizer, 2014; Freimuth y König, 2018). Por otro lado, otra tecnología que también resalta en la actualidad es el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), el cual de acuerdo con Llenera (2015) y Cortés *et al.* (2010) son autónomos y cuentan con su propio sistema de referencia y tiempo usando diferentes posiciones de sus satélites, obteniendo mediante computadoras por triangulación, altitud, longitud y latitud de un punto sobre la superficie de la tierra.

Dicho lo anterior, esta investigación se enfoca en identificar los asentamientos y agrietamientos en los pavimentos en un área de estudio monitoreándolos mediante un VANT y un GPS; las cuales son causadas por subsidencia, con la finalidad de usar ambos equipos para acelerar el proceso de identificación y predicción de los asentamientos con mayor precisión, así como también, optimizar los tiempos de recolección de datos y poder realizar diagnósticos eficientes en menor tiempo, usando un procesamiento de imágenes mediante programas de computación obtenidas por el VANT, además de poder predecir futuros hundimientos y agrietamientos por el fenómeno de subsidencia.

1.1 Descripción del problema

Los agrietamientos provocados por el fenómeno subsidencia afectan principalmente a la infraestructura urbana, procedente de una deficiente planeación y crecimiento urbano desmesurado en zonas de riesgo, lo cual ha causado muchas pérdidas económicas (Pacheco, 2007; Lira, 2016). La Ciudad de Santiago de Querétaro presenta zonas áridas y semiáridas, provocando que una de las principales fuentes de abastecimiento sea mediante la extracción de agua subterránea, cabe señalar que para dicho problema no se percibe una pronta solución y de esta manera, poder evitar la sobreexplotación del acuífero; en consecuencia, el abatimiento del agua subterránea puede continuar, y derivado a esto el hundimiento de la Ciudad y el crecimiento de los agrietamientos en la misma

también. Es inevitable que este fenómeno se siga presentando, pero resulta de interés predecir el lugar donde se presentaran los siguientes agrietamientos (Chávez, 2008).

A su vez, Pacheco (2007) asegura que no existen los datos necesarios que indiquen el área afectada por subsidencia, aun así se valora que sean cerca de 100 km² afectados.

Cabe señalar, que en investigaciones realizadas en Querétaro se han determinado valores generales del asentamiento en un intervalo de cinco a diez cm/año (Pacheco, 2007 y Chaussard *et al.*, 2014); sin embargo, estos valores generales no son suficientes, dado que es necesario tener valores más puntuales en distintas regiones de Querétaro, debido a las distintas condiciones geológicas y geomorfológicas del suelo (Medellín, 2015).

Por otra parte, la infraestructura en las zonas urbanas ha presentado infinidad de daños desde hace tiempo atrás, las cuales han sido afectadas por el fenómeno de subsidencia.

Una de las colaboraciones que se han desarrollado a partir de ejercicios en la misma línea de investigación, es el actual Atlas de Riesgo el cual contiene un apartado sobre los estudios de subsidencia realizados en Querétaro; este mismo es utilizado de manera recurrente por la Unidad de Protección Civil Municipal, para identificar las zonas de riesgo en zonas vulnerables en la ciudad, lo cual conlleva a posibles afectaciones a construcciones, así como también en determinar con más precisión las causas de los deterioros en la infraestructura, sin embargo es importante seguir con la investigación, determinar áreas de mayores dimensiones y obtener en menor tiempo un conjunto de datos que favorecen tomar decisiones informadas.

En consecuencia, es necesario realizar evaluaciones de infraestructura en periodos cortos de tiempo con la finalidad de poder emitir diagnósticos rápidos que contribuyan a salvaguardar la integridad de las personas.

1.2 Justificación

Tomás *et al.* (2009) señalan que la subsidencia es un fenómeno que provoca daños materiales e incluso puede llegar a ocasionar pérdidas fatales. Investigadores como Rodríguez y Rodríguez (2006) y Sahu y Sikdar (2011), mencionan que muchos de los problemas sobre el hundimiento de tierra en años recientes son provocados por la subsidencia relacionada con la reducción del nivel freático. Por otro lado, Castellazzi *et al.* (2016) confirman que muchos de los daños estructurales causados a las construcciones, se deben a la compactación de los acuíferos sobreexplotados en el centro de México.

Así mismo, Pacheco *et al.* (2006), consideran que las afectaciones por subsidencia se presentan cada vez con mayor frecuencia, haciendo énfasis en que este fenómeno no puede ser mitigado ni controlado, por lo tanto es necesario que se siga monitoreando con la finalidad de prevenir problemas de infraestructuras y determinar zonas donde no es factible la construcción de ellas, incluso de asentamientos humanos. Por su parte, Castellazzi *et al.* (2016) mencionan que es necesario identificar los sitios donde hay fallas y de esta manera gestionar los recursos hídricos y mitigar daños futuro a la infraestructura causadas principalmente por los hundimientos de tierra.

En efecto, Herrera *et al.* (2009) indica que existen varios procedimientos para medir las deformaciones y cuantificar aspectos del movimiento del suelo, los cuales se dividen en cinco grupos: fotogramétricos, teledetección, topográficos, geodésicos e instrumentales.

Es por eso que Cabral *et al.* (2011) estudiaron la magnitud y la variabilidad espacial del proceso de subsidencia mediante la Interferometría de Radar de Apertura Sintética Diferencial (DInSAR) en la Ciudad de México, con lo que concluyeron que es una buena técnica para medir asentamientos, debido a que se puede obtener una visión sintética de los hundimientos y posibilita la generación de productos que poseen una alta resolución espacial, la cual es muy complicada de determinar a través de métodos de nivelación convencional.

Por lo expuesto anteriormente y el potencial que tiene la fotogrametría, autores como Kenner *et al.* (2014) combinaron fotogrametría aerotransportada con el escaneo láser terrestre y aéreo para monitorear los cambios en la superficie en glaciares de roca y deslizamientos de tierra; así mismo Laribi *et al.* (2015) usaron fotogrametría digital en el estudio espacio-temporal de los deslizamientos de tierras en zonas urbanas.

Sin embargo, en estos momentos hay que reconocer el trabajo innovador de Salas (2019), quien usando un VANT obtuvo imágenes, en las cuales mediante un procesamiento con filtros en un programa de computación, obtuvo la morfología de los deterioros de un pavimento.

De este modo, basándose en las investigaciones de Rodríguez y Rodríguez (2006) y Sahu y Sikdar (2011) quienes hacen énfasis en la problemática de la subsidencia; Kenner *et al.* (2014), Laribi *et al.* (2015) y Salas (2019), quienes consideran la fotogrametría como un método potencial para monitoreo de superficies; esta investigación se realizó con la finalidad de evaluar los pavimentos que son dañados por los asentamientos derivados por el fenómeno de subsidencia en la ciudad de Querétaro por medios fotogramétricos, utilizando un Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) conocidos comúnmente como drones y que recientemente han obtenido un interés en el campo de la ingeniería civil (Seo *et al.*, 2018 y Greenwood *et al.*, 2019). Por otro lado, Ping Hu *et al.* (2012) y Pan *et al.* (2019); dan a conocer

que los VANT, renuevan la forma de trabajar a un bajo costo y en menor tiempo, adquiriendo mayor precisión y seguridad.

1.3 Hipótesis

Por medio de fotogrametría aérea usando un VANT y un GPS-GNSS en modo estático, se logra sintetizar el proceso de identificación y evaluación de agrietamientos y fallas en pavimentos causadas por el fenómeno de subsidencia, mediante un procesamiento de fotointerpretación digital, disminuyendo tiempos de recolección de datos en un 80%, obteniendo información de áreas específicas de estudio y teniendo una precisión de +/-1 cm.

1.4 Objetivo

Monitorear y disminuir el tiempo para el diagnóstico de daños en pavimentos a través del uso de VANT y GPS, obteniendo información en un área específica del fenómeno para actualización de atlas de riesgo.

CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO

2.1 SUBSIDENCIA

2.1.1 Antecedentes

Las fallas y el agrietamiento en los suelos son algunos de los principales problemas en México y en el mundo. La mayoría de los casos donde este fenómeno ha sido observado se ha relacionado con la subsidencia, por ende la explotación de aguas subterráneas es un factor importante para que ocurra este fenómeno en las zonas urbanas o en extensas zonas de cultivo por riego (Pacheco, 2007; Chávez, 2008; Medellín, 2015); cabe señalar que las principales ciudades afectadas en México por esta anomalía son Aguascalientes, Celaya, Ciudad de México, Irapuato, Morelia, León, Querétaro, Salamanca, San Luis Potosí (Carreón *et al.*, 2006).

Más de 200 eventos de hundimientos de tierra, han sido documentados en todo el mundo durante los últimos años (Yakarta, Venecia, Londres, México); y que son provocados por la subsidencia del terreno, asociados con la disminución del nivel freático (Rodríguez y Rodríguez, 2006; Sahu y Sikdar, 2011).

Para empezar, los primeros casos de subsidencia por extracción de agua fueron estudiados por Fuller en 1908 (Poland, 1984). Posteriormente Meinzer (1928), comprobó que la extracción del agua de un acuífero está relacionada con la compresión del mismo y que la minoración de la acumulación puede ser permanente (inelástica) o recuperable (elástica). Sin embargo Marsal y Mazari (1959) mencionan que desde el decenio de 1950, Nabor Carrillo en 1947, consideró que la subsidencia estaba vinculada a la extracción de agua subterránea de arcillas de origen lacustre de la Cuenca de México.

Más tarde, en efecto de seguir conociendo el fenómeno, autores como Shviro *et al.* (2017), atribuyen la subsidencia a la disolución de capas subsuperficiales por aguas subterráneas no saturadas, utilizaron un Radar de Apertura Sintética

Interferométrica de Alta Resolución (*InSAR*, *Interferometric Synthetic Aperture Radar*, por sus siglas en inglés) para estudiar la subsidencia en las costas del Mar Muerto; de la misma manera Liosis *et al.* (2018) usaron Interferometría SAR, para observar las deformaciones del terreno por la extracción de aguas subterráneas en regiones agrícolas; otros autores que realizaron su investigación por medio de procesamiento interferométrico, fueron Miller y Shirzaei (2019), quienes después del huracán “Harvey” concluyeron que la subsidencia en Texas modificó las áreas de inundación; por su parte Zhang *et al.* (2019), utilizaron un modelo distribuido de agua superficial y subterránea, en el cual simularon la capacidad máxima de almacenamiento en las áreas de subsidencia y de esta manera poder reducir inundaciones.

Por lo tanto, varios investigadores continúan estudiando el fenómeno de la subsidencia mediante distintos métodos, entre ellos con mediciones indirectas del lugar, con la finalidad de generar un monitoreo mediante análisis comparativo en donde se puedan reflejar los cambios en el terreno a corto, mediano y largo plazo y posibilitar así una mejor planeación ante dicho fenómeno.

Pacheco *et al.* (2013) aluden que las fallas de los suelos asociadas con la subsidencia debido a la extracción de agua subterránea, es el principal peligro geotécnico en algunos de los Valles de México, causando enormes pérdidas económicas a propiedades públicas y privadas, incluidas infraestructuras urbanas; de igual forma Ávila y Garduño (2008), Tomás *et al.* (2009) y Ochoa *et al.* (2018). Por su parte, Castellazzi *et al.* (2016) mencionan que al menos 16 pozos en la ciudad de Querétaro, han colapsado por el esfuerzo cortante por las distintas fallas que atraviesan por el mismo; se debe agregar muchas de las fallas observadas en las llanuras de Querétaro son por subsidencia, y esto es lo que ha provocado el hundimiento de uno a tres metros en los últimos 40 años.

Así mismo, Herrera *et al.* (2009) mencionan que existen diferentes métodos para medir las deformaciones y cuantificar sus aspectos de movimientos del suelo,

los cuales son cinco: fotogramétricos, geodésicos, teledetección, topográficos e instrumentales.

El fenómeno de subsidencia se presenta en la geología del territorio mexicano, lo cual implica poder prevenir un accidente ambiental cuando se conocen los riesgos, es por ello que la CONAGUA y la CEA son las dependencias de gobierno encargadas de las explotaciones hídricas subterráneas del suelo y quien no tiene una ley que responsabilice por los daños que se generan por la subsidencia (Carreón *et al.*, 2010).

2.1.2 Concepto

La subsidencia ha adoptado distintas definiciones de diferentes autores, aunque todas describen el mismo fin que tiene este fenómeno, es por ello que algunas de las descripciones sustanciales se mencionan a continuación en este apartado.

Poland *et al.* (1972), concretan la definición de la subsidencia como aquel hundimiento o asentamiento de superficie terrestre, obtenidos de varios procesos; se refiere a desplazamientos verticales de las superficies naturales, aunque en algunos casos pueden ser desplazamientos horizontales a muy pequeña escala.

Por otro lado Corapcioglu (1984), define la subsidencia como aquella que implica el asentamiento de la superficie terrestre en una zona determinada considerando distintos factores, de lo cual se considera que pueden ser naturales o causadas por las actividades de los seres humanos.

Otros autores como Galloway *et al.* (1999) y Medellín (2015) la definen como el asentamiento gradual o hundimiento repentino de la superficie de la tierra debido al movimiento subsuperficial de los materiales de la tierra por distintas actividades extractivas de fluidos, sedimentación, descenso de nivel freático, entre otros por mencionar.

Figueroa *et al.* (2018) mencionan que la subsidencia se asocia generalmente con la deformación horizontal y la ocurrencia de fallas en el suelo que causan daños significativos.

2.1.3 Tipos de subsidencia

De acuerdo con los autores que estudiaron este fenómeno de subsidencia, esta fue clasificada de la siguiente forma:

⇒ **Clasificación de Prokopovich (1979).**

Prokopovich (1979), clasificó la subsidencia de acuerdo a los estudios realizados durante varias décadas en dos grupos principales: endógena y exógena como se muestra en la figura 1, en donde para la primera hace referencia a los procesos geológicos internos en la superficie terrestre; y para el segundo, los procesos de deformación superficial relacionada con la compactación natural o antrópica de los suelos

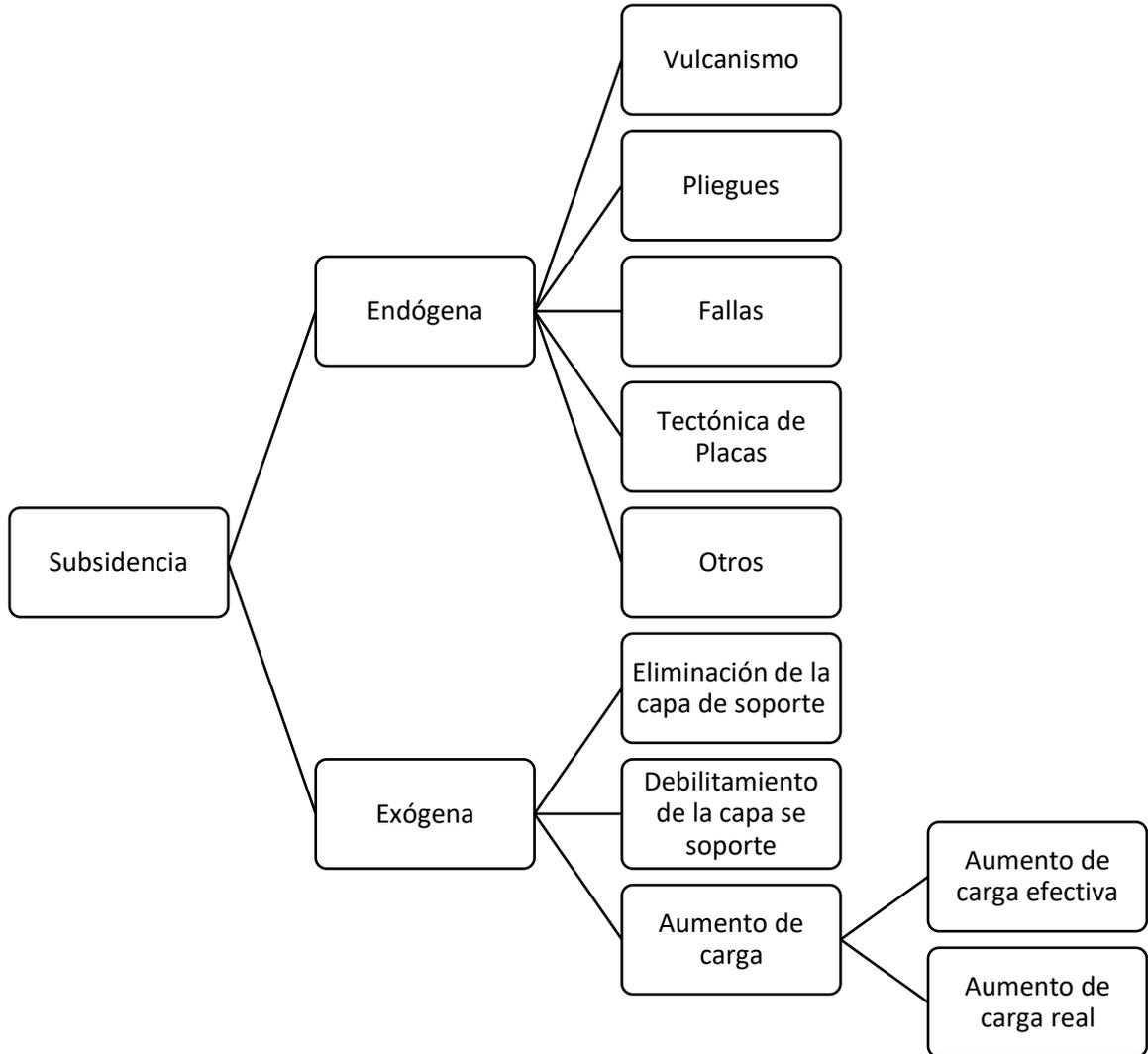


Figura 1. Clasificación del fenómeno subsidencia. Fuente: Prokopovich (1979)

⇒ **Clasificación de Scott (1979).**

Scott (1979), clasifica la subsidencia en función de los mecanismos que desencadena, como por ejemplo: la actividad volcánica y tectónica, la hidrocompactación, la extracción de fluidos desde reservas y manantiales subterráneas, entre otros.

⇒ **Clasificación de González *et al.* (2002).**

González *et al.* (2002), mencionan que la subsidencia frecuentemente es un proceso demasiado lento, pero que en muchos casos este puede ser acelerado por acciones de los seres humanos; es por ello que, este fenómeno puede causar afectaciones en cualquier tipo de terreno, originadas por el descenso de nivel freático en extensos periodos de estiaje, la extracción de fluidos del subsuelo, la consolidación de suelos blandos u orgánicos, procesos de sedimentación, entre otros más.

⇒ **Clasificación de Tomás *et al.* (2009).**

Por otro lado, Tomás *et al.* (2009) determinan la clasificación de la subsidencia considerando las causas que la originan de acuerdo a la tabla 1:

Tabla 1. Tipos de subsidencia.

Causa	Origen
Por disolución subterránea	En sal
	En yeso
	En rocas carbonáticas
Por construcción de obras subterráneas o galerías mineras	
Por erosión subterránea (tubificación o piping)	
Por flujo lateral	Rocas Salinas
	Arcillas
Por Compactación	Por carga
	Por drenaje
	Por vibración
	Por extracción de fluidos
	Por hidrocompactación
Tectónica	

Fuente: Elaboración propia con datos de Tomás et al. (2009)

2.1.4 Importancia de la subsidencia en las vías terrestres

Desde hace años, la subsidencia se ha presentado en infinidad de sitios alrededor de la superficie terrestre, dada por causas naturales u ocasionadas por ser humano, ocasionando movimientos especialmente verticales, y otros horizontales en menor escala. Cabe mencionar, que los movimientos verticales u horizontales que se exhiben en una zona afectada por subsidencia no presentan la misma velocidad de movimiento, debido a las características que muestra cada falla,

el desplazamiento de cada una de éstas puede variar desde metros hasta milímetros cada año. La subsidencia se puede considerar como un riesgo muy silencioso, debido a que los asentamientos graduales en muchos casos no se perciben dada la velocidad a los que estos suceden, puesto que ocurren en periodos muy prolongados de tiempo que pueden ser de cientos a miles de años; en caso contrario, los movimientos son más pronunciados y pueden ocurrir en cuestión de segundos. No obstante, otro factor que no puede pasar desapercibido es la magnitud del fenómeno, en vista a los diferentes daños que puede causar en cualquier infraestructura sobre la cual esté desplantada, así como también la extensión; esta puede variar desde unos metros hasta miles de kilómetros cuadrados (Abellaneda, 2016).

Abellaneda (2016), menciona que desde el siglo XX, la subsidencia se empezó a considerar como uno de los fenómenos geológicos más preocupantes de los seres humanos, debido al incremento desmesurado de la población en la época industrial por dos principales razones: una de ellas, era el crecimiento de los asentamientos poblacionales lo que derivó el aumento de los procesos de subsidencia causados por causas naturales, otra razón que conlleva a la subsidencia, es el incremento exponencial del consumo del agua por el incremento de la población y las zonas industriales que demanda un mayor uso de recursos hídricos. Es por ello, que el fenómeno de subsidencia ha sido considerado como un cambio ambiental que ha afectado los ecosistemas del planeta, el cual se ha desarrollado a partir del siglo XX, resultante del incremento desmesurado de la población y la industria, quienes necesitan de un mayor uso de agua potable para el desarrollo de sus actividades diarias y funcionamiento.

El problema de la subsidencia a mitad del siglo XX, empezó a ser tratado como un riesgo geológico a nivel mundial debido al aumento de los incidentes atribuidos al fenómeno de la subsidencia, derivada a las actividades realizadas por el ser humano, alude el mismo autor.

Cabe mencionar que la subsidencia ha sido un fenómeno de alta influencia para el daño de infinitud de estructuras como el colapso de estribos y pilotes en los puentes, al igual que autopistas, carreteras estatales y federales, incluso hasta calles en algunas colonias, así como también vías de ferrocarriles; las afectaciones no siempre se han presentado en las vías terrestres, sino también en los sistemas de abastecimiento de agua potable y alcantarillado, causando desde rupturas y grietas en las tuberías hasta colapsos completos de las estructuras. Además de todo lo anterior, las afectaciones más graves han sido las modificaciones de la cartografía y topografía del terreno en los distintos sitios donde este fenómeno se ha presentado, provocando alteraciones en las zonas inundables, y por otro lado modificaciones en los gradientes de los arroyos naturales, canales y drenajes artificiales, ocasionando el cambio del sentido de los flujos del agua (Abellaneda, 2016).

Es así como los daños ocasionados por subsidencia mediante procesos geológicos naturales, evolucionan de forma más lenta, por lo cual no representa tanto peligro a corto o mediano plazo; sin embargo, los efectos que tiene la subsidencia en procesos ocasionados por el ser humano cuando se presentan asentamientos diferenciales en la zonas urbanas, debido a las distintas causas ya mencionadas, esta puede dañar diferentes elementos de soporte en las edificaciones, además de los agrietamientos en muros y losas de concreto, asimismo los pavimentos de las vías principales.

Al respecto Suárez y Regueiro (1997), aluden que los daños ocasionados por el fenómeno de subsidencia frecuentemente son ubicados con facilidad debido a las distintas circunstancias que se presenten y simbolicen para la economía y para la vida, tales como: cambios del flujo de agua en estructuras hidráulicas, colapso de tuberías de pozos de agua potable y petróleo, destrucción física y daños (a casas, edificios, carreteras, puentes, entre otros) por asentamientos diferenciales y grietas en el suelo, filtraciones de cuerpos almacenadores de agua, contaminación de

abastecimientos de agua subterránea por contaminantes de superficie que viajan a través de conductos. De las evidencias anteriores, se puede inferir que la subsidencia por procesos geológicos naturales no se puede invertir, parar o retardar por ningún medio; por otra parte la subsidencia inducida por el hombre al detectarse, solo pueden aplicarse medidas correctivas para retardar o para el hundimiento; debido a ello solo puede recuperarse una parte de la elevación de superficie perdida puede ser recuperada.

Aunque la subsidencia no representa un riesgo inmediato para la vida de las personas, esta conlleva a influir en los múltiples daños materiales pertinentes a distintas pérdidas económicas, especialmente en zonas urbanas donde se presenta (Tomás *et al.*, 2009).

En la actualidad para la identificación de las áreas afectadas y para evaluación de las causas del fenómeno, se han utilizado distintos métodos de observación y monitoreo como el radar interferométrico de apertura sintética (*Interferometric Synthetic Aperture Radar*, por sus siglas en inglés *InSAR*) o los sistemas globales de navegación por satélite (*Global Navigation Satellite System*, por sus siglas en inglés *GNSS*), los cuales han resultado muy útiles. En efecto, de poder minimizar los posibles daños que pueda ocasionar este fenómeno, resulta de suma importancia poder determinar las principales causas de la misma, con lo cual se pudiesen disminuir los riesgos, así como también las consecuencias que se derivan de la subsidencia (Abellaneda, 2016).

De lo anterior expuesto, se deduce que el fenómeno de subsidencia no puede ser por una sola causa, sino que éste se atribuye a diferentes orígenes aunque en ocasiones algunas tienen un dominio particular; en este caso en estudio, el fenómeno de subsidencia se debe a la sobreexplotación de los acuíferos en la ciudad de Querétaro, por el crecimiento desmesurado de la ciudad y la necesidad del esencial líquido, lo cual ha derivado que algunas de las fallas que se sitúan

alrededor del Valle, crezcan por oquedades causadas por sobreexplotación de agua subterránea.

2.1.5 Pavimentos

Rico y del Castillo (2005), definen un pavimento como la capa o conjunto de capas materiales adecuados que se ubican entre el nivel superior de la terracería y la superficie de rodamiento, que tiene como principal función proporcionar una superficie de rodamiento uniforme, de color y textura apropiados, que puedan resistir la acción del tránsito y otros agentes perjudiciales, que puedan transmitir a las terracerías los esfuerzos producidos por las cargas impuestas por el tránsito.

Un pavimento, dicho de otra manera es la superestructura de la obra vial, en la cual los vehículos pueden transitar de forma cómoda, segura y económica cubriendo las necesidades para la que fue construida; cabe mencionar que, los elementos por los cuales están contruidos, así como de los materiales usados, pueden variar la constitución del pavimento, ya sea por una sola capa o por varias de ellas.

Actualmente, los pavimentos son un elemento sustancial para la comunicación entre las diferentes ciudades, contribuyendo en el transporte de infinidad de productos y personas, siendo esta la principal fuente de desarrollo para el mundo.

2.1.6 Tipos de pavimentos

Los pavimentos pueden ser considerados de tres formas diferentes: flexible, rígido y terracería mencionan Adlinge y Gupta (2013). Por otra parte, Rico y del Castillo (2005) aluden que los pavimentos pueden diferenciarse y definirse de acuerdo a los materiales por los que están constituidos y como son estructurados; así mismo mencionan que la rigidez o flexibilidad de un pavimento no es sencillo

apropiadamente de determinar, puesto depende de opiniones de que tal rígido puede ser un pavimento flexible o viceversa.

Dicho lo anterior, un pavimento flexible de acuerdo con Adlinge y Gupta (2013), es aquel que se construye con diversas capas de materiales granulares y bituminosas impermeables de distintos espesores según se determine su funcionalidad. Este pavimento tiende a flexionarse cuando se le aplican cargas, las cuales son transmitidas a las capas inferiores quienes tienen distinta resistencia, con la finalidad evitar la flexión excesiva y esto provoque a que éste falle. Lo estructura anterior se muestra en la figura 2.

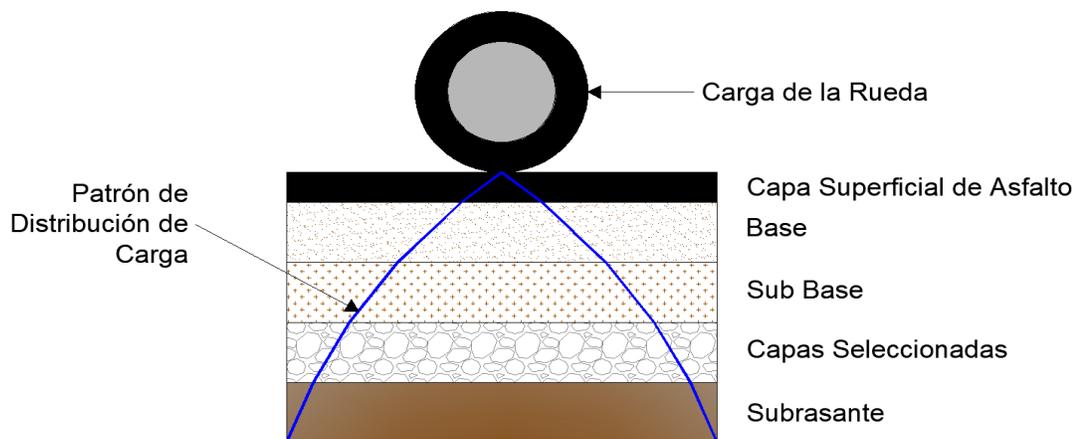


Figura 2. Distribución de cargas de un pavimento flexible. Fuente: Adlinge y Gupta (2013)

Rico y del Castillo (2005) mencionan, que un pavimento flexible cuenta con características fundamentales para su constitución, las cuales se mencionan a continuación:

- a) Resistencia estructural
- b) Deformabilidad
- c) Durabilidad
- d) Costo
- e) Requerimientos de conservación
- f) Comodidad

En cambio, un pavimento rígido es aquel compuesto de una superficie de concreto de concreto hidráulico seguido con capas inferiores llamada base y sub-base, desplantadas sobre un suelo existente llamada subrasante, dichas capas se mencionan en la figura 3, estos pavimentos tienen un módulo de elasticidad más alto que los pavimentos flexibles; además un pavimento rígido puede contener acero de refuerzo para reducir o eliminar juntas (Adlinge y Gupta, 2013).

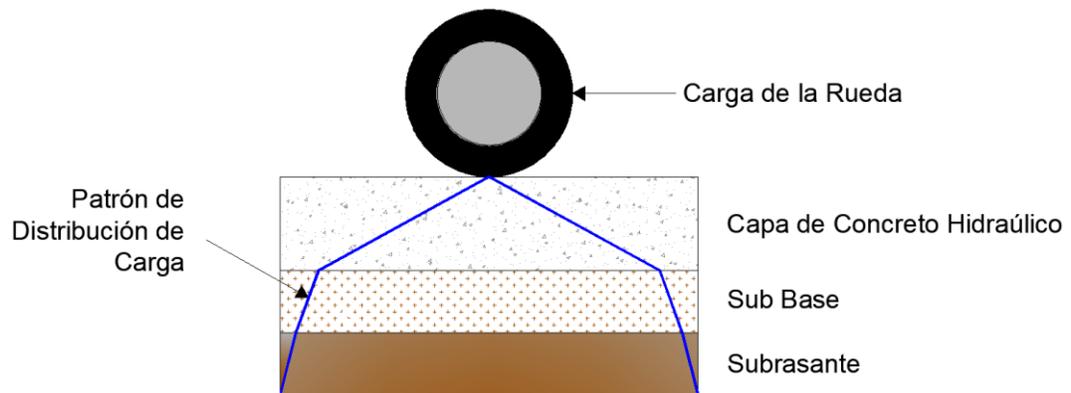


Figura 3. Distribución de cargas de un pavimento rígido. Fuente: Adlinge y Gupta (2013)

2.1.7 Diferentes daños en los pavimentos

Una falla, es aquella condición que presentan los pavimentos cuando pierden las características principales de servicio para las cuales fueron diseñados y construidos, teniendo en cuenta que los principales factores o causas que intervienen para que esto ocurra son: diseños inefficientes, condiciones ambientales, procedimientos constructivos defectuosos y la aplicación constante de cargas (Salas, 2019).

Es por ello que las diferentes instituciones encargadas del mantenimiento y conservación de las carreteras, evalúan constantemente los pavimentos, con la finalidad de tener un óptimo funcionamiento de todas las vías de comunicación siendo estas beneficiadas de distintos programas de conservación y rehabilitación.

De acuerdo con el **U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (2014)**, existen distintos tipos de daños asociados por tipo de daño

como por ejemplo: agrietamientos, baches, deformaciones y deficiencias de superficies; por otra parte, las grietas superficiales de los pavimentos son las más comunes y fungen como el principal daño, de las cuales se originan los demás desperfectos, los cuales cuentan con distintas características morfológicas considerando el tipo de daño por el cual fue originado, lo anterior se muestra en la tabla 2.

Cada tipo de daño al pavimento, es originado por diferentes causas, un ejemplo de ello es el agrietamiento por fatiga el cual se presenta en la capa de rodadura y es producido por las repetidas cargas del tránsito.

Tabla 2. Daños del pavimento.

Clasificación	Tipo de daño
Agrietamiento	Agrietamiento por fatiga
	Agrietamiento tipo bloque
	Agrietamiento lateral
	Agrietamiento longitudinal en rodada y fuera de rodada
	Agrietamiento por reflexión de las juntas: transversal y longitudinal
	Agrietamiento transversal
Parches y baches	Deterioros de parches
	Bache
Defectos de la superficie	Roderas
	Corrimientos
Defectos superficiales	Sangrado
	Agregado pulido
	Desprendimiento
Otros deterioros	Diferencia de elevación del carril-acotamiento
	Escurrimiento de agua y bombeo

Fuente: Elaboración propia con datos de FHWA (2014)

2.2 SISTEMAS PARA CAPTURA DE INFORMACIÓN

2.2.1 Sistemas de Información Geográfica

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, por sus siglas en inglés de *Geographic Information System*), es una herramienta con la cual se puede capturar, almacenar, analizar, transformar y presentar información georreferenciada (Manson *et al.* 2015 y Banerjee y Ray, 2019). El Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2006) menciona que para que se pueda aplicar un SIG debe contar con localización, asociación, interacción y evolución espacial.

Por su parte, Peña (2010) menciona que los SIG provienen de la necesidad de disponer información real para resolver problemas inmediatos en un determinado sitio.

Dicho lo anterior, los SIG han proporcionado diferentes beneficios de acuerdo con el Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt (2006), debido a la disminución de sus costos para los usuarios que requieren de esta tecnología, de los cuales destacan principalmente:

- Realizar un alto número de manipulaciones, superposiciones de mapas en corto tiempo, transformaciones de escala, representación gráfica y gestión de base de datos.
- Consulta rápida de base de datos, espacial y alfanumérica almacenada en el sistema, con información precisa, concentrada y actualizada.
- Minimización de costos de operación e incremento de la productividad.

2.2.2 Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)

Los VANT; se conocen comúnmente como drones (zumbadores en español), son usados para obtener imágenes aéreas en menor tiempo y a diferente altura,

conservando una alta resolución en la fotogrametría digital (Colomina y Molina, 2014). Al respecto, Vosselman (1995) dice que la fotogrametría digital nació de la combinación de tecnologías en procesamiento e interpretación de imágenes con la unión de la fotogrametría analítica.

Por consiguiente, antes de se implementara el uso de los VANT, las metodologías para la captura de las imágenes tenían varias limitaciones, principalmente la baja resolución (72 dpi, *dots per inch* por sus siglas en inglés) en algunos escenarios y el rendimiento muy limitado del vuelo, entre otros por mencionar (Anguiano *et al.*, 2018).

Actualmente, el uso de los VANT ha generado un avance significativo en las investigaciones; debido a las facilidades y condiciones de trabajo que presentan estos se han logrado desarrollar en distintas áreas. Como lo mencionan Freimuth y König (2018), han tenido una utilidad significativa en la inspección de obras, además de ser empleados en la construcción; por otro lado Siebert y Teizer (2014), aluden que también se han utilizado para servicio de emergencias y desastres, la vigilancia del tráfico urbano, monitoreo de zonas forestales agrícolas, el modelado 3D a través de la fotogrametría digital.

De esta manera, se ha comprobado que la tecnología de los VANT incrementa la calidad de las imágenes, los tiempos de captura son optimizados, las cámaras utilizadas son de alta resolución, las circunstancias de trabajo para los operadores son mejores; puesto no son expuestos a riesgos, además de ser una solución económica, comparándolo con los sistemas comerciales actuales (Patterson *et al.*, 2014). En ese sentido Barmounakis *et al.* (2017), menciona que existen ciertos parámetros para determinar el modo de grabación de video para los VANT, los cuales son: estabilización, localización, navegación y la identificación de objetos.

Hoy en día, se pueden obtener ortofotografías y modelos digitales de elevación de superficie terrestre por medio de VANT, involucrando procesos

geológicos y el desarrollo de trabajos científicos (Fernández y Gutiérrez, 2016).

Salas (2019), menciona que un sistema VANT se compone de los siguientes elementos, los cuales se muestran en la figura 4 y está basado en el principio de cuatro rotores (quadrocopter):



Figura 4. Componentes del sistema VANT Inspire 1 Pro. Fuente: Salas (2019)

Samad *et al.* (2013) clasifica los VANT de acuerdo al peso y tamaño del equipo, la cual se describen en la tabla 3:

Tabla 3. Clasificación de VANT de acuerdo a su peso y tamaño.

Categoría	Peso (kg)	Altura de vuelo (m)	Duración (h)	Alcance (km)
Micro	<5	250	1	<10
Mini	<25/30/150	150/250/300	<2	<10
Rango cerca	25-150	3000	2-4	10-30
Rango medio	50-250	3000	3-6	30-70
Rango lejano	>250	>3000	>6	>70

Fuente: Elaboración propia con datos de Samad et al. (2013)

Por otro lado, la Secretaría de Comunicaciones y Transporte (2019), clasifica los RPAS (Remotely Piloted Aircraft System) conocidos como VANT mediante la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, de la siguiente manera en la tabla 4:

Tabla 4. Clasificación de los RPAS según su peso.

Clasificación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia.			
Peso máximo de despegue	Uso	Cumplimiento al Numeral de la presente Norma Oficial Mexicana	
Igual o menor a 2 kg	RPAS Micro	Recreativo	4.10, 4.11 y 5.1.
		Privado No Comercial o Comercial	4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8*
Mayor a 2 kg y hasta 25 kg	RPAS Pequeño	Recreativo	4.10, 4.11 y 6.1.
		Privado No Comercial o Comercial	4.10, 4.11, 6.2 y 8*
Mayor a 25 kg	RPAS Grande	Recreativo	4.10, 4.11 y 7.1.
		Privado No Comercial o Comercial	4.10, 4.11, 7.2 y 8*

*El numeral 8 sólo es aplicable cuando se requiera realizar operaciones especiales.

Fuente: Elaboración propia con datos de SCT (2019)

Aunado lo anterior, ambas clasificaciones están dadas por peso y tamaño, y los parámetros son muy parecidos, por lo tanto no existe variación de ello.

Villareal (2015) menciona que los VANT son una opción muy viable cuando se realizan trabajos de extensas áreas de terreno o cuando los accesos a los sitios dificultan el acceso del personal; por lo que el uso de este método representa un ahorro significativo de recursos. Es así, como un levantamiento topográfico convencional, requiere de una alta inversión en costo y tiempo comparándolo con la topografía aérea realizada con un VANT.

Por su parte, continúa el mismo autor que el uso de los VANT tiene muchas ventajas como por ejemplo; posibilita el acceso a zonas de alto riesgo o difícil acceso, disminuye costos y optimiza tiempos en trabajos de ingeniería. Sin embargo, a pesar de toda la generosidad que tienen los VANT cabe mencionar que también cuentan con desventajas como; pueden perderse la comunicación entre el VANT y el operador, los fenómenos físicos (meteorológicos) que puedan suscitarse durante el vuelo, la capacidad de vuelo limitada, entre otras.

2.2.3 Sistema de posicionamiento global (GPS)

Llenera (2015) menciona que los GPS son autónomos, es decir que tiene su propio sistema de referencia y su propio sistema o escala de tiempo usando diferentes sistemas de referencias expresando las posiciones de sus satélites. Por su parte Cortés *et al.* (2010) alude que el GPS requiere de una red de computadoras para determinar por triangulación, altitud, longitud y latitud de un objeto sobre la superficie de la tierra.

A su vez, los GPS a pesar de ser instrumentos de gran precisión tienen sus errores en las mediciones; Cortés *et al.* (2010) mencionan que los principales factores son: la perturbación ionosférica, los fenómenos meteorológicos, la imprecisión en los relojes, las interferencias eléctricas imprevistas, el error multisenal, la topología receptor-satélites, entre otras por mencionar.

2.2.4 Interferometría

La interferometría óptica es un fenómeno basado en la naturaleza ondulatoria de la luz que permite realizar medidas precisas de las formas o de las distancias, debido a su gran resolución extraordinaria y que no requiere de un contacto físico directo con la superficie en estudio (Duarte, Fernández y Moreno, 2009); los mismos autores, hacen énfasis en que la interferometría proporciona precisiones por debajo de la longitud de onda, según el láser que se utilice, es decir, por debajo de $0.5 \mu\text{m}$ cuando se ocupan láseres dentro del espectro visible. Así mismo, una de las primordiales desventajas de las técnicas interferométricas es que facilitan una medida indirecta del espesor o desplazamiento medido, ya que se debe contar el número de interferencias (máximo y mínimo) de la señal obtenida para fijar la distancia absoluta (Domingo, Duarte, Moreno, Puig-Vidal y Samitier, 2000).

2.2.5 Imágenes

González *et al.* (2020), mencionan que una imagen se define como una función bidimensional $f(x,y)$ donde x y y son coordenadas espaciales, y la amplitud de f en cualquier par de coordenadas es llamada como la intensidad de la imagen en cualquier punto, el término nivel de grises se refiere a la intensidad de las imágenes monocromas, y las imágenes de color son la combinación de tres imágenes monocromas individuales (RGB). Las imágenes son herramientas visuales las cuales representan los objetos presentes sobre la superficie terrestre, cada elemento que contiene una imagen tiene un valor asociado a una variable dada, conocidos como píxeles.

2.2.5.1 Tipos de imágenes

Las imágenes RGB (Red, Green, Blue: Rojo, Verde, Azul) se define como una matriz de píxeles de color representada como $M \times N \times 3$, mostrado en la figura

5. En este tipo de imagen la intensidad de cada pixel ocupa un byte de memoria, siendo el rango entre 0 (sin color, negro) y 255 (máxima intensidad), o también como un valor entre 0 y 1. El color rojo puro tendría el valor de (255, 0,0), el verde valor de (0,255,0) y el azul (0, 0,255), la combinación de dos colores da como resultados colores intermedios por ejemplo el amarillo con valor de (255, 255,0) o el magenta (255, 0,255).

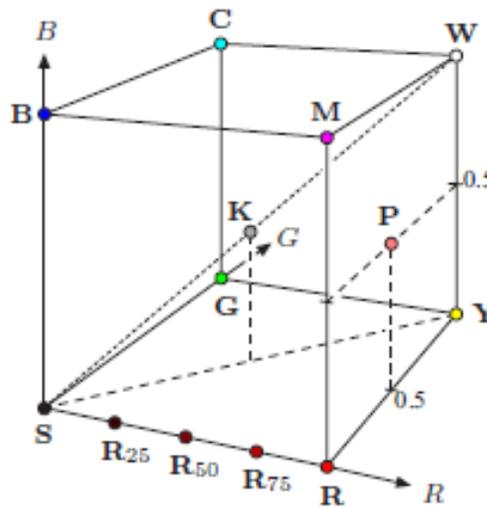


Figura 5. Cubo RGB. Fuente: Burger y Burge (2009).

Las imágenes HSV (Hue, Saturation, Value; Matiz, Saturación, Valor) es un sistema en el cual el matiz se representa en una región circular, para la saturación como una región triangular y el valor del color, lo anterior se muestra en la figura 6. Los valores del matiz (H) van de 0° a 360° , siendo Rojo= $0^\circ=360^\circ$, Verde= 120° , Azul= 240° , y colores intermedios como amarillo= 60° , magenta= 300° . La saturación (S) está en un rango de valores de 0 a 1. El valor o brillo (V) está en valores de 0 a 1, en el eje Blanco-Negro.

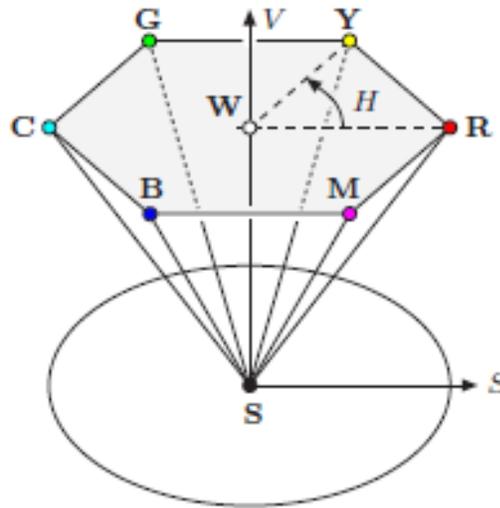


Figura 6. Cono HSV. Fuente: Burger y Burge (2009)

Las imágenes HSL (Hue, Luminance, Saturation; Matiz, Luminosidad, Saturación) son similares a las imágenes HSV, sin embargo, estas están representadas como una doble pirámide, con el color negro en la parte inferior y el blanco en la punta superior, como se muestra en la figura 7.

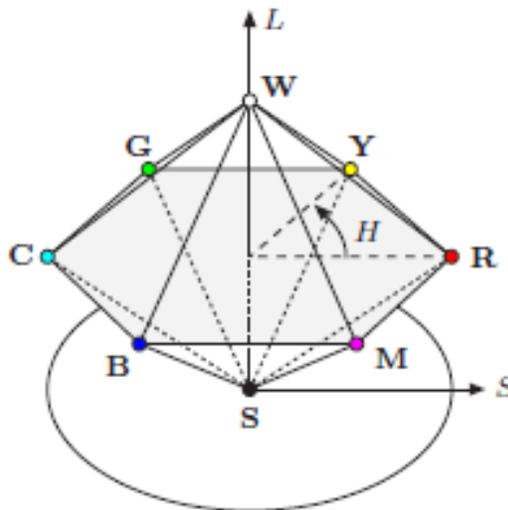


Figura 7. Doble pirámide HSL. Fuente: Burger y Burge (2009).

2.2.5.2 Adquisición de Imágenes

Sieberth *et al.* (2016) menciona que las imágenes adquiridas por un VANT a una baja altitud de vuelo combinada con una cámara de alta resolución se pueden obtener imágenes de buena resolución del terreno y resolución espectral y radiométrica. Los mismos autores continúan, exponiendo que la degradación del desenfoque causado por el movimiento de la cámara en la adquisición de imágenes, es uno de los principales problemas que impiden la automatización completa del procesamiento de imágenes VANT. Este enfoque altera el análisis visual y la interpretación de los datos, causa errores y puede disminuir la precisión de los algoritmos de procesamiento fotogramétrico automático. Por otro lado, Ruzgiené *et al.* (2015), mencionan que la alta calidad de las imágenes es un factor importante para la eficiencia y precisión que generan los productos de mapeo estándar.

Por su parte, Salas (2019) menciona que la hora óptima para realizar un vuelo es después de las 9 de la mañana y antes de las 6 de la tarde, debido al menor porcentaje de nubosidad, así como también la velocidad de los vientos; la altura adecuada es de 45 metros, por las limitaciones de las baterías, siendo que entre más bajo se programe un vuelo, mayor número de imágenes serán capturadas y por consecuencia la batería tendrá menor duración.

Ahora bien, para obtener las imágenes a través de un VANT, lo primero que debe realizarse es una planeación de vuelo, la cual puede hacerse de manera manual o automática. Así, por ejemplo, para realizar un vuelo de manera automática, se utiliza la aplicación móvil *DJI GO* donde se deben introducir datos como la altura de vuelo, el porcentaje de traslape de las imágenes, entre otras por mencionar; además de que se puede monitorear el tiempo de vuelo, el nivel de batería y la intensidad de señal, lo que permitirá estar pendiente del equipo y que no ocurra fallas en la captura de las imágenes.

2.2.5.3 Procesamiento de imágenes.

González *et al.* (2009) nos menciona que el procesamiento de una imagen se divide en tres métodos computarizados, los cuales se indican a continuación:

1. Nivel de bajo procesamiento; son procedimientos de corrección donde se disminuyen ruidos o distorsiones, se mejora el contraste y la nitidez de la imagen.
2. Nivel de medio procesamiento; hacen referencia a los trabajos de segmentación, donde la principal actividad es poder dividir una imagen en regiones con base a criterios de heterogeneidad u homogeneidad, como contornos, bordes y otros por mencionar.
3. Nivel de alto procesamiento, se extrae la información del terreno mediante el reconocimiento de los objetos.

2.2.5.4 Traslape de imágenes

Según Escalante *et al.* (2016) el porcentaje de traslape de imágenes considerado debe estar en un rango de 60 – 80% o más, según el nivel de detalle requerido. De esta manera la generación de modelos 3D detallados, requiere de alturas de vuelos bajas y altos porcentajes de traslape (Nex y Remondino, 2013).

Por consiguiente, para un plan de vuelo en una zona urbana se recomienda un plan de adquisición de imágenes doble rejilla, para tener imágenes en todas las direcciones de las construcciones, y usar un traslape general de 85% longitudinal y 70 % transversal (PIX4D, 2015).

2.2.6 Sensores

Los VANT, han evolucionado bastante en cuestión de forma, tamaño, capacidades y principalmente en la aplicación, puesto sus componentes básicos han mejorado con la finalidad de poder satisfacer todas las necesidades de los

usuarios, por ejemplo, giroscopios, acelerómetros, magnetómetros y altímetros; y algunos otros más que han potencializado los VANT, han sido los GPS, sensores laser, cámaras de video o fotografías (Vázquez y Backhoff, 2017).

Continúan los mismos autores, mencionando que los sensores fotográficos o de video detectan la radiación electromagnética, así como también pueden detectar lo que el ser humano no puede ver a simple vista, para poder analizarlo o interpretarlo.

De acuerdo con Vázquez y Backhoff (2017), los sensores pueden clasificarse según su tecnología:

- CCD y Super CCD (Charge Coupled Device o, en español, Dispositivo de Carga Acoplada)
- CCD RGBE.
- CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor o, en español, Semiconductor Complementario de Óxido Metálico).

Y también se clasifican por su tamaño, debido a que este determinará la calidad de la cámara y como consecuencia las fotografías, cabe recordar que entre más grande sea el tamaño del sensor, es mucho mejor la calidad:

- Sensor Full Frame¹⁵, conocido también como sensor 35mm. Dimensiones: 36x24mm.
- Sensor APS-H. Dimensiones: 28.7x19mm.
- Sensor APS-C (usado en las Nikon, Pentax y Sony). Dimensiones: 23.6x15.7mm.
- Sensor APS-C (usado en las Canon). Dimensiones: 22.2x14.8mm.
- Sensor Foveon (usado en las cámaras Sigma). Dimensiones: 20.7x13.8mm.
- Sensor Micro Cuatro Tercios (M 4/3)¹⁶. Dimensiones: 17.3x13mm

CAPITULO 3. METODOLOGÍA

Para la realización de dicha investigación, se llevó a cabo un proceso sucesivo de actividades que involucró todo el proceso, el cual se muestra en la figura 8.

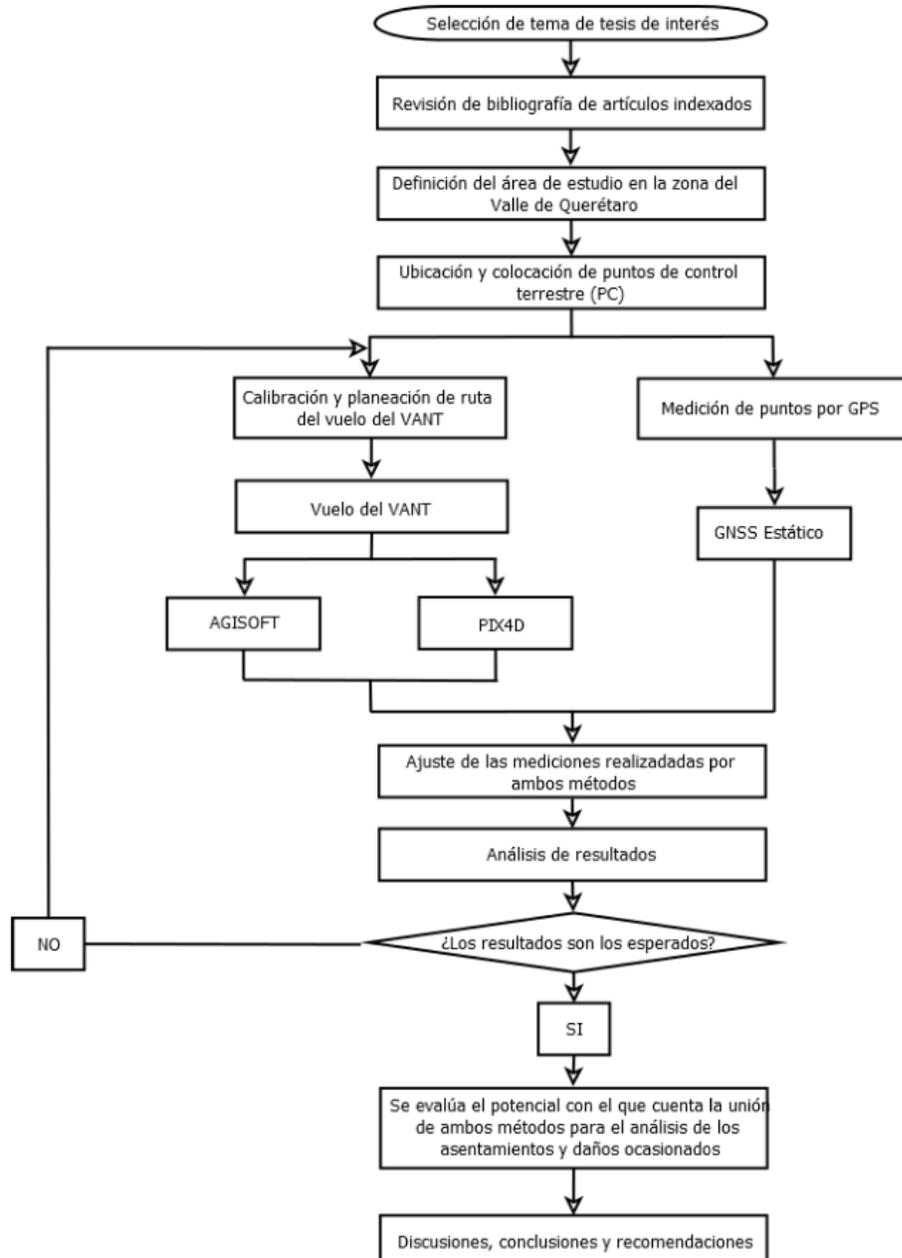


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración propia

De acuerdo con el diagrama de flujo presentado anteriormente, se describe cada una de las actividades mencionadas, consecutivamente de la descripción de los trabajos realizados para el desarrollo de esta investigación:

3.1 Recolección de información.

Se realizó la recopilación de distintos artículos de divulgación científica, así como también de normativas, circulares, libros, conferencias, tesis de posgrado, entre otras por mencionar; las cuales estaban vinculadas al uso de los vehículos aéreos no tripulados y el sistema de posicionamiento global, de la misma manera se revisó la problemática que desarrolla el fenómeno de subsidencia en el municipio de Querétaro con la finalidad de poder definir la zona más viable para el desarrollo de dicha investigación y en este sitio, se pudieran evaluar los daños que provocan las fallas por subsidencia en los pavimentos.

3.2 Definición del área de estudio.

Para delimitar el área de estudio de esta investigación, se revisó el mapa digital de México del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), para ubicar las zonas susceptibles a los problemas de subsidencia en la ciudad de Querétaro, como se muestra en la figura 9, en la cual se muestran las fallas, fracturas y el fenómeno de subsidencia, con su distinta nomenclatura.

CAPÍTULO 3 “METODOLOGÍA”

Reducción del tiempo para diagnóstico de pavimentos dañados por subsidencia mediante vehículo aéreo no tripulado y sistema de posicionamiento global

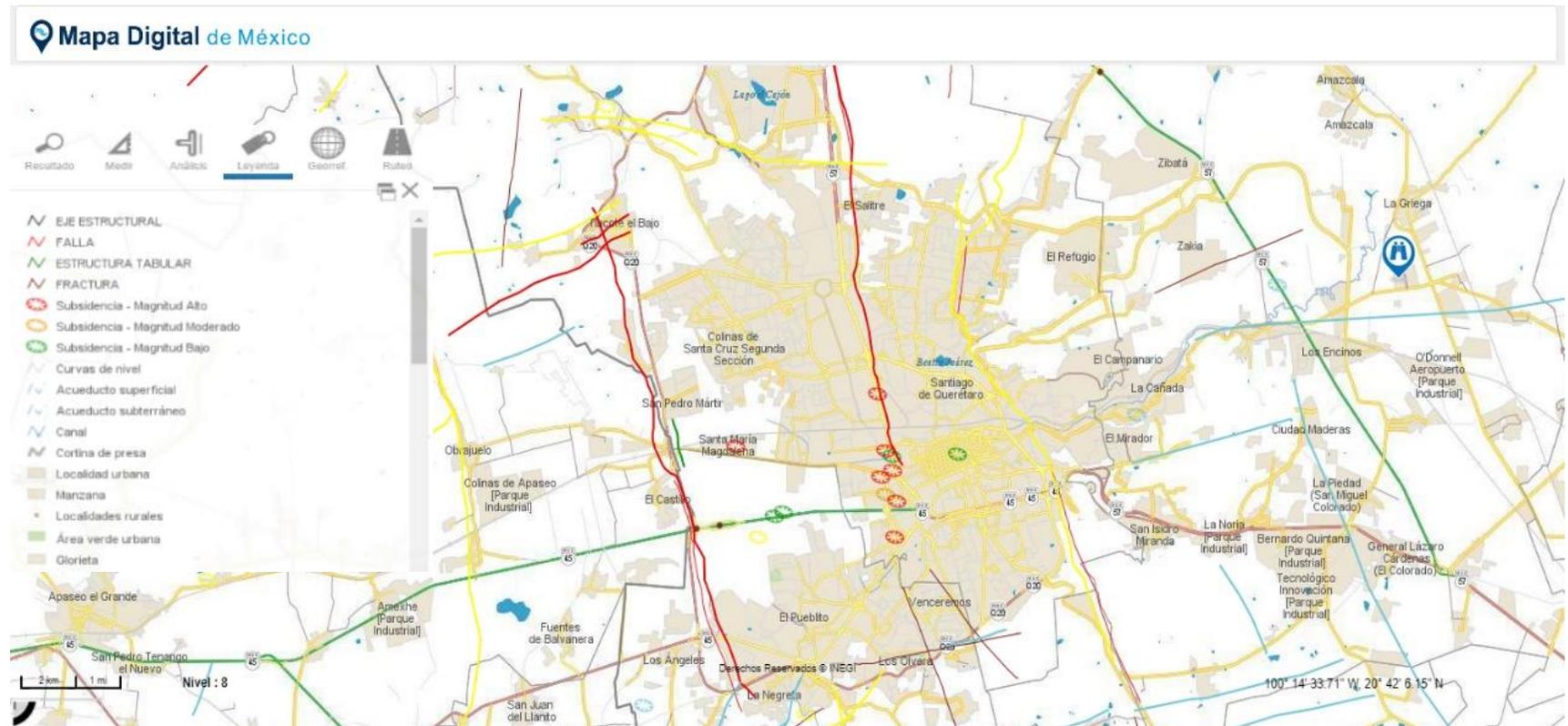


Figura 9. Principales fallas, fracturas y fenómeno de subsidencia en la ciudad de Querétaro. Fuente: INEGI (2019)

En relación a la sobreexplotación actual de agua que se encuentra en el Municipio de Querétaro, se ubicaron todos los pozos profundos operados por la Comisión Estatal de Aguas (CEA) (2021), los cuales se muestran a continuación en la figura 10:

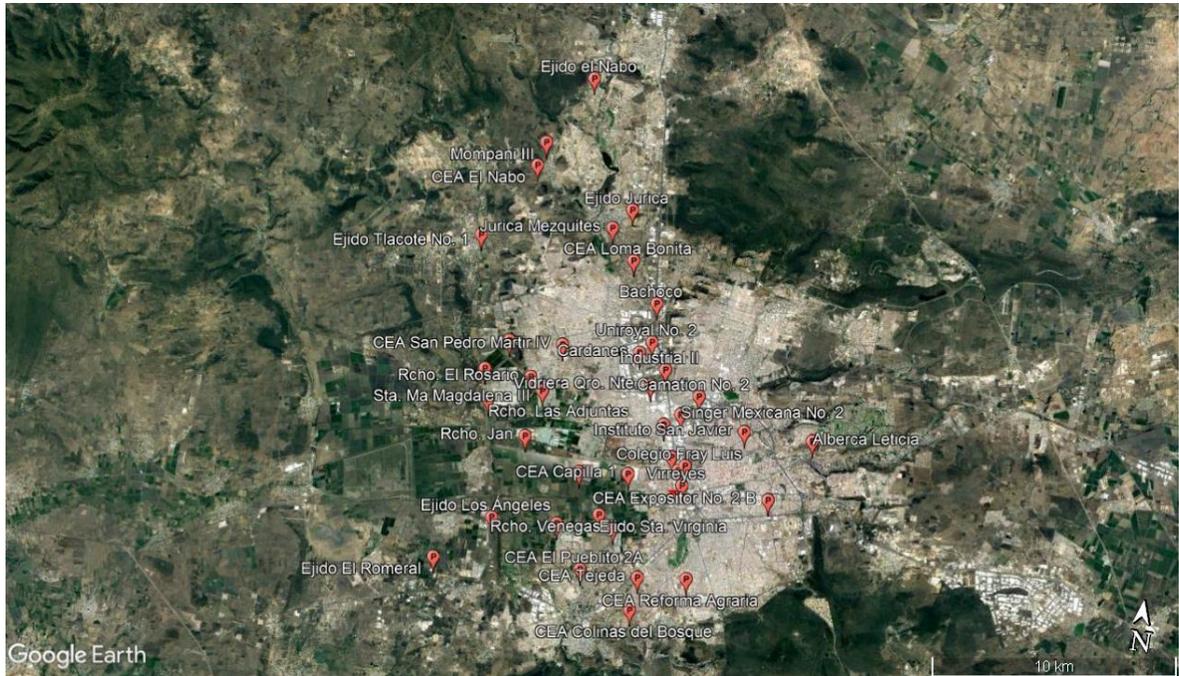


Figura 10. Ubicación de todos los pozos profundos de agua potable en el Municipio de Querétaro (2021).

Así mismo, en la figura 11 se muestran las coordenadas de los pozos profundos mostrados en la figura 10 y los niveles de cada uno de ellos en el periodo del año 2009 al 2014; de la misma manera el estado en el que se encuentra cada pozo. Cabe mencionar, que se buscó actualizar dicha información ante la CEA solicitando la ubicación mediante oficio de los pozos profundos y estaciones de bombeo de la infraestructura actual de cada uno; pero de acuerdo a su respuesta dicha información es reservada debido a que dicha infraestructura es ubicada de manera estratégica y proporcionarla pudiera representar un riesgo para la seguridad de la misma, todo lo anterior expuesto ante la segunda sesión extraordinaria de fecha 27 de mayo de 2019 del Comité de Transparencia de la CEA.

		COMISIÓN ESTATAL DE AGUAS SUBGERENCIA DE PERFORACIÓN.										
No.	No. C.N.A	Nombre del pozo	X (UTM)	Y (UTM)	Elevación de Brocal msnm	Nivel Estático Dic. 2009	Nivel Estático Dic. 2010	Nivel Estático Mayo 2011	Nivel Estático Dic. 2011	Nivel Estático Dic. 2012	Nivel Estático Dic. 2013	Nivel Estático Dic. 2014
1	759	Ejido el Nabo	347166	2292086	1,950.33	80.42	81.44	126.4	86.58	126.9	89.3	90.89
2	398-A	Mompani II	345600	2289242	1,921.61	78.24	77.9	82.7	81.95	83.45	88.65	90.89
3	2041	CEA El Nabo	345371	2288268	1,899.90	134.9	123.62	125.48	126.4	-	Operando	137.59
4	1634	Ejido Jurica	349475	2287014	1,850.00	Abejas	Abejas	70.5	70.7	Cegado	Cegado	Cegado
5	1195	Jurica Mezquites	348779	2286177	1,821.90	113.85	113.12	112.9	112.16	113.15	110.57	108
6	1983	Rcho. San Pedrito	354441	2285856	1,882.01	25.9	26.6	Tapado por piedras	Tapado por piedras	Cegado	Cegado	Cegado
7	1228-A	Ejido Tlacote No. 1	343505	2285154	1,833.50	NSPS	158.15	Operando	Sin orificio	162.45	Tiene piedras	Tiene piedras
8	1978	CEA Loma Bonita	349818	2284988	1,816.52	62.9	62.6	62.33	62.05	62.25	60.9	60.44
9	1707	CEA Garambullo No. 2	349116	2283241	1,843.00	141.7	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso	Colapso
10	1434	Bachoco	351004	2283393	1,813.73	42.5	37.49	36.3	35.8	35.4	35	33.28
11	2427	Sta. Ma. Magdalena III	348893	2279228	1,799.50	134.62	144.6	136.25	133.1	133.2	130.5	130.87
12	1010	Uniroyal No. 2	351038	2281812	1,805.07	121.77	123.05	NSPS	124.1	-	Operando	Operando
13	1973	CEA San Pedro Martir IV	347432	2281192	1,800.35	167.5	168.8	170.3	169.66	169.9	168.15	164.34
14	809-A	Rcho El Rincón	345285	2281054	1,806.28	133.15	134.3	141.79	142.94	143.3	139.7	138
15	967	Cardanes	350591	2281321	1,803.45	132.72	133.44	134.8	135.8	-	Operando	134.48
16	1322	Industrial II	351744	2280781	1,800.30	114.75	115.25	115.78	116	116.75	115.47	114.85
17	1638	Vidriera Oro. Nte.	351229	2280079	1,804.32	125.67	126.62	128.83	129.5	125.67	122.45	121.72
18	1313-A	Rcho El Rosario	348341	2279718	1,799.25	137.8	139.15	141.4	140	140.35	137.1	139.25
19	958	Camation No. 2	353259	2279899	1,807.85	112.25	109.48	cegado	cegado	cegado	Cegado	Cegado
20	963	Singer Mexicana No. 2	352618	2279064	1,807.69	130.68	131.95	NSPS	132.2	-	128.1	124.16
21	612-F	Rcho. La Colmena	344440	2279792	1,803.72	137.16	137.7	156.84	153.9	-	142.7	144.13
22	752	Alberca Leticia	358102	2278755	1,840.13	44.20	47.20	46.85	45.28	46.78	46	48.95
23	977-A	Tecnológico	351991	2278559	1,810.75	138.26	138.26	NSPS	138	134.6	129.48	129.6
24	982	Rcho. Las Adjuntas	344744	2278574	1,798.97	134.74	135.3	activo	137.1	137.4	130.25	131.56
25	1839	Instituto San Javier	355293	2278744	1,824.62	110.2	72	87.2	78.5	77.15	75.43	71.28
26	1977	Rcho. Jan	348456	2277310	1,799.44	NSPS	NSPS	66.2	65.3	-	128.75	127.2
27	745	Colegio Fray Luis	353095	2277032	1,813.83	149.78	150.1	NSPS	146.9	146.15	141.88	137.05
28	914	CEA Capilla 1	350834	2276380	1,803.06	Operando.	Operando.	141.2	141.05	139.2	133.15	127.43
29	806	Rcho. Sta. Ma. el Retablo	348846	2276173	1,801.13	82.46	59.1	seco	seco	seco	seco	seco
30	988-A	CEA Expositor No. 2-B	350650	2276136	1,818.00	Operando	174.53	175.82	175.8	175.6	165.8	164.4
31	653-A	Ejido Sta. Virginia	349900	2274577	1,803.54	98.95	100.12	98.8	99	-	96.7	97.7
32	828	Rcho. Vanegas	350536	2274107	1,805.25	143.26	144.2	144.65	142.4	-	Operando	129.07
33	629	El Cerrito Frc. 2	348247	2273979	1,807.54	143.6	144	145.44	141.1	141.85	Brocal alto (2m)	136
34	1935	Ejido Los Angeles	345579	2273859	1,837.70	164.5	Operando.	NSPS	181.48	178.5	Sonda atorada	162.5
35	841-A	CEA Tejeda	351815	2272915	1,809.01	146.0	147.7	147.85	144.85	-	141	139.3
36	1746-A	CEA El Pueblito 2A	349450	2272271	1,805.00	150.8	152.3	153.28	153.78	163.45	Operando	147.2
37	1905	CEA Reforma Agraria	353795	2272498	1,900.00	236.75	236.9	237.1	235	233	230.2	229
38	999-A	Ejido El Romeral	343449	2271929	1,829.11	165.5	Operando.	164.6	165.8	164.93	164.2	164.7
39	1239	CEA Colinas del Bosque	351693	2270923	1,830.80	65.7	70.18	71.2	72.7	No hay paso	No hay paso	No hay paso
40	1979	INSTALACIONES CEA	352500	2277300	1,808.62	133.00	129.66	135.00	133.97	134.27	132.23	131.45

Elaboró:
Ing. Ignacio Ortiz Villaseñor
Subgerente de Perforación

Figura 11. Ubicación y estado actual de los pozos profundos en el Municipio de Querétaro de la CEA, periodo 2009 – 2014 (Medellín, 2015)

Por otro lado, se revisó el Atlas de Riesgos del Municipio de Querétaro (2015), en el cual se muestra la problemática actual y se mencionan los sistemas de fallas predominantes, una de ellas el Sistema de Fallas Taxco – San Miguel de Allende con orientación norte – noroeste (NNW); y el otro sistema es llamado Chapala – Tula (SFCHT) (Aguirre *et al.*, 2012). Lo anterior, originó un arreglo

ortogonal de fallas normales formando una serie de horts, grabens y semigrabens, donde se encuentra el graben de Querétaro, lo cual se muestra en la figura 12.

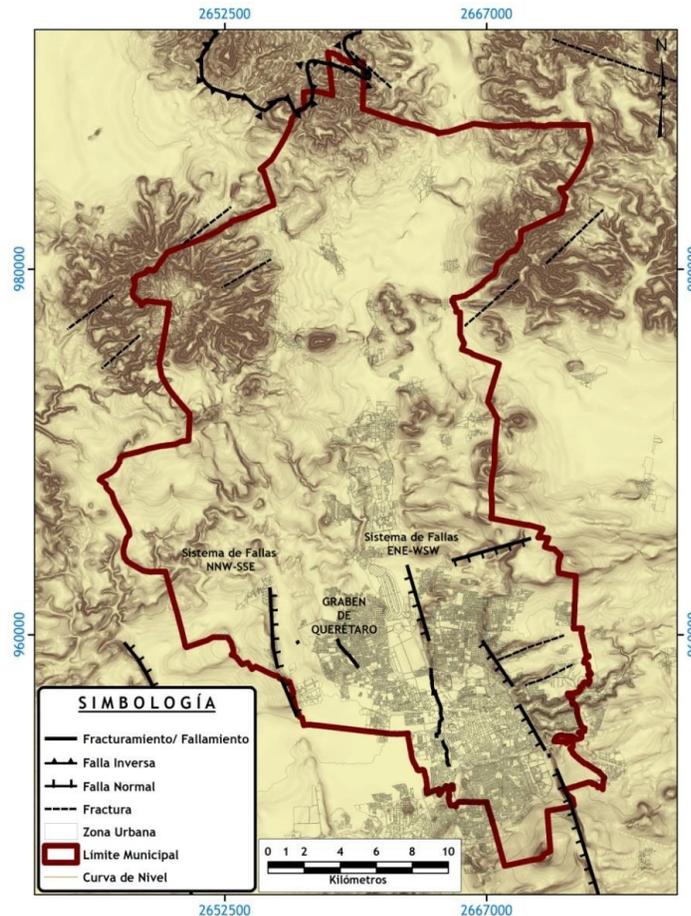


Figura 12. Localización del graben de Querétaro y ubicación de las fracturas y fallas dentro del Municipio de Querétaro. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).

Considerando lo anterior, se hizo el análisis de la mejor zona para poder realizar la investigación para lo cual, de acuerdo con estudios realizados por Carreón *et al.* (2005) y Aguirre *et al.* (2012), se verificaron los sistemas de fallas y fracturamientos en los cuales estuvieron trabajando y Protección Civil del Municipio de Querétaro (2015), volvió a mapear estos sitios concluyendo que la propagación

de estos fenómenos fueron mayores, así como también se encontraron nuevos sistemas considerando distintas características, lo cual se muestra en la figura 13.

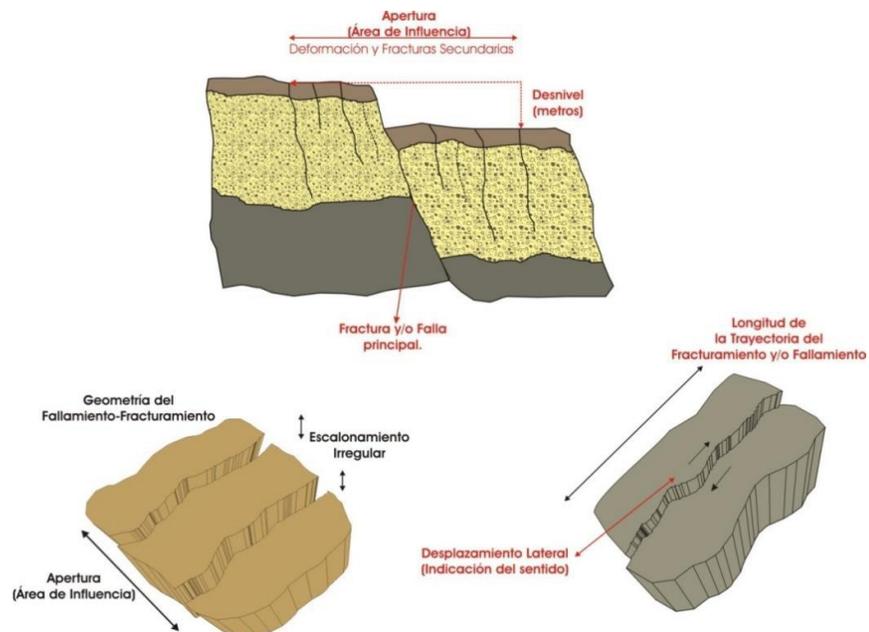


Figura 13. Elementos considerados para el nuevo mapeo de fallas y fracturas. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).

Por otra parte, se revisaron los sectores divididos por Protección Civil del Municipio de Querétaro: la parte centro (abarcando las colonias de Jardines de la Hacienda – San Pablo, mostrada en la figura 14), la parte occidental (considerando las colonias de Santa Cruz 1ra Sección – Sierra Colorada mostrada en la figura 15) y la parte oriental (colonia Centro Sur, como se muestra en la figura 16).

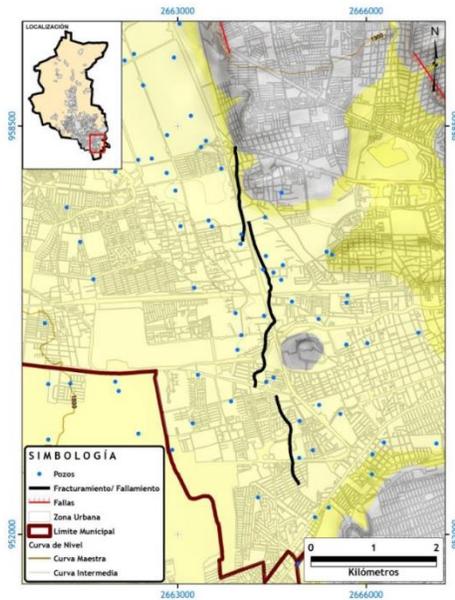


Figura 14. Sistema de fallas en la Zona Centro. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).

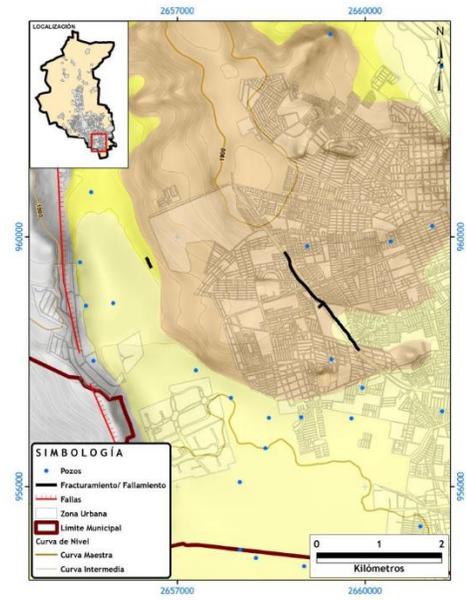


Figura 15. Sistema de fallas en la Zona Occidental. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).

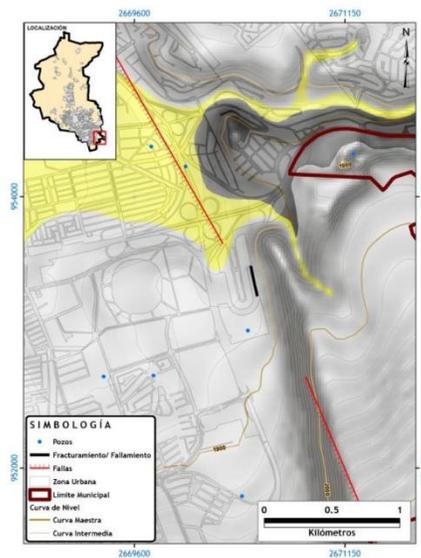


Figura 16. Sistema de fallas en la Zona Oriental. Fuente: Atlas de Riesgos de Querétaro (2015).

Como resultado de lo anterior, se pudo identificar que la zona con mayores afectaciones es la zona centro, la cual presenta una geometría lineal y curva, así mismo en estas fallas presentan desplazamientos verticales entre 0.20 a 0.90 metros y su orientación es NE – SW y NW – SE. A causa de ello, se eligió la colonia “El Ensueño” ubicada en la zona centro de acuerdo a la clasificación anterior mencionada, la cual se ubica en las zona 14 con coordenadas UTM 2276546.01 N y 352689.16 E de los cuales se estudiaron 27,224 m², en la figura 17 se muestra un croquis de la zona seleccionada en el cual se ubica la falla.



Figura 17. Ubicación de la Colonia Ensueño. Fuente: Elaboración propia con datos de Google Earth (2019)

3.3 Ubicación y colocación de puntos de control terrestres.

Se colocaron ocho puntos de control terrestre (PCT o BN, Bancos de Nivel) distribuidos en la zona de estudio para poder tener un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, los cuales fueron constituidos por placas de acero y varillas soldadas, ahogados en concreto con dimensiones de 20 x 20 x 30 centímetros (LxAxH), con la finalidad de estos estuvieran anclados al suelo y se pudieran ser medidos con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) como se muestra en las figuras 18 y 19. Ahora bien para la localización de los PCT durante el vuelo del Vehículo Aéreo No Tripulado, se utilizó una lona con una diana multicolor para cada PCT, con la finalidad de poder identificar fácilmente los puntos a la hora del procesamiento de las fotografías.



Figura 18. Colocación de punto de control.
Fuente: Elaboración propia (2019)



Figura 19. Resultado final de la colocación de punto de control. *Fuente: Elaboración propia (2019)*

Ahora bien, en la figura 20 se muestra la ubicación de los ocho PCT

distribuidos en la colonia “El Ensueño”, de los cuales seis se encuentran dentro de la falla que se presenta en dicha zona y los otros dos se utilizaron para mejorar la corrección altimétrica de dichos puntos.

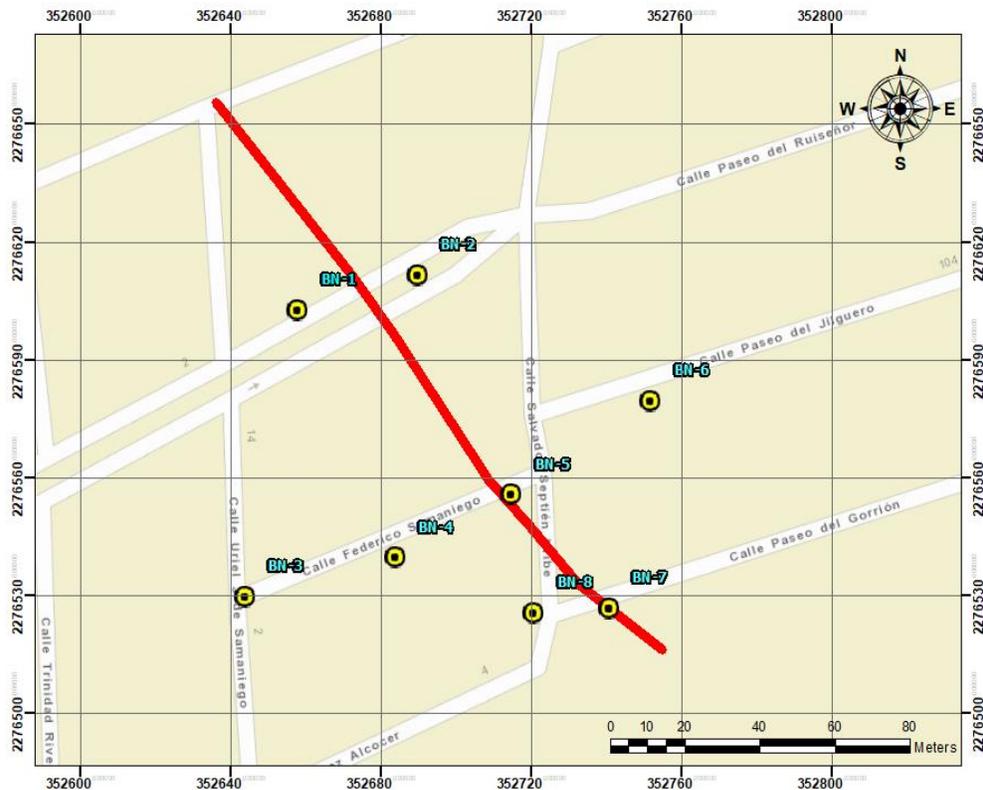


Figura 20. Ubicación de los puntos de control en la colonia Ensueño. Fuente: Elaboración propia (2019).

3.4 Calibración de VANT.

El vehículo aéreo no tripulado, se calibró mediante el control remoto con las aplicaciones móviles DJI GO y PIX4D con la finalidad de poder calibrar la brújula del mismo, así como también lente de la cámara usando objetos distantes después de despegar el VANT hasta obtener una imagen clara.

3.5 Medición y procesamiento de puntos de control terrestres.

Se utilizó un Sistema de Posicionamiento Global (GPS) en modo estático para cada uno de los ocho puntos de control terrestres colocados en el área de estudio, los cuales fueron medidos durante una hora y cada dos meses, en un periodo de doce meses, como se muestran en las figuras 21, 22, 23 y 24.



Figura 21. Medición del punto de control BN-1. Fuente: Elaboración propia (2019)



Figura 22. Medición del punto de control BN-2. Fuente: Elaboración propia (2019)



Figura 23. Medición del punto de control BN-5. Fuente: Elaboración propia (2019)



Figura 24. Medición del punto de control BN-7. Fuente: Elaboración propia (2019)

Como resultado de lo anterior se pudieron determinar las coordenadas, los movimientos y crecimiento de las zonas longitudinales en el área de estudio. Para el procesamiento de los puntos, se descargó de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI las mediciones de la estación UQRO con las coordenadas UTM 2277537.296 N y 352773.121 E ubicada en la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Querétaro, la cual es la estación activa del Estado de Querétaro, mostrada en la figura 25, posteriormente se hizo la unión con el software UNERINEX para poder unir las mediciones de las 24 horas de los días de las mediciones y el software Topcon Tools para el procesamiento de los puntos tomados con el sistema de posicionamiento global.

Coordenadas ITRF 2008 época 2010.0
Querétaro, Qro.

x

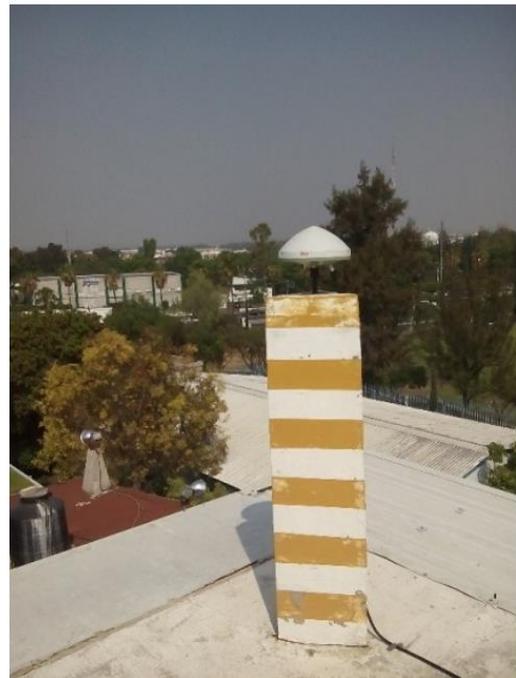


Figura 25. Estación Activa de la Red Geodésica Nacional Activa. Fuente: INEGI (2019)

3.6 Captura y procesamiento de imágenes.

La captura de las imágenes se realizó por medio de un Vehículo Aéreo No Tripulado DJI Phantom 4, el cual se vinculó a las aplicaciones móviles *DJI GO* y *Pix4D*; mediante ellas se programó el vuelo como se muestra en la figura 26 con todas las características deseadas para el anclar el vuelo realizado a los puntos de control tomados con el sistema de posicionamiento global.

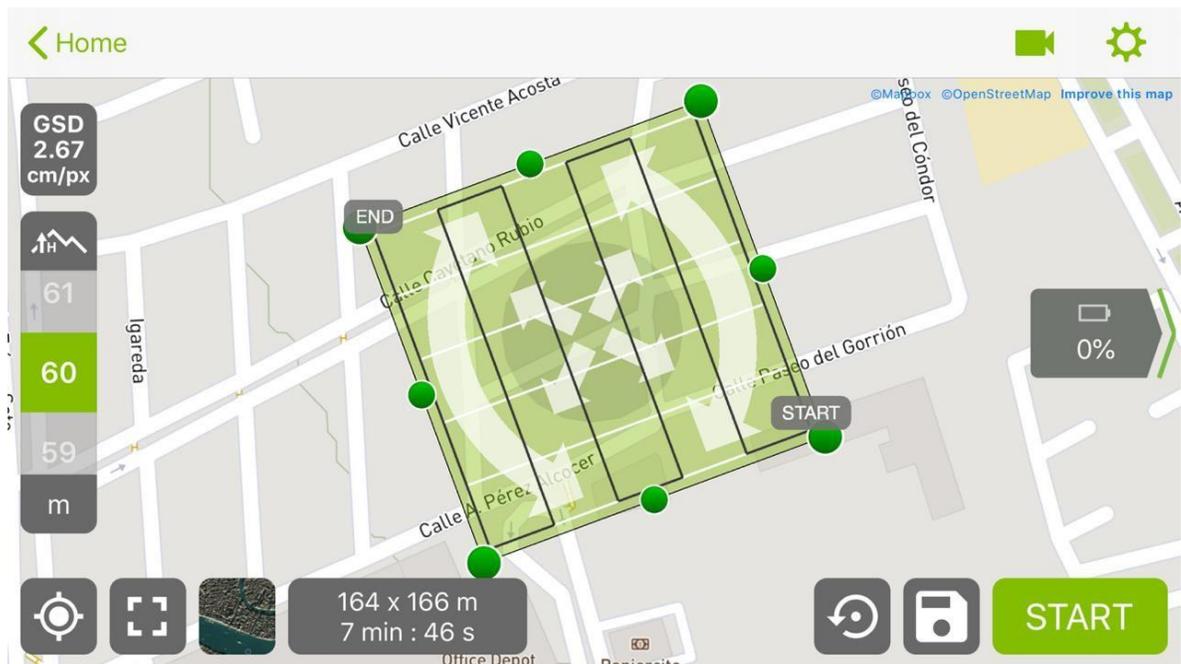


Figura 26. Ruta de vuelo en la colonia El Ensueño para el VANT.

Para el procesamiento de las imágenes se usaron el software Agisoft MetaShape y Pix4D para generar el ortomosaico y el modelo de elevación digital para cada una de las mediciones realizadas en las distintas fechas de los levantamientos; así mismo se hicieron las siguientes consideraciones para el procesamiento fotogramétrico:

- Rectificación simple: se corrigió el efecto de la imagen al obtenerla.
- Orientación interna: se recuperó la geometría de cada una de las capturas.

- Aero triangulación: a través de los puntos de control se orientaron los pares estereoscópicos.
- Restitución: donde se obtuvieron los detalles cartográficos de planimetría y altimetría para generar el modelo de elevación digital.

Así mismo, el procedimiento que se siguió para la obtención del ortomosaico y el modelo de elevación digital en el software Agisoft Metashape fue el siguiente:

1. Se inició Agisoft Metashape y se añadieron las fotografías para procesar mediante la pestaña de flujo de trabajo.
2. Se orientaron las fotografías mediante la pestaña de flujo de trabajo
3. Se creó la nube de puntos densa y posteriormente, la malla.
4. Ahora bien, se procedió a incluir los PCT mediante marcadores, identificando en todas las fotografías incluidas para el procesamiento, las dianas que fueron colocadas renombrando cada punto y anexando las coordenadas exactas obtenidas por el GPS de alta precisión, anteriormente medidas.
5. Se seleccionaron todas las fotografías, se dio clic derecho y se seleccionó desmarcar, con la finalidad de que las coordenadas con las que trabaje el procesamiento sean las coordenadas que se incluyeron anteriormente obtenidas por el GPS y no las obtenidas por el vuelo del VANT, puesto que estas pueden tener muchas deficiencias.
6. Se debe verificar el sistema de coordenadas, para que tanto los PCT y las fotografías tengan el mismo.
7. Se optimizó el cálculo de las orientaciones, y seguido de ello se volvió a crear la nube de puntos densa y la malla, a través de la pestaña de flujo de trabajo.
8. Ahora bien, se tiende a clasificar los puntos del terreno mediante la pestaña herramientas, nube de puntos densa y clasificar los puntos deseados.
9. Se procede a crear la textura mediante la pestaña de flujo de trabajo, y después de ello, el modelo de teselas.

10. Para crear el modelo digital de elevaciones, se debe seleccionar la pestaña flujo de trabajo y seleccionar la opción de crear el MDE, desde la capa de clase de puntos de terreno.
11. Posterior a ello, mediante la pestaña de flujo de trabajo, se crea el ortomosaico de las fotografías procesadas.
12. Como último paso, se tiene a hacer la exportación de los archivos deseados y la generación del reporte del procesamiento, todo esto mediante la pestaña del menú archivo.

Por otro lado, el procedimiento que se siguió para la obtención del ortomosaico y el modelo de elevación digital en el software Pix4D fue el siguiente:

1. Se inició el software Pix4D y se creó un nuevo proyecto, se le otorga un nombre al proyecto y se deben seleccionar todas las fotografías del vuelo. Es importante verificar que el sistema de coordenadas es el correcto, las unidades y la zona UTM.
2. Para procesar y añadir los PCT, en las opciones de procesamiento solo seleccionar el punto de “Procesamiento Inicial”, ir las opciones de procesamiento y seleccionar que el procesamiento sea completo e iniciar.
3. Al terminar verificar el reporte de calidad que genera automáticamente y revisar que las características no se encuentre con una advertencia en rojo, si esto no ocurre continuar con el procesamiento, si pasa lo contrario verificar que las fotografías sean consistentes.
4. Ahora se deben importar los PCT, ya sean en formato de .csv, .xls o .txt, los cuales deben contar con una estructura sea en X, Y y Z. siendo así, ir a la opción “Gestor GCP/MTP” y seleccionar “Puntos de Apoyo” y anexar el archivo que contenga los PCT.
5. Se puede ver que en las capas, aparece una nueva llamada “GCPs/MTPs” el cual contiene los PCT que fueron exportados con anterioridad. Seleccionar con un clic el primer PCT y aparecerá del lado derecho una ventana donde se

mostrarán todas las fotografías que se encuentra el PCT y se tendrá que ir ajustando cada imagen para tener una mejor precisión del modelo, al terminar seleccionar “Aplicar” para que se correlacione toda la información. Dicho procedimiento se tiene que realizar para todos los PCT, realizado esto se debe seleccionar “Reoptimizar” y este tomará los PCT para el modelo.

6. Cuando se ha reoptimizado el modelo, se procede a continuar con el procesamiento de los datos, seleccionando el punto 2 de “Nube de Puntos y Malla” y el punto 3 de “MDS, Ortomosaicos e Índices” para terminar el proceso y posteriormente sea analizado.
7. Posteriormente, se revisa que el informe de calidad generado no tenga ningún problema y se verifica que el modelo corresponda con los PCT y toda la información procesada.
8. Finalmente ir a la pestaña “Procesar” y seleccionar las opciones de “Generar MDT”, es así como se obtiene los modelos y de esta manera pueden ser exportados a otros softwares para su análisis

Cabe mencionar, que se realizó el procesamiento de las fotografías con ambos software, con la finalidad de poder realizar una comparación de los resultados de los mismos y observar los cambios o diferencias que podría tener cada uno, por lo cual se muestran los resultados obtenidos en el siguiente capítulo.

Prosiguiendo con el análisis para la identificación de los agrietamientos y asentamientos en los pavimentos de la colonia “El Ensueño”, con la serie de pasos mencionados anteriormente, se obtuvieron ortomosaicos de la zona y a través de ellos, se pudo hacer un reconocimiento de los daños que presentan los diferentes tipos de pavimentos, los cuales en su mayoría es concreto rígido reparado con concreto asfáltico y adoquín, este último es funcional en la zona de la falla, debido a que este se adapta a los asentamientos que presenta la colonia. Dicho análisis se describe mejor en el siguiente capítulo.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describen los resultados obtenidos de la metodología mencionada anteriormente, donde se mencionan los principales procesamientos de datos obtenidos del sistema de posicionamiento global y de los vuelos del vehículo aéreo no tripulado en el área de estudio para describir la problemática y la identificación de daños ocasionados por el fenómeno subsidencia.

4.1 Procesamiento de datos del Sistema de Posicionamiento Global

Los resultados del procesamiento de los puntos de control terrestre fueron tomados con un GPS SOKKIA GRX2 en modo estático y procesados en el software Topcon Tools y georeferenciados a la Red Geodésica Nacional Activa de INEGI,

Para la primera medición de los puntos realizada el 22 de noviembre de 2019 y del procesamiento realizado, se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales son mostrados en las figuras 27 y 28:

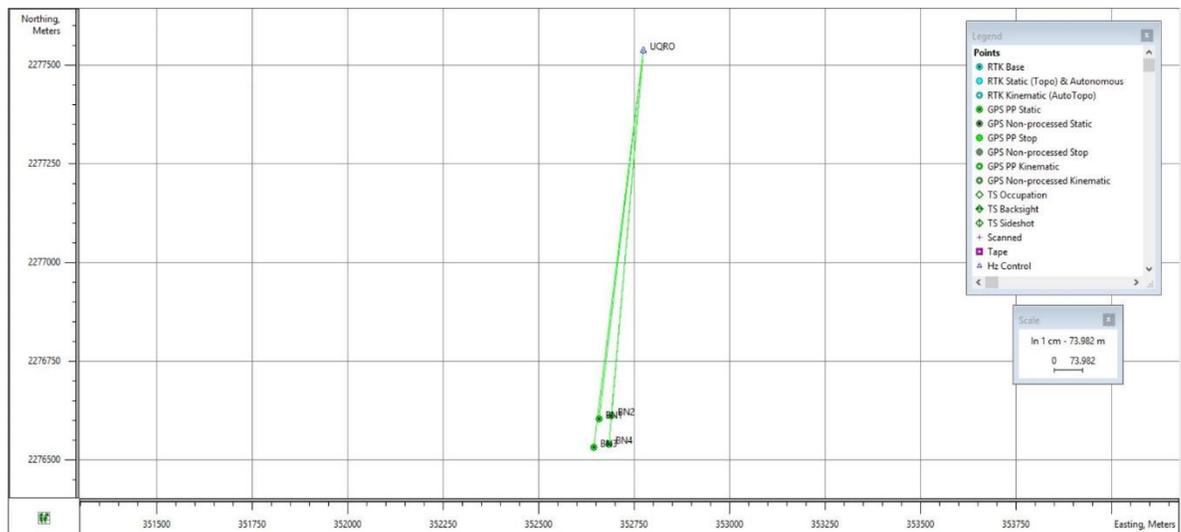


Figura 27. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 1. Fuente: Elaboración propia (2019)

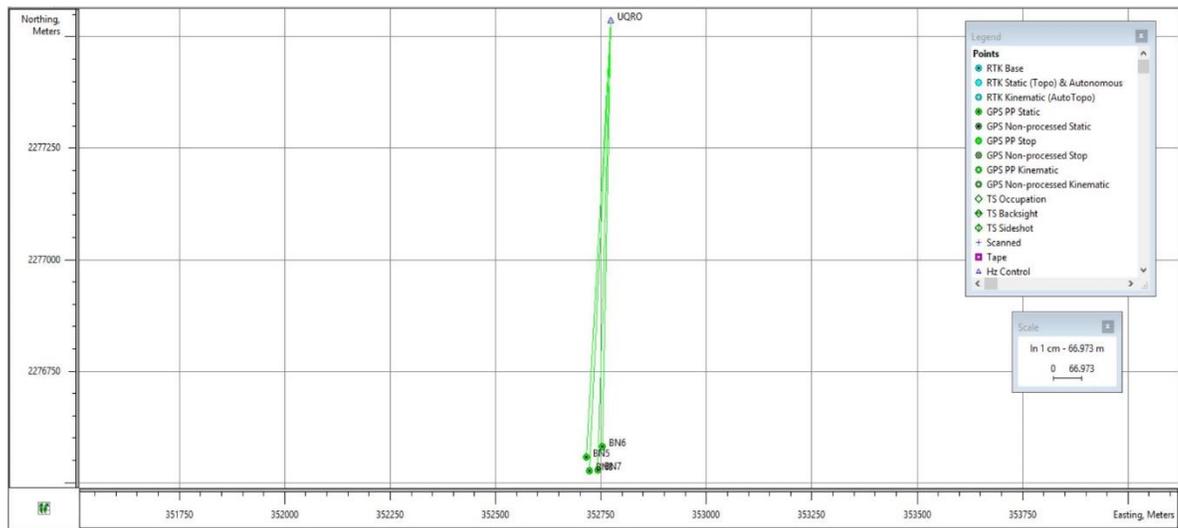


Figura 28. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 1. Fuente: Elaboración propia (2019)

Posteriormente, mediante el postprocesamiento se obtuvieron las siguientes elevaciones de los PCT, las cuales se muestran en la tabla 5:

Tabla 5. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 1.

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
	Norte	Este	Fecha
			22/11/2019
			Medición 1
BN - 1	2276603.172	352658.640	1799.990
BN - 2	2276612.117	352690.927	1801.213
BN - 3	2276530.970	352644.985	1799.848
BN - 4	2276540.409	352684.722	1800.064
BN - 5	2276556.600	352715.471	1800.893
BN - 6	2276580.704	352752.989	1801.601
BN - 7	2276527.735	352741.952	1801.091
BN - 8	2276526.361	352721.866	1800.211

Fuente: Elaboración propia (2019)

La segunda medición de los puntos se realizó el día 24 de enero de 2020, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 29 y 30:

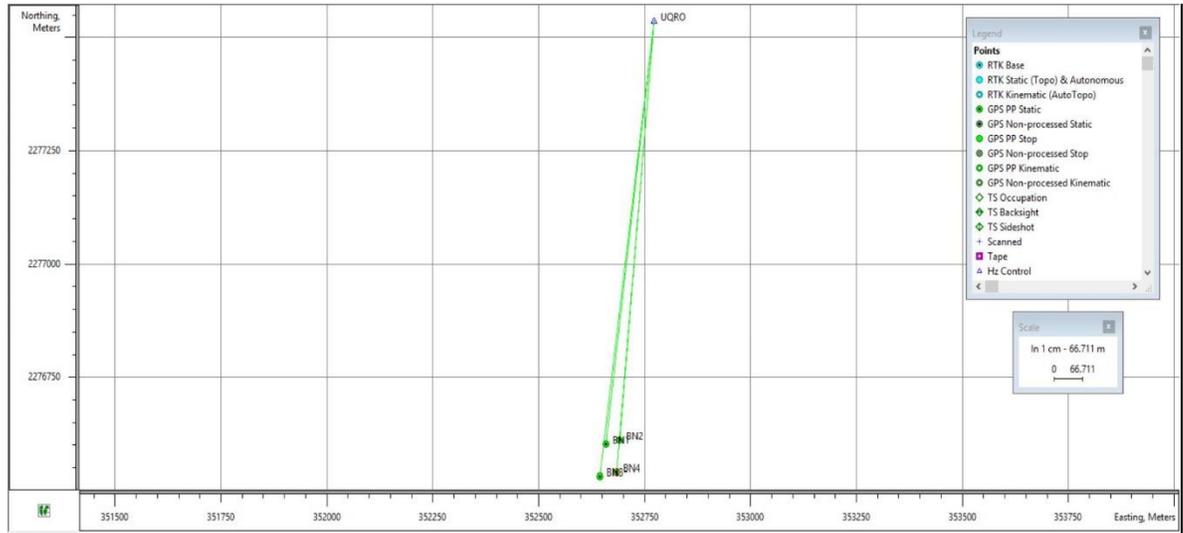


Figura 29. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)

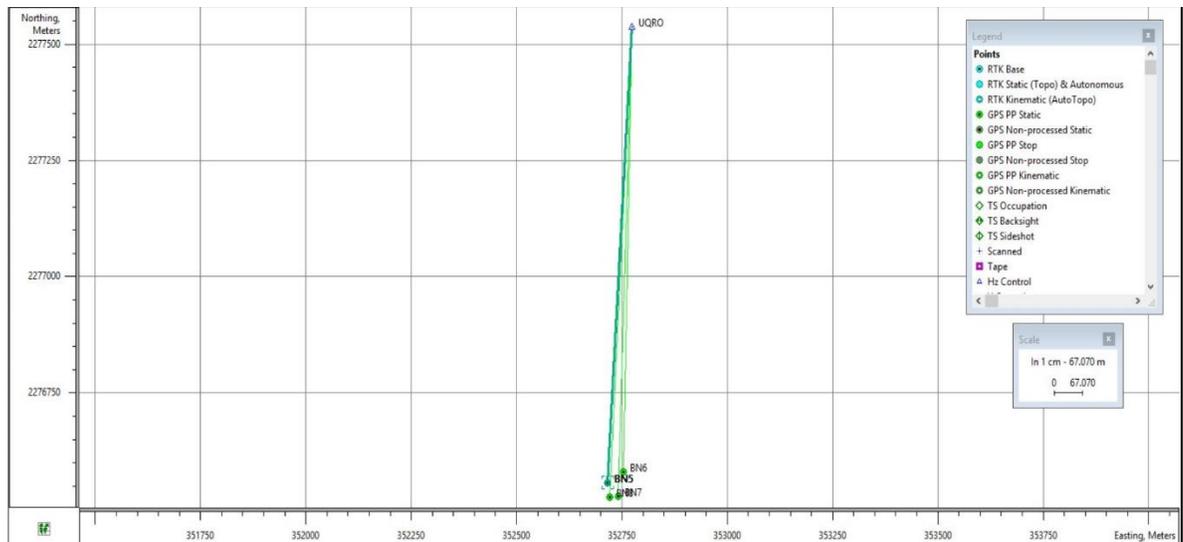


Figura 30. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon de la Medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)

Mediante el postprocesamiento se obtuvieron las siguientes elevaciones de los PCT, las cuales se muestran en la tabla 6:

Tabla 6. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 2.

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
			Fecha
	Norte	Este	24/01/2020
BN - 1	2276603.172	352658.640	1799.989
BN - 2	2276612.117	352690.927	1801.213
BN - 3	2276530.970	352644.985	1799.848
BN - 4	2276540.409	352684.722	1800.063
BN - 5	2276556.600	352715.471	1800.892
BN - 6	2276580.704	352752.989	1801.597
BN - 7	2276527.735	352741.952	1801.080
BN - 8	2276526.361	352721.866	1800.200

Fuente: Elaboración propia (2020)

La tercera medición de los puntos se realizó el día 18 de marzo de 2020, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 31 y 32:

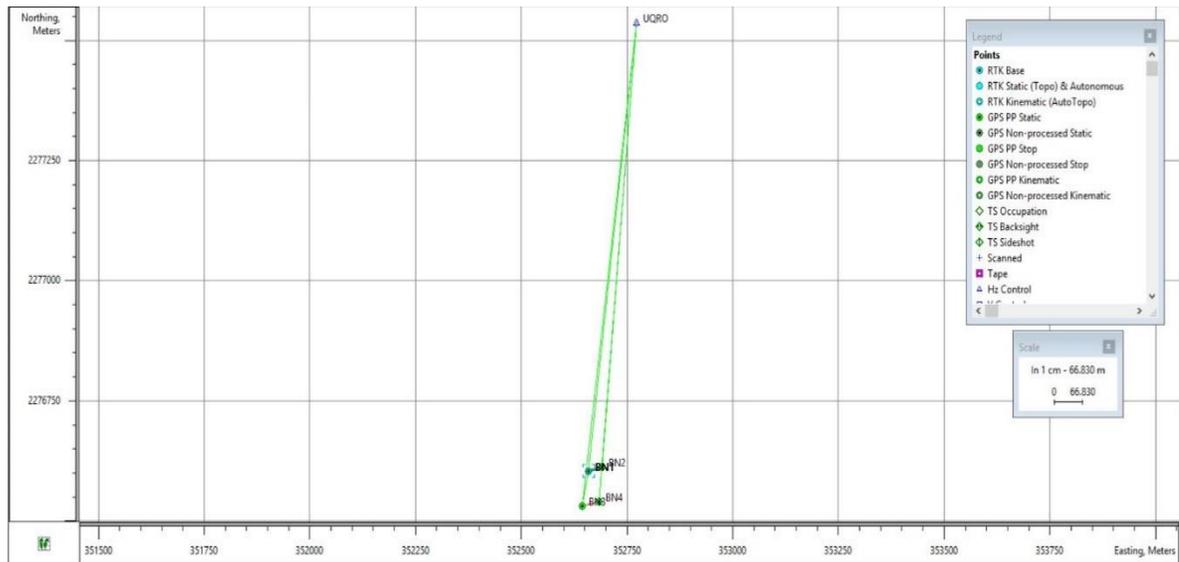


Figura 31. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)

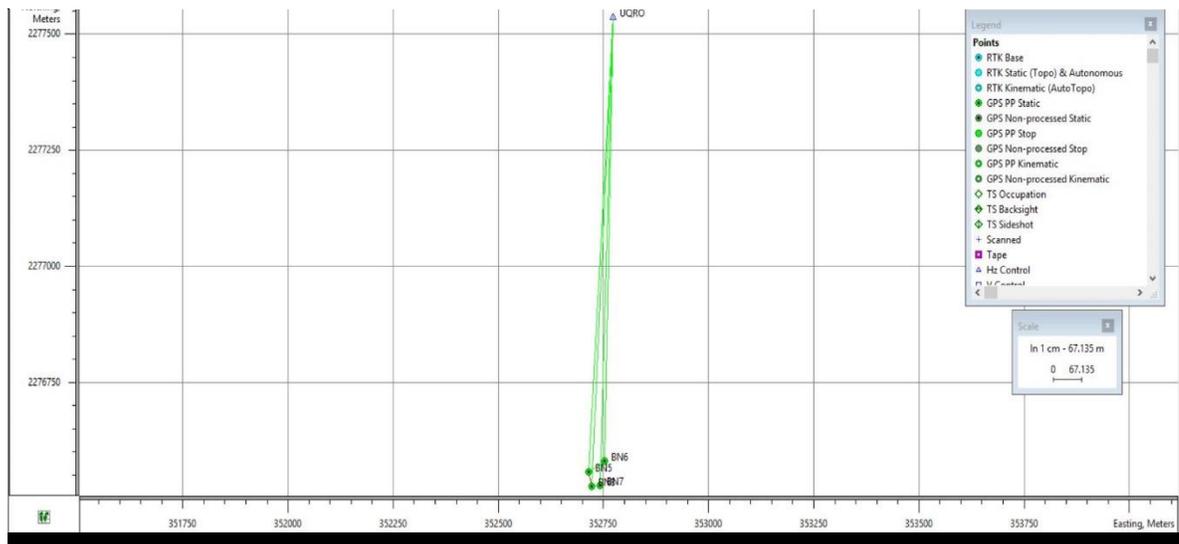


Figura 32. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)

Mediante el postprocesamiento se obtuvieron las siguientes elevaciones de los PCT, las cuales se muestran en la tabla 7:

Tabla 7. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 3.

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
	Norte	Este	Fecha
			18/03/2020
			Medición 3
BN - 1	2276603.172	352658.640	1799.986
BN - 2	2276612.117	352690.927	1801.211
BN - 3	2276530.970	352644.985	1799.835
BN - 4	2276540.409	352684.722	1800.060
BN - 5	2276556.600	352715.471	1800.890
BN - 6	2276580.704	352752.989	1801.592
BN - 7	2276527.735	352741.952	1801.078
BN - 8	2276526.361	352721.866	1800.194

Fuente: Elaboración propia (2020)

La cuarta medición de los puntos se realizó el día 16 de agosto de 2020, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 33 y 34:

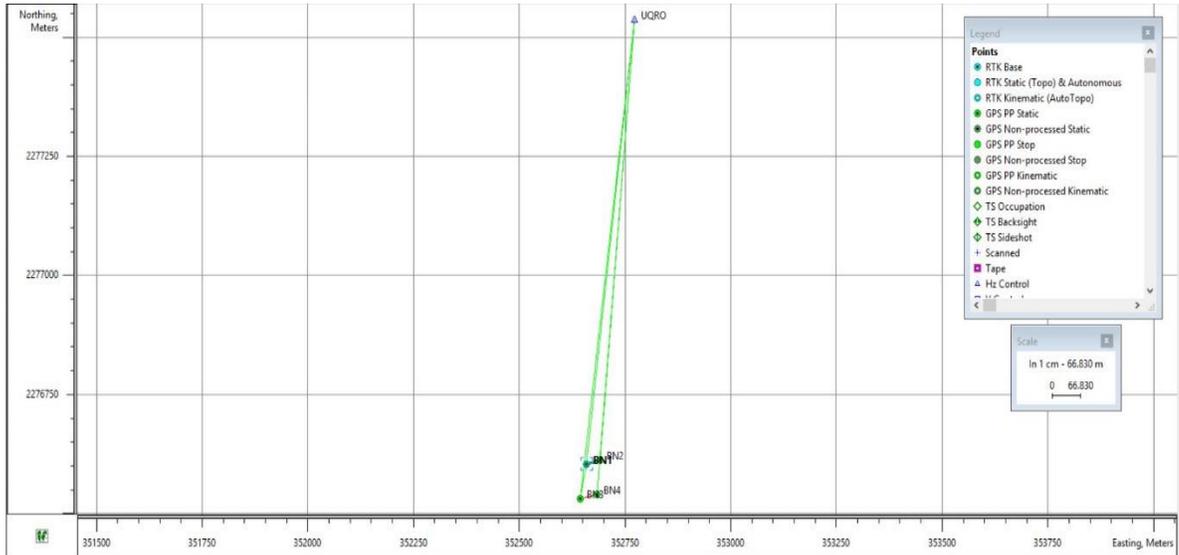


Figura 33. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

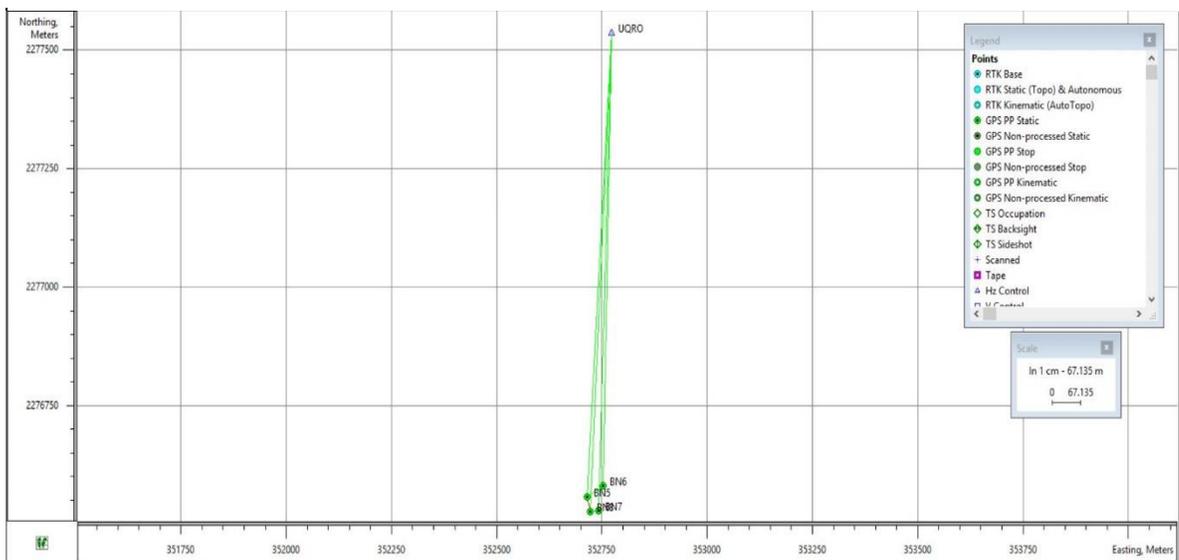


Figura 34. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

Mediante el postprocesamiento se obtuvieron las siguientes elevaciones de los PCT, las cuales se muestran en la tabla 8:

Tabla 8. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 4.

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
			Fecha
	Norte	Este	16/08/2020
BN - 1	2276603.172	352658.640	1799.985
BN - 2	2276612.117	352690.927	1801.208
BN - 3	2276530.970	352644.985	1799.832
BN - 4	2276540.409	352684.722	1800.060
BN - 5	2276556.600	352715.471	1800.887
BN - 6	2276580.704	352752.989	1801.591
BN - 7	2276527.735	352741.952	1801.072
BN - 8	2276526.361	352721.866	1800.184

Fuente: Elaboración propia (2020)

La quinta medición de los puntos se realizó el día 19 de octubre de 2020, obteniendo los resultados mostrados en las figuras 35 y 36:

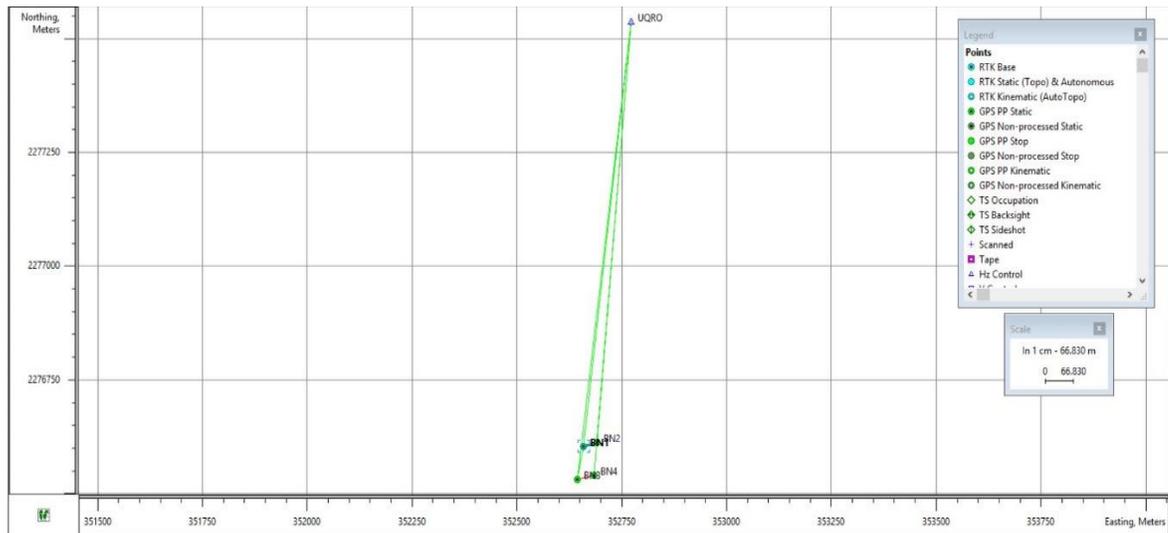


Figura 35. Procesamiento de puntos de control del 1 al 4 con el software Topcon Tools de la Medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)

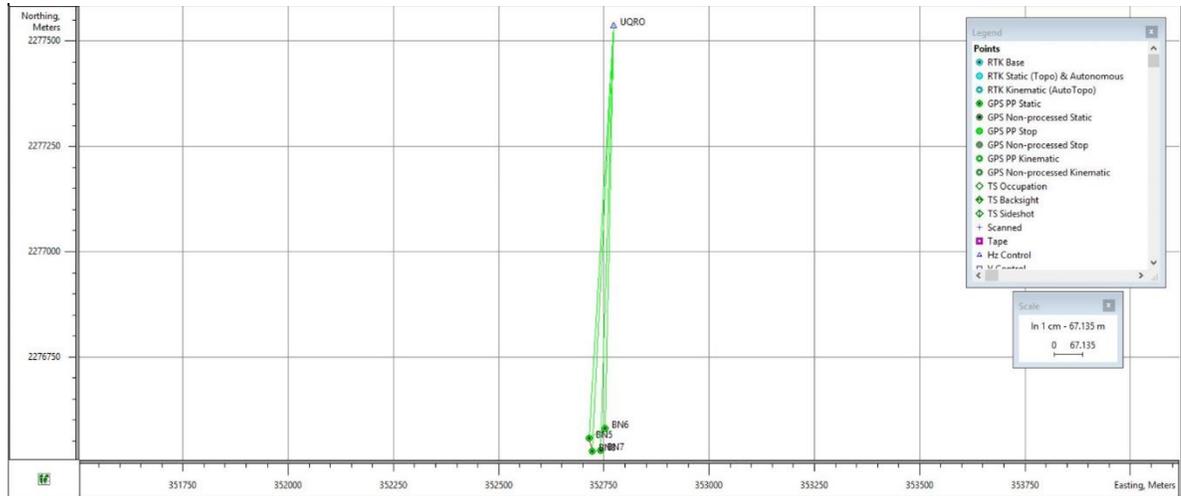


Figura 36. Procesamiento de puntos de control del 5 al 8 con el software Topcon Tools de la Medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)

Mediante el postprocesamiento se obtuvieron las siguientes elevaciones de los PCT, las cuales se muestran en la tabla 9:

Tabla 9. Coordenadas y elevaciones de puntos de control de la Medición 5.

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
	Norte	Este	19/10/2020 Medición 5
BN - 1	2276603.172	352658.640	1799.976
BN - 2	2276612.117	352690.927	1801.206
BN - 3	2276530.970	352644.985	1799.831
BN - 4	2276540.409	352684.722	1800.059
BN - 5	2276556.600	352715.471	1800.888
BN - 6	2276580.704	352752.989	1801.591
BN - 7	2276527.735	352741.952	1801.073
BN - 8	2276526.361	352721.866	1800.154

Fuente: Elaboración propia (2020)

4.2 Procesamiento de imágenes capturadas por el VANT

Las imágenes fueron procesadas capturadas por un vehículo aéreo no tripulado DJI Phantom 4, los vuelos realizados fueron realizados mediante la aplicación móvil Pix4D mediante un mallado doble para la creación de un modelo 3D y procesados mediante los softwares Agisoft MetaShape y Pix4Dmapper.

En el caso de Agisoft MetaShape, se obtuvieron los siguientes datos; para la medición 1 realizada el día 21 y 22 de noviembre de 2019, se muestra en la figura 37 el ortomosaico creado a partir del vuelo del VANT realizado el 26 de noviembre de 2019, posteriormente se muestran las posiciones de los puntos de apoyo y estimaciones de errores en la figura 38, ambas obtenidas mediante el Agisoft MetaShape.



Figura 37. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020)

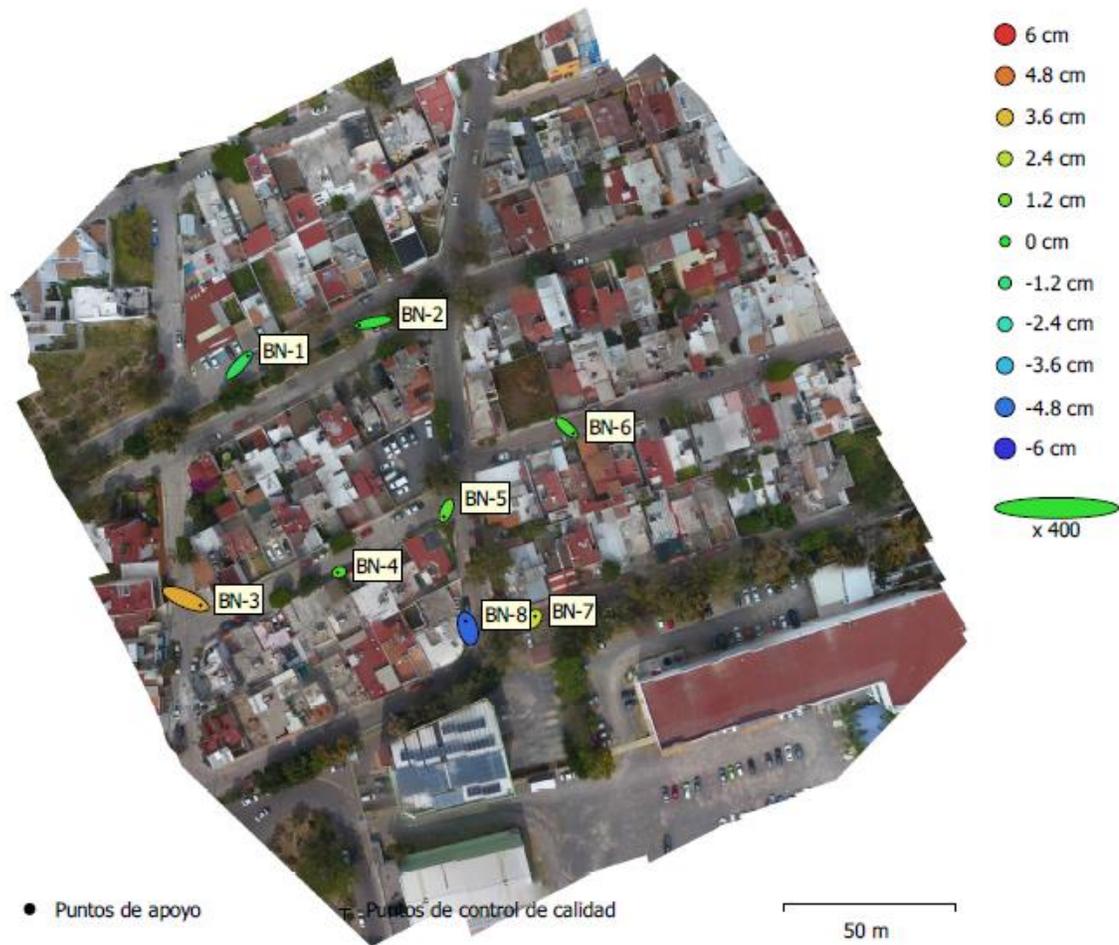


Figura 38. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 1.

De la misma manera, se obtiene el error de los puntos de control del procesamiento, el cual se muestra en la tabla 10:

Tabla 10. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 1.

Punto de Control Terrestre	X	Y	Z	Error Total	Imagen
	Error (cm)	Error (cm)	Error (cm)	(cm)	(pix)
BN - 1	1.25123	1.35207	-0.77982	2.00045	0.411 (11)
BN - 2	-2.02027	-0.38639	-0.17519	2.06434	0.356 (20)
BN - 3	2.18854	-0.92092	3.93576	4.59652	0.096 (2)
BN - 4	-0.23495	-0.07642	0.58393	0.63405	0.522 (18)
BN - 5	-0.38655	-0.89063	0.87451	1.30668	0.403 (32)
BN - 6	0.96026	-0.86348	0.41465	1.35633	0.461 (26)
BN - 7	0.27663	0.39722	2.70648	2.74943	0.537 (22)
BN - 8	-0.29510	1.05878	-5.09026	5.20757	0.511 (15)
TOTAL	1.21074	0.84031	2.51601	2.91587	0.456

Fuente: Elaboración propia (2019).

Se obtuvo el MDT el cual se mostrado en la figura 39 y el MDS del área de estudio, el cual se muestra en la figura 40, donde se muestra una altura máxima de 1.81 km y una altura mínima de 1.79 km, con una resolución de 9.24 cm/pix y una densidad de puntos de 117 puntos por m².

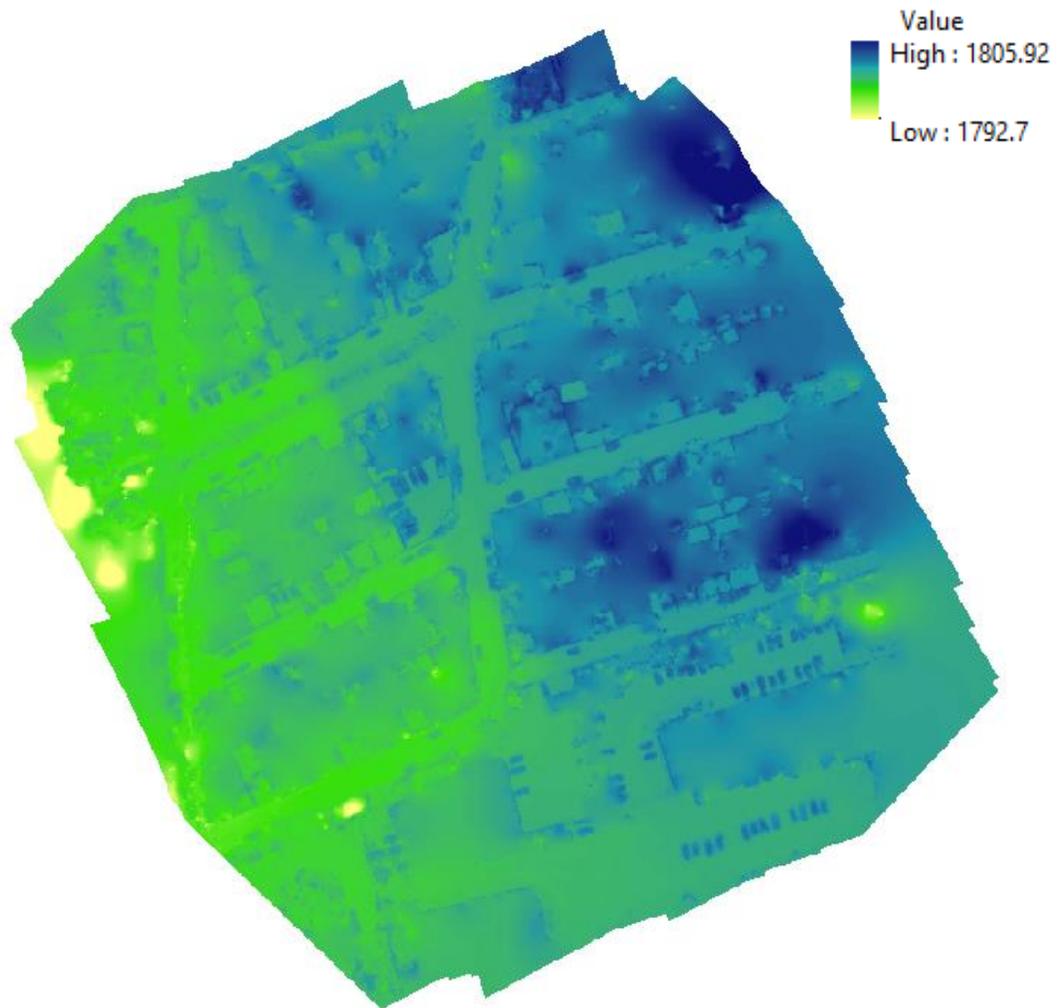


Figura 39. Reconstrucción del MDT de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020)

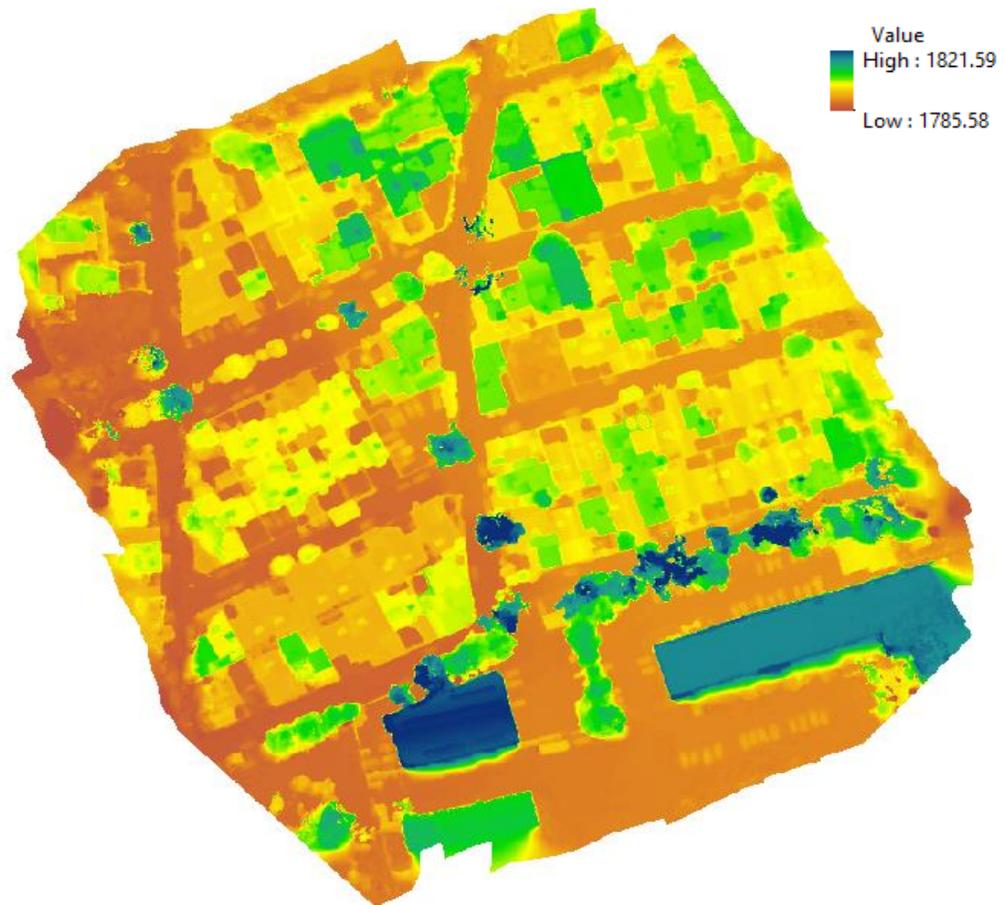


Figura 40. Reconstrucción del MDS de la medición 1. Fuente: Elaboración propia (2020)

Para la medición 2 realizada el día 24 de enero de 2020, se muestra en la figura 41 el ortomosaico creado a partir del vuelo del VANT realizado el 27 de enero de 2020, seguido de ello se muestran las posiciones de los puntos de apoyo y estimaciones de errores en la figura 42, ambas obtenidas mediante el Agisoft MetaShape.



Figura 41. *Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)*

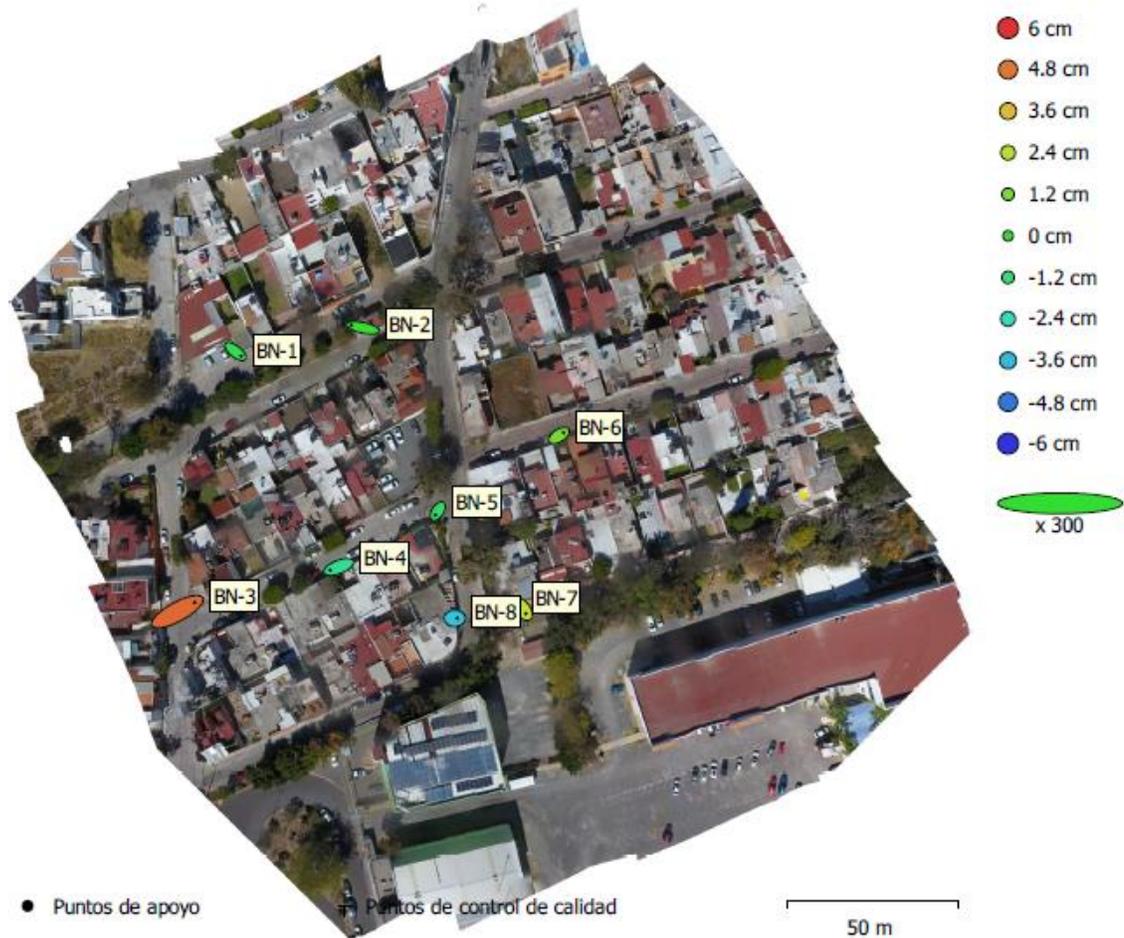


Figura 42. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)

De la misma manera, se obtiene el error de los puntos de control del procesamiento, el cual se muestra en la tabla 11:

Tabla 11. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 2.

Punto de Control Terrestre	X	Y	Z	Error Total	Imagen
	Error (cm)	Error (cm)	Error (cm)	(cm)	(pix)
BN -1	1.09077	-0.86421	-0.55116	1.49680	0.550 (18)
BN - 2	-2.25418	0.46964	0.100338	2.30477	0.492 (19)
BN - 3	3.32980	1.81189	5.04089	6.30723	0.537 (3)
BN - 4	-1.69145	-0.65299	-1.67019	2.46514	0.554 (17)
BN - 5	-0.48529	-0.74441	-0.83369	1.21849	0.460 (30)
BN - 6	0.88988	0.55592	1.18813	1.58512	0.576 (24)
BN - 7	0.68351	-0.89239	2.61931	2.85032	0.588 (20)
BN - 8	0.48696	0.00396	-3.41611	3.45064	0.492 (14)
TOTAL	1.65648	0.88997	2.47869	3.11125	0.530

Fuente: Elaboración propia (2020).

Se obtuvo el MDT el cual se mostrado en la figura 43 y el MDS del área de estudio, el cual se muestra en la figura 44, donde se muestra una altura máxima de 1.80 km y una altura mínima de 1.80 km, con una resolución de 9.06 cm/pix y una densidad de puntos de 122 puntos por m².

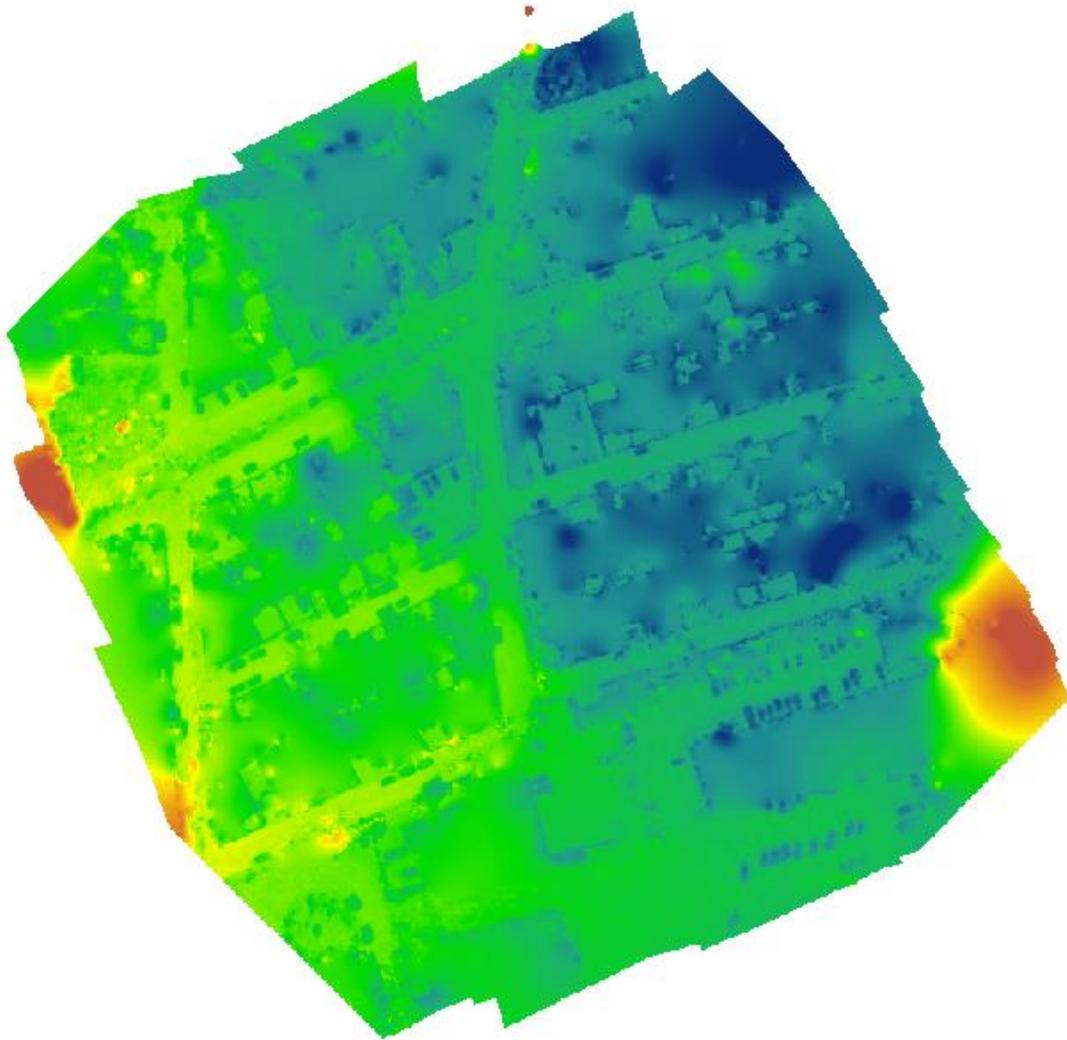


Figura 43. Reconstrucción del MDT de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)

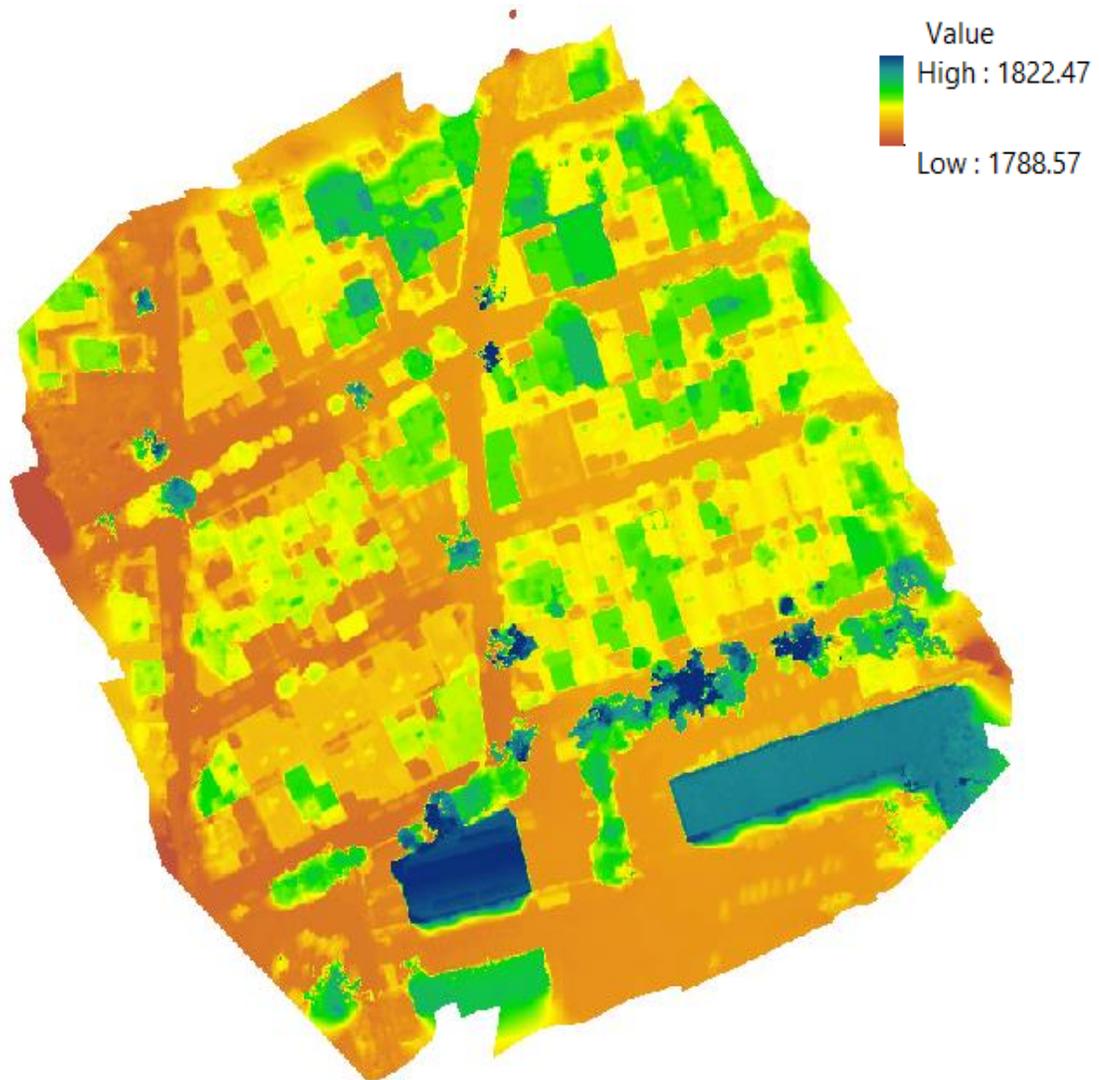


Figura 44. Reconstrucción del MDS de la medición 2. Fuente: Elaboración propia (2020)

Para la medición 3 realizada el día 18 de marzo de 2020, se muestra en la figura 45 el ortomosaico, así como también se muestran las posiciones de los puntos de apoyo y estimaciones de errores en la figura 46, ambas obtenidas mediante el Agisoft MetaShape.



Figura 45. *Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)*

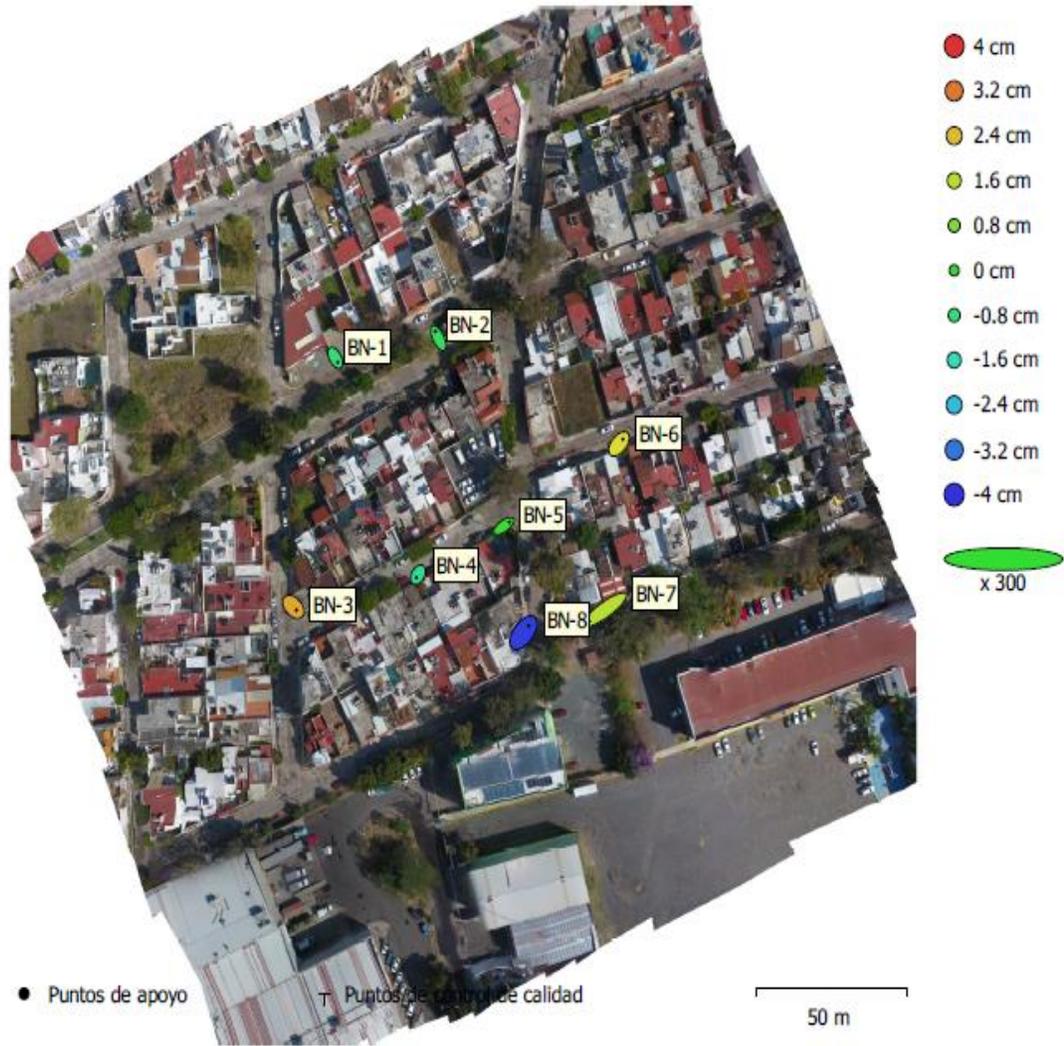


Figura 46. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)

De la misma manera, se obtiene el error de los puntos de control del procesamiento, el cual se muestra en la tabla 12:

Tabla 12. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 3.

Punto de Control Terrestre	X	Y	Z	Error Total	Imagen
	Error (cm)	Error (cm)	Error (cm)	(cm)	(pix)
BN -1	0.54558	-0.85210	-0.77187	1.27261	0.569 (25)
BN - 2	-0.69550	1.30291	-0.49045	1.55623	0.564 (19)
BN - 3	0.69251	-0.63706	2.64697	2.80925	0.727 (17)
BN - 4	-0.37342	-0.57311	-1.17107	1.35210	0.426 (20)
BN - 5	1.23250	0.76433	0.12368	1.45552	0.552 (19)
BN - 6	0.82836	0.89892	2.01500	2.35679	0.824 (11)
BN - 7	-3.42964	-2.21780	1.55450	4.37007	0.439 (17)
BN - 8	1.16486	1.34304	-3.85051	4.24112	0.519 (14)
TOTAL	1.44590	1.18705	1.95360	2.70486	0.576

Fuente: Elaboración propia (2020).

Se obtuvo el MDT el cual se mostrado en la figura 47 y el MDS del área de estudio, el cual se muestra en la figura 48, donde se muestra una altura máxima de 1.81 km y una altura mínima de 1.79 km, con una resolución de 9.32 cm/pix y una densidad de puntos de 115 puntos por m².

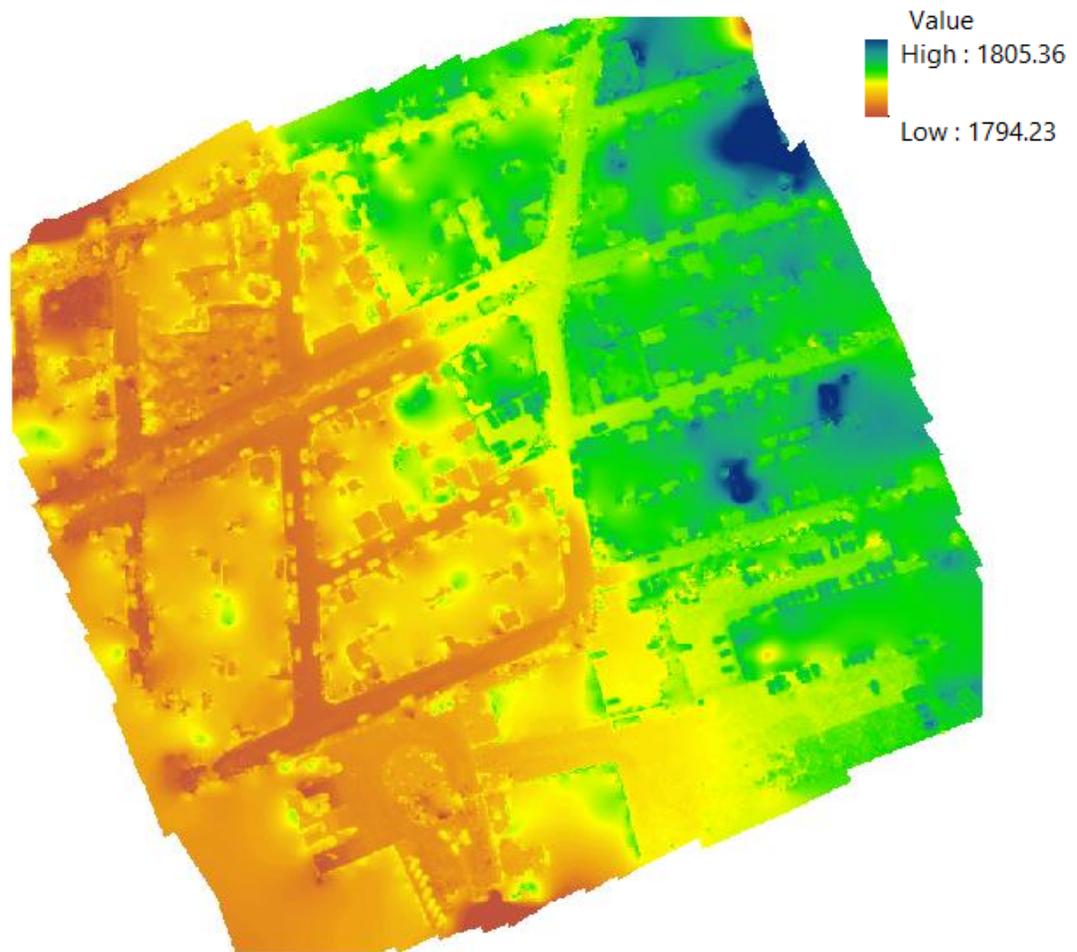


Figura 47. Reconstrucción del MDT de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)

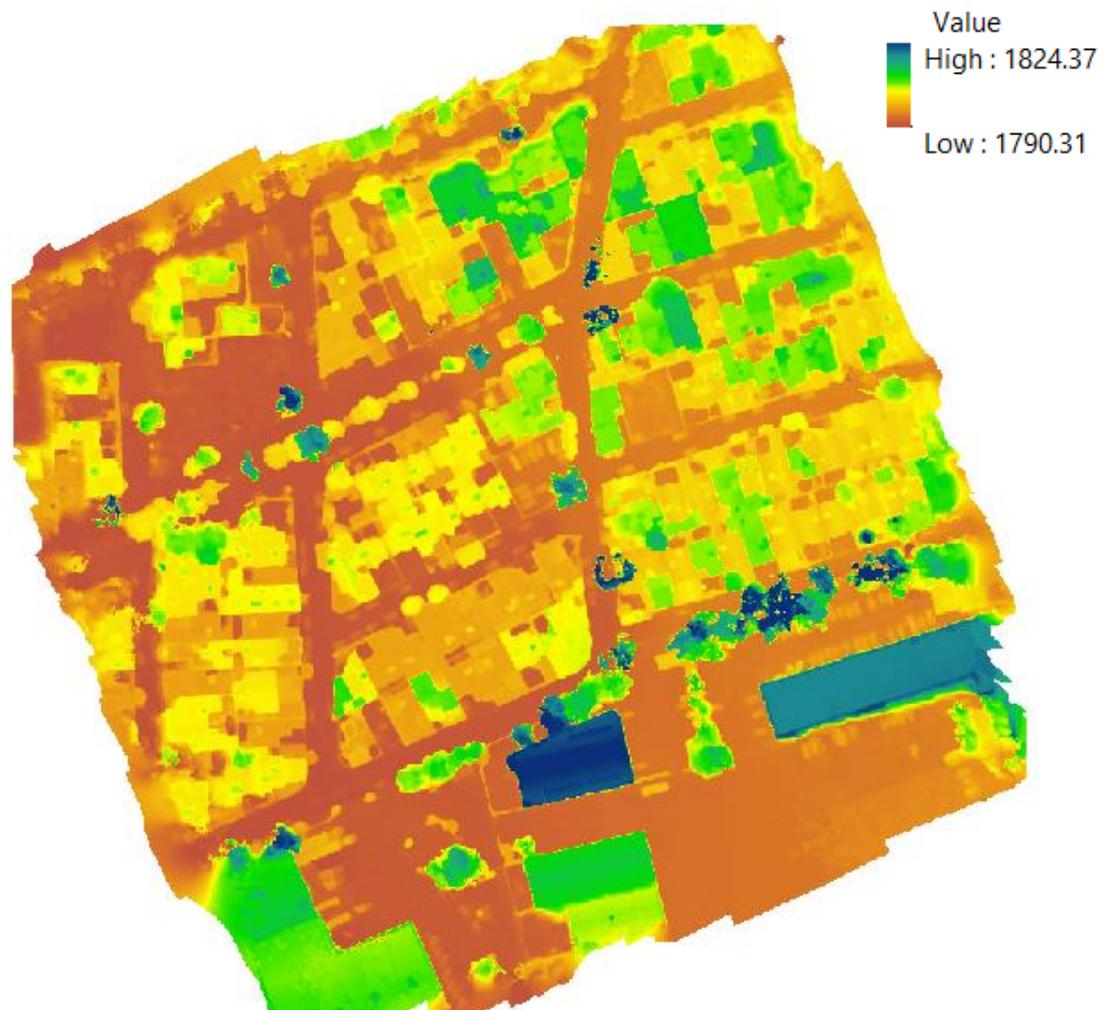


Figura 48. Reconstrucción del MDS de la medición 3. Fuente: Elaboración propia (2020)

Para la medición 4 realizada el día 16 de agosto de 2020, se muestra en la figura 49 el ortomosaico, así como también se muestran las posiciones de los puntos de apoyo y estimaciones de errores en la figura 50, ambas obtenidas mediante el Agisoft MetaShape.



Figura 49. Ortomosaico de la colonia Ensueño de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

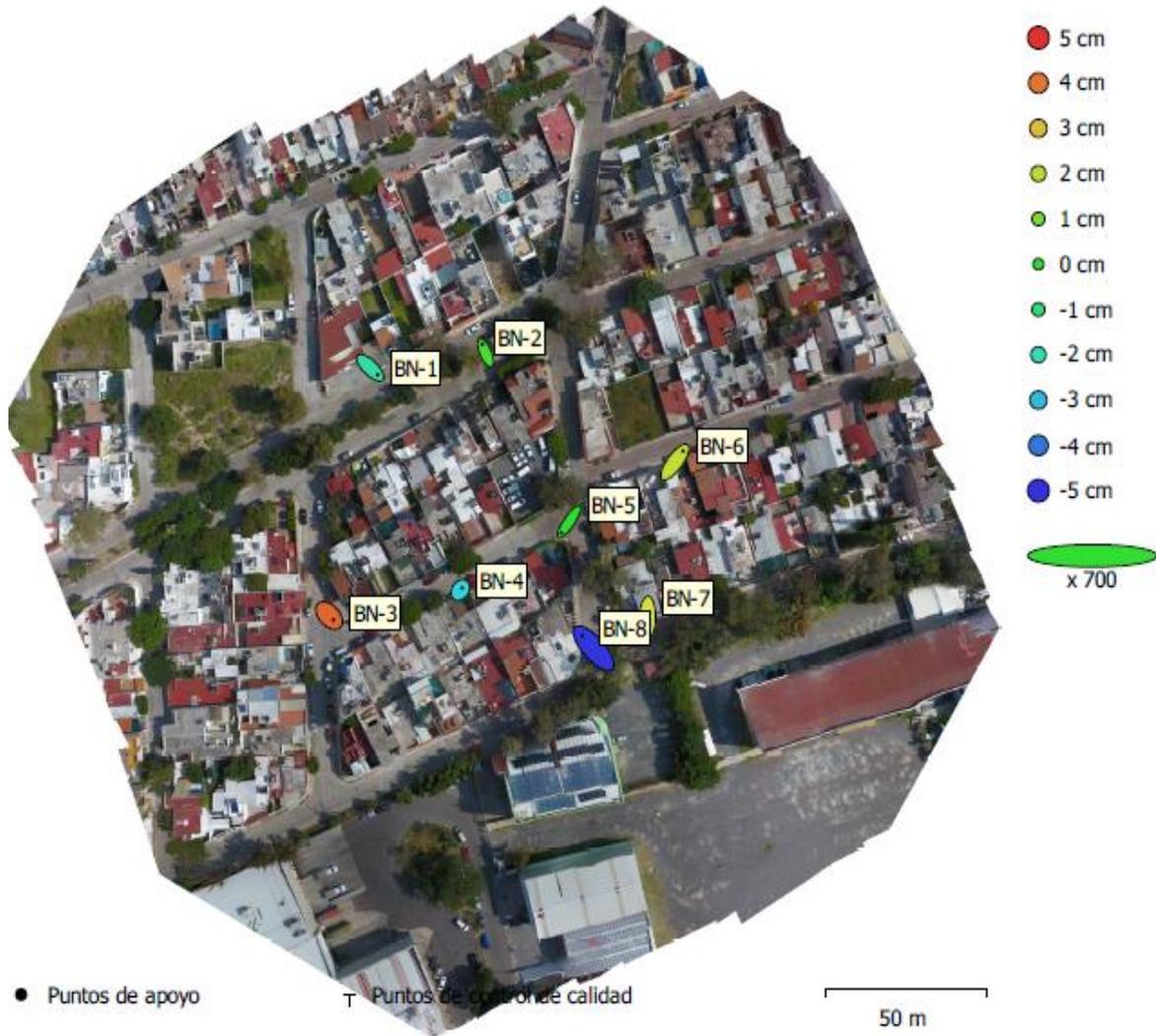


Figura 50. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

De la misma manera, se obtiene el error de los puntos de control del procesamiento, el cual se muestra en la tabla 13:

Tabla 13. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 4.

Punto de Control Terrestre	X	Y	Z	Error Total	Imagen
	Error (cm)	Error (cm)	Error (cm)	(cm)	(pix)
BN -1	0.66017	-0.59616	-1.67063	1.89268	0.393 (23)
BN - 2	-0.30861	0.70683	0.35419	0.84871	0.550 (18)
BN - 3	0.37373	-0.36640	4.23208	4.26432	0.662 (13)
BN - 4	0.14419	0.18141	-2.63855	2.64871	0.451 (20)
BN - 5	-0.66949	-0.93688	0.02686	1.15182	0.394 (24)
BN - 6	0.71583	0.92046	2.10030	2.40228	0.518 (23)
BN - 7	-0.02671	-1.11380	2.48159	2.72021	0.415 (20)
BN - 8	-1.00679	1.07834	-4.93744	5.15313	0.551 (14)
TOTAL	0.57733	0.80238	2.80039	2.96974	0.484

Fuente: Elaboración propia (2020).

Se obtuvo el MDT el cual se mostrado en la figura 51 y el MDS del área de estudio, el cual se muestra en la figura 52, donde se muestra una altura máxima de 1.81 km y una altura mínima de 1.79 km, con una resolución de 9.29 cm/pix y una densidad de puntos de 116 puntos por m².

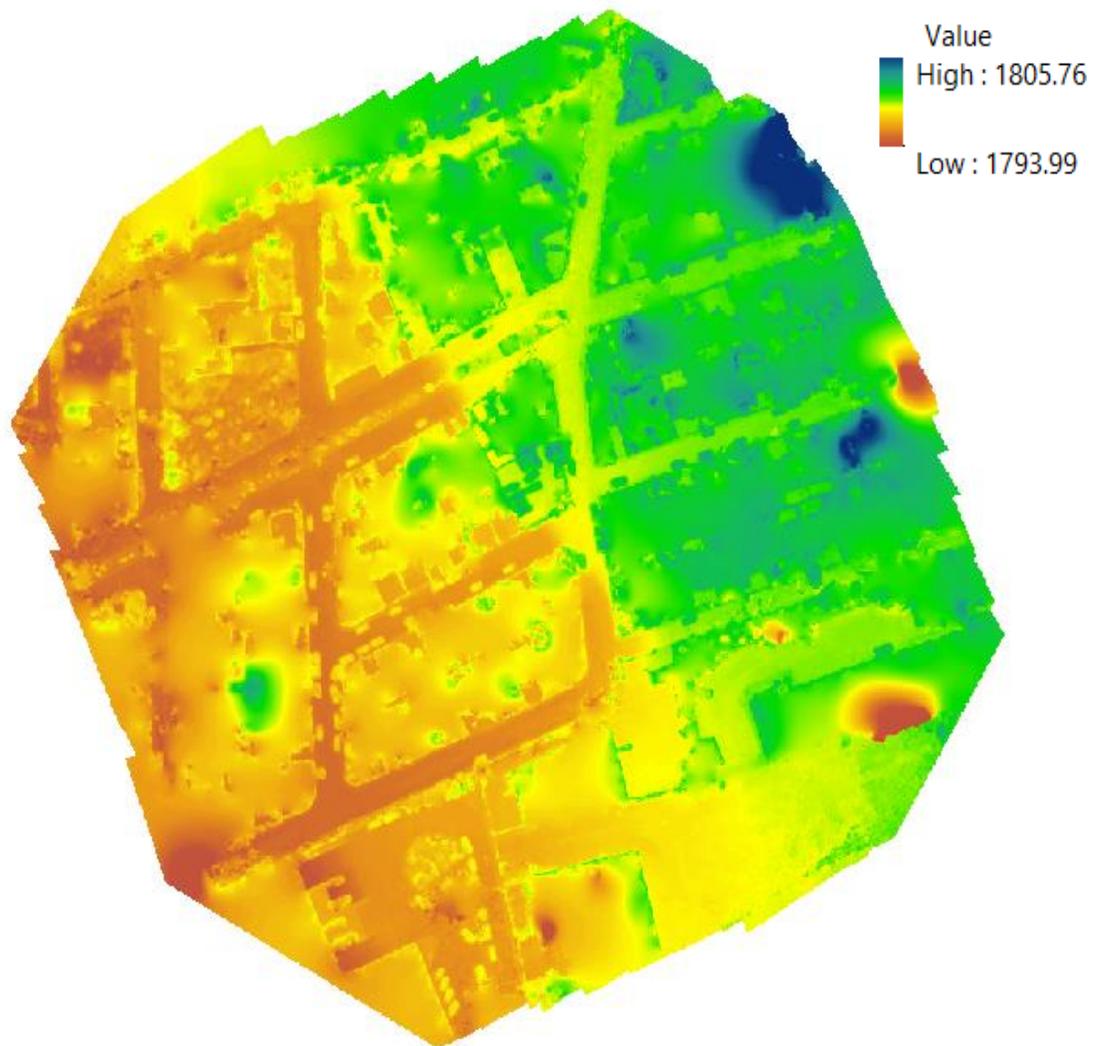


Figura 51. Reconstrucción del MDT de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

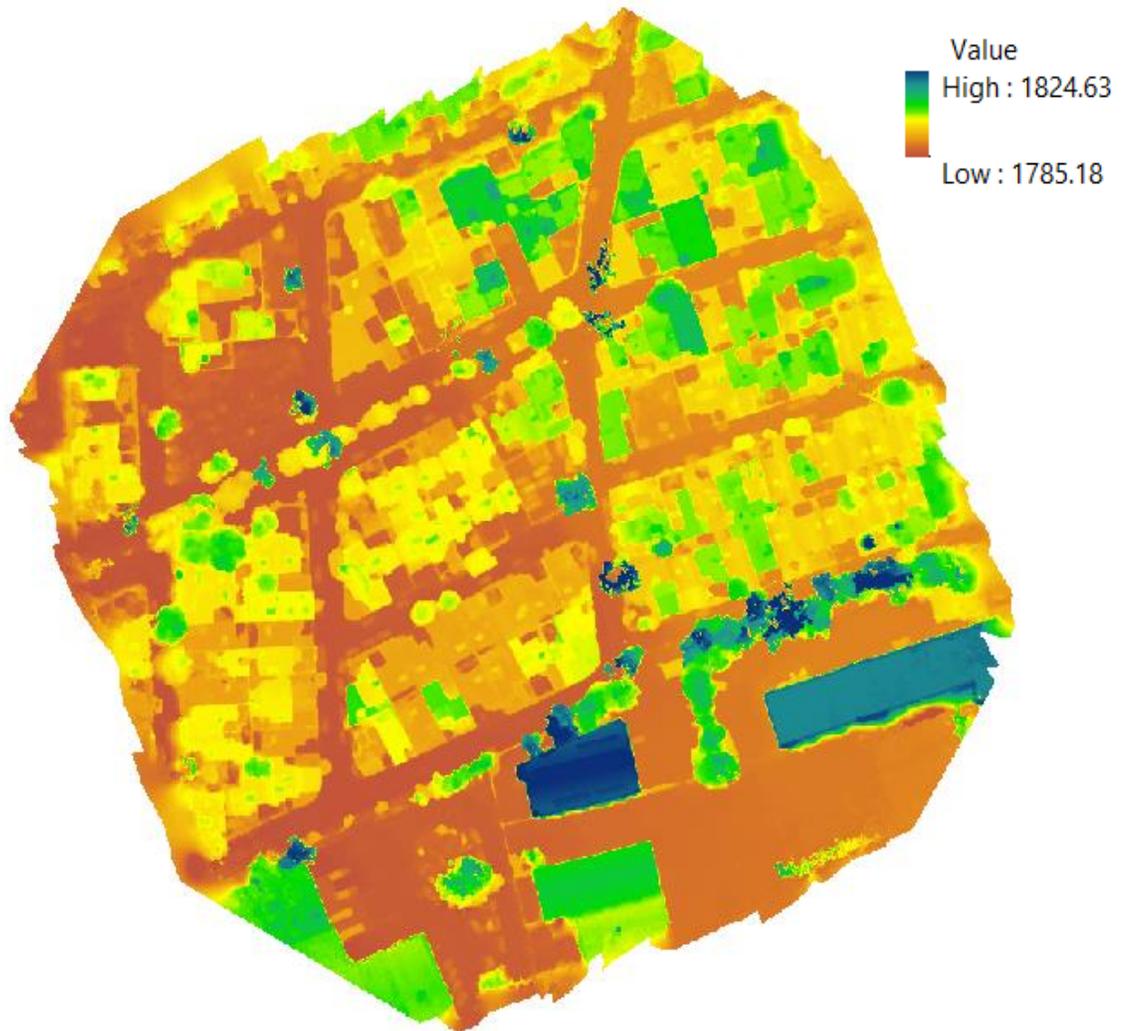


Figura 52. Reconstrucción del MDS de la medición 4. Fuente: Elaboración propia (2020)

Para la medición 5 realizada el día 19 de octubre de 2020, se muestra en la figura 53 el ortomosaico, así como también se muestran las posiciones de los puntos de apoyo y estimaciones de errores en la figura 54, ambas obtenidas mediante el Agisoft MetaShape.



Figura 53. *Ortomosaico del área de estudio en la colonia Ensueño de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)*

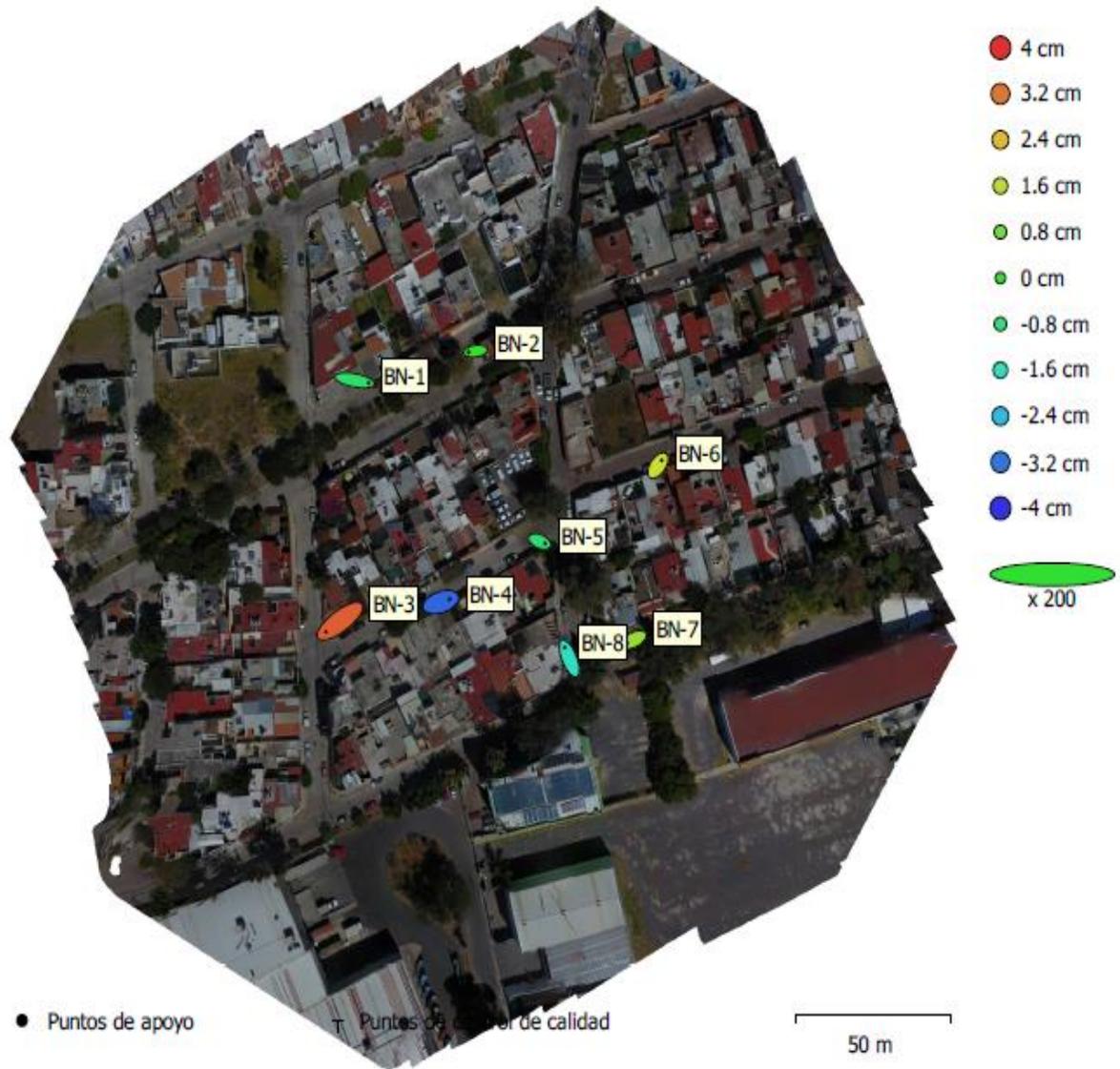


Figura 54. Posiciones de puntos de apoyo y estimaciones de errores obtenida en Agisoft Metashape de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)

De la misma manera, se obtiene el error de los puntos de control del procesamiento, el cual se muestra en la tabla 14:

Tabla 14. Errores de PCT, X-Este, Y-Norte, Z-Altitud de la medición 5.

Punto de Control Terrestre	X	Y	Z	Error Total	Imagen
	Error (cm)	Error (cm)	Error (cm)	(cm)	(pix)
BN - 1	4.49696	-0.76880	-0.64733	4.60790	0.320 (22)
BN - 2	-2.20009	-0.27034	0.08461	2.21825	0.500 (19)
BN - 3	-4.55594	-3.09194	3.46552	6.50588	1.128 (14)
BN - 4	2.78597	0.85751	-3.40369	4.48130	0.539 (16)
BN - 5	1.71348	-0.59980	-0.76728	1.97091	0.544 (20)
BN - 6	1.20010	1.53195	1.80247	2.65255	1.747 (21)
BN - 7	-2.04855	-0.90538	1.18590	2.5343	2.483 (16)
BN - 8	-1.43211	3.16946	-1.63989	3.84521	0.364 (11)
TOTAL	2.83295	1.75112	1.99857	3.88411	1.198

Fuente: Elaboración propia (2020).

Se obtuvo el MDT el cual se mostrado en la figura 55 y el MDS del área de estudio, el cual se muestra en la figura 56, donde se muestra una altura máxima de 1.80 km y una altura mínima de 1.78 km, con una resolución de 9.35 cm/pix y una densidad de puntos de 114 puntos por m².

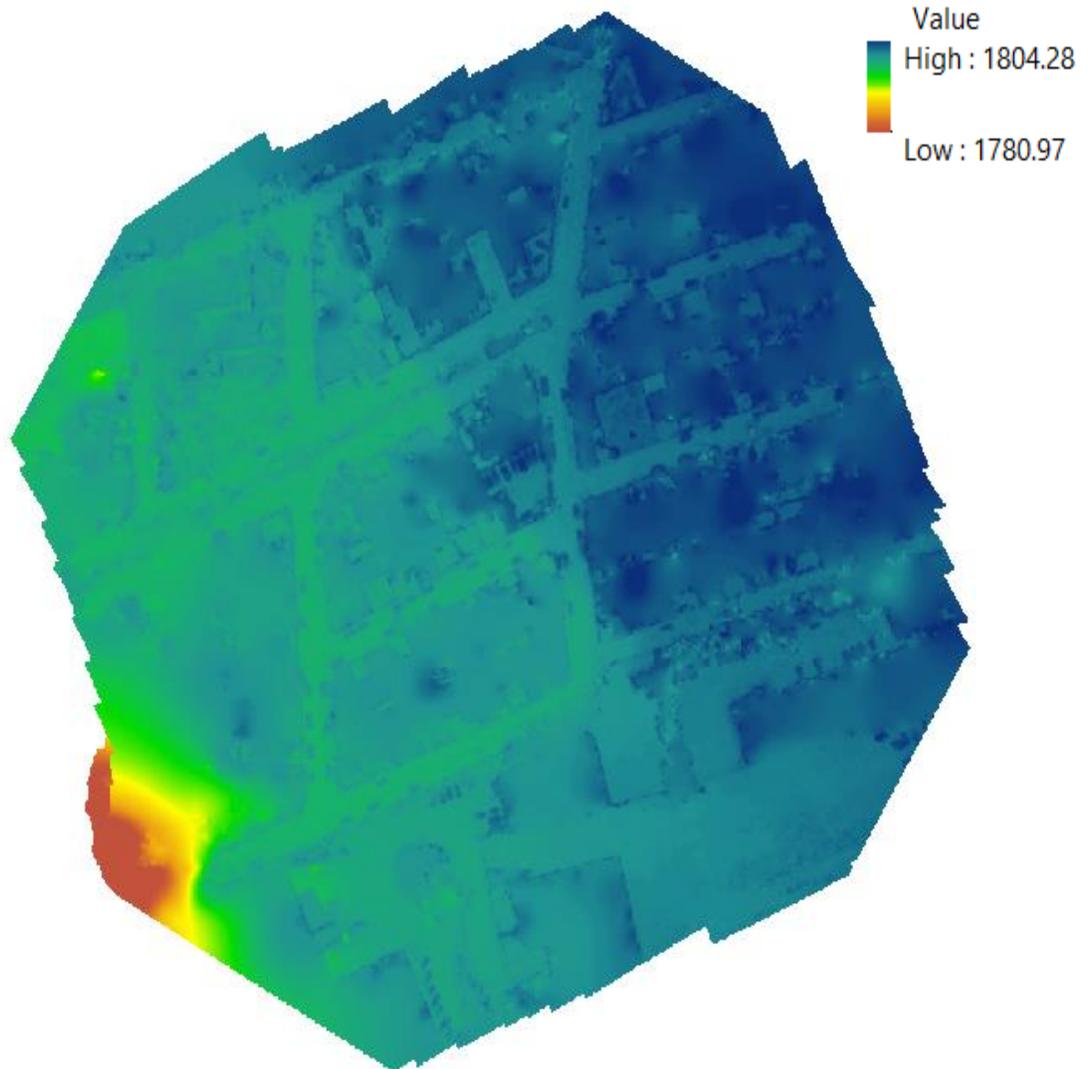


Figura 55. Reconstrucción del MDT de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)

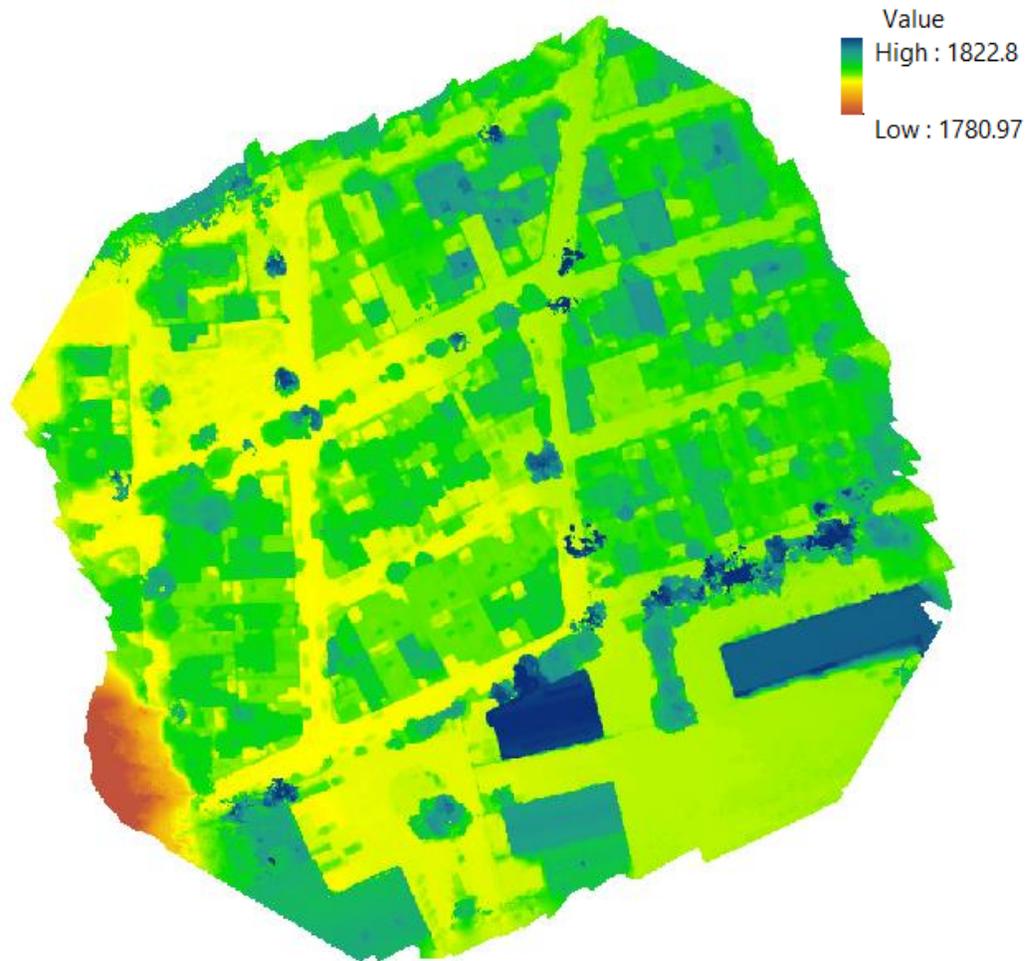


Figura 56. Reconstrucción del MDS de la medición 5. Fuente: Elaboración propia (2020)

En las figuras anteriores donde se muestra los modelos digitales de terreno y los modelos digitales de superficie, se puede observar grandes diferencias entre ambas imágenes, las cuales fueron extraídas en base a la misma medición; por ejemplo, en la figura del MDT es posible visualizar de una mejor manera lo que se encuentra encima del terreno, ya sean fallas, asentamientos diferenciales o alguna otra anomalía que corresponda a desniveles; por otro lado, el MDS muestra todo lo existente por encima del terreno, tales como edificios, árboles, automóviles, entre otras cosas más. Es por ello, que para el análisis en específico de esta investigación se utilizó el modelo digital de terreno para conocer los asentamientos que estaban

ocurriendo en la colonia “El Ensueño”, al ser una representación gráfica de los desniveles del terreno.

Así mismo, para esta misma investigación se realizó el procesamiento con el software Pix4Dmapper con la finalidad de realizar una comparación de información entre ambos softwares, siendo así, se obtuvieron los siguientes datos; para la medición 1, se muestra en la figura 57 el ortomosaico, en la figura 58 el MDT y en la figura 59 el MDS, los cuales se obtienen después de la densificación de puntos del procesamiento.



Figura 57. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 1. Elaboración propia (2020).

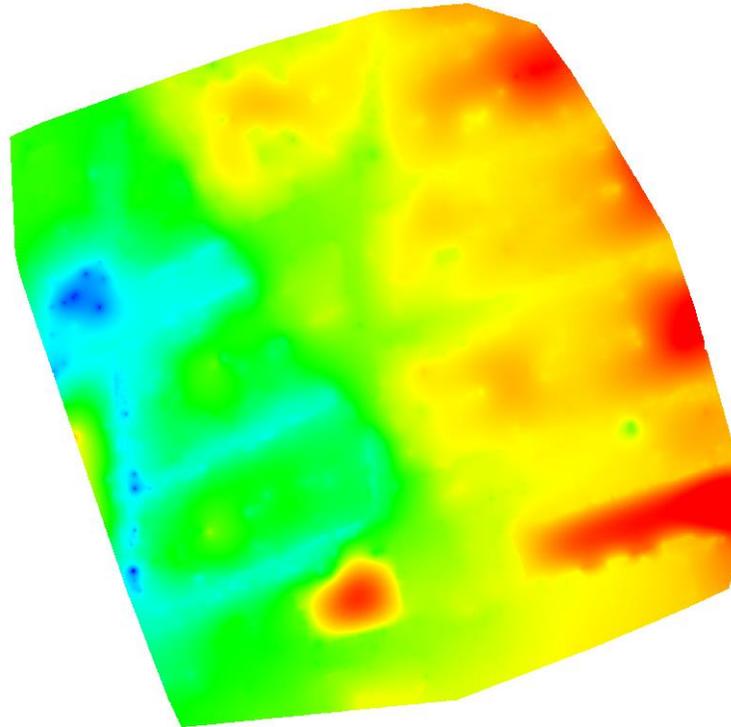


Figura 58. MDT de la medición 1. Elaboración propia (2020).

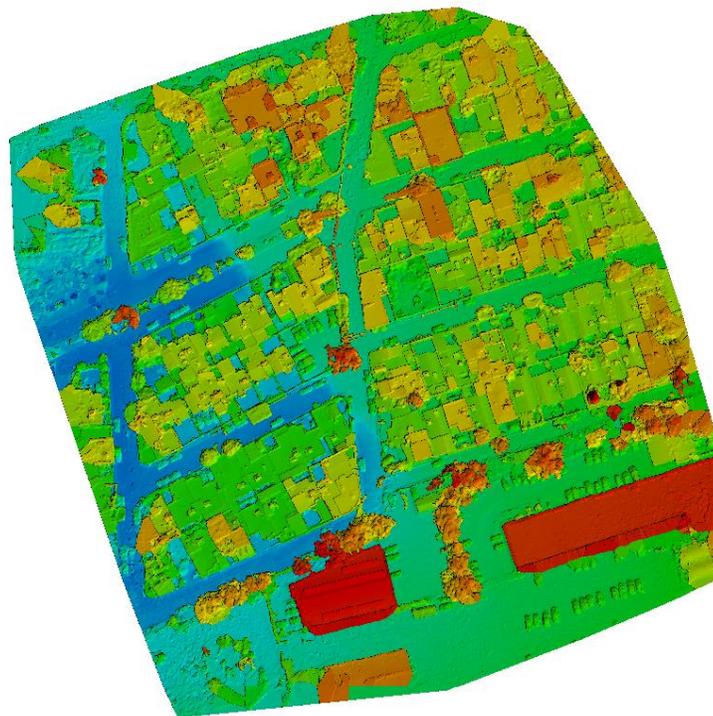


Figura 59. MDS de la medición 1. Elaboración propia (2020).

Así mismo, se obtuvieron los errores de los PCT incluidos en el procesamiento del mismo, los cuales se muestran en la tabla 15, donde se muestran la precisión con la que fueron procesados, el error en X, Y y Z, y el error de proyección.

Tabla 15. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 1.

PCT	Precisión XY/Z (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error de Proyección (pixel)
BN-1	0.020/0.020	-0.016	-0.003	0.026	0.211
BN-2	0.020/0.020	0.011	0.005	-0.033	0.449
BN-3	0.020/0.020	-0.056	-0.007	-0.0169	1.176
BN-4	0.020/0.020	-0.011	0.024	0.041	0.687
BN-5	0.020/0.020	0.025	0.020	0.167	0.577
BN-6	0.020/0.020	0.009	-0.006	-0.028	0.552
BN-7	0.020/0.020	-0.007	0.000	-0.103	1.0204
BN-8	0.020/0.020	0.000	-0.010	0.088	0.604
Media (m)		-0.0005717	0.002908	-0.001394	
Sigma (m)		0.022685	0.011715	0.099483	
Error RMS (m)		0.023394	0.012071	0.099493	

Fuente: Elaboración propia (2020).

De la misma manera se obtuvieron las demás mediciones, a continuación se muestran los datos de la medición 2, para lo cual en la figura 60 se muestra el ortomosaico, en la figura 61 el MDT y en la figura 62 el MDS.



Figura 60. *Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 2. Elaboración propia (2020).*

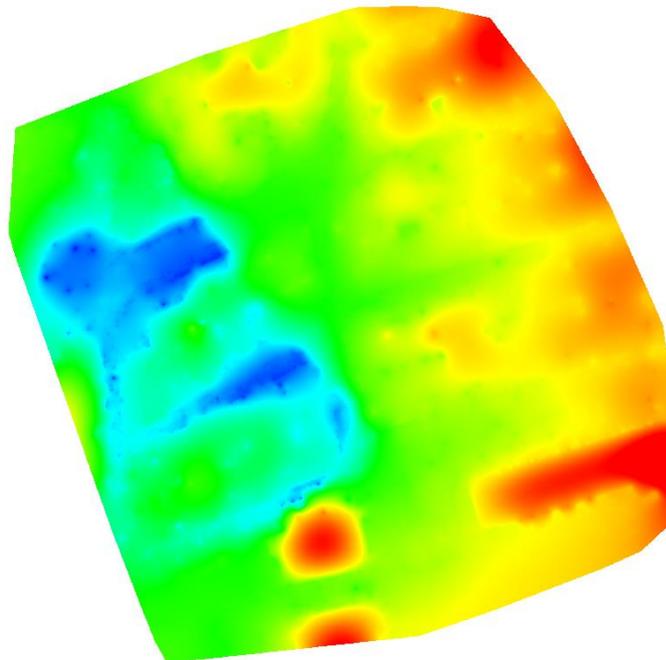


Figura 61. *MDT de la medición 2. Elaboración propia (2020).*

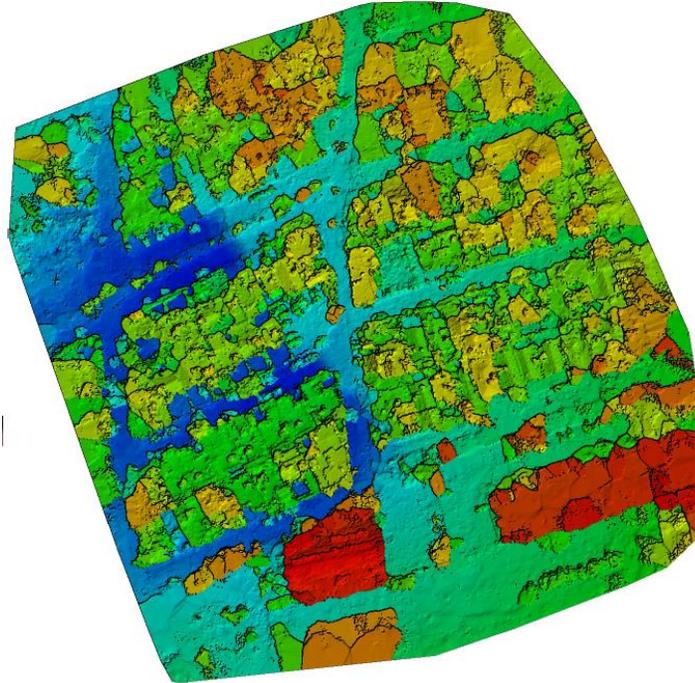


Figura 62. MDS de la medición 2. Elaboración propia (2020).

Se obtuvieron los errores de los PCT incluidos en el procesamiento del mismo de la medición 2, los cuales se muestran en la tabla 16, donde se muestran la precisión con la que fueron procesados, el error en X, Y y Z, y el error de proyección. Este caso en particular no se consideró el BN-3, debido a que no se tuvo mucha visibilidad y cuando se seleccionaba para realizar el procesamiento, generaba mucho error, por lo cual se tomó la consideración de despreciarlo para este caso en específico.

Tabla 16. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 2.

PCT	Precisión XY/Z (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error de Proyección (pixel)
BN-1	0.020/0.020	-0.006	0.001	-0.053	0.803
BN-2	0.020/0.020	0.010	0.003	0.004	1.222
BN-4	0.020/0.020	0.001	0.014	0.078	1.021
BN-5	0.020/0.020	-0.006	0.015	0.137	0.947
BN-6	0.020/0.020	-0.006	0.013	0.036	1.290
BN-7	0.020/0.020	0.009	-0.017	-0.255	0.980
BN-8	0.020/0.020	0.005	-0.025	-0.023	0.734
Media (m)		0.001059	0.000705	-0.010691	
Sigma (m)		0.006832	0.014676	0.115915	
Error RMS (m)		0.006913	0.014693	0.116407	

Fuente: Elaboración propia (2020).

La medición 3, se muestra en la figura 63 el ortomosaico, en la figura 64 el MDT y en la figura 55 el MDS.



Figura 63. Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 3. *Elaboración propia (2020).*

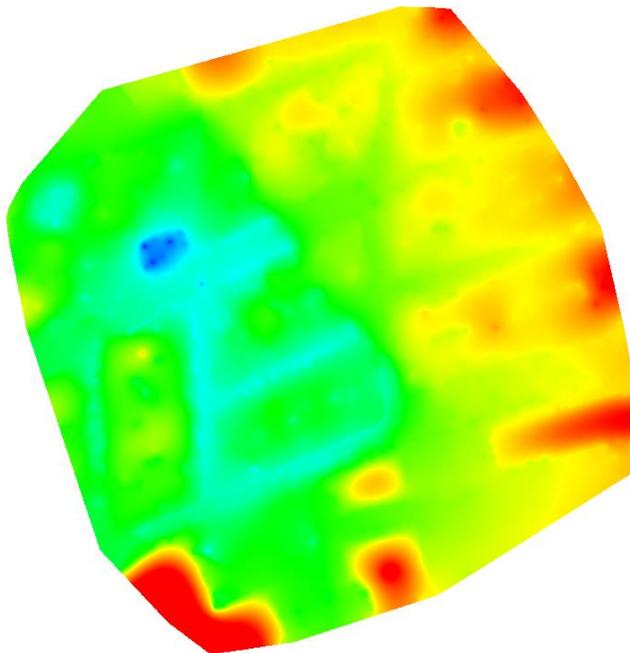


Figura 64. MDT de la medición 3. *Elaboración propia (2020).*

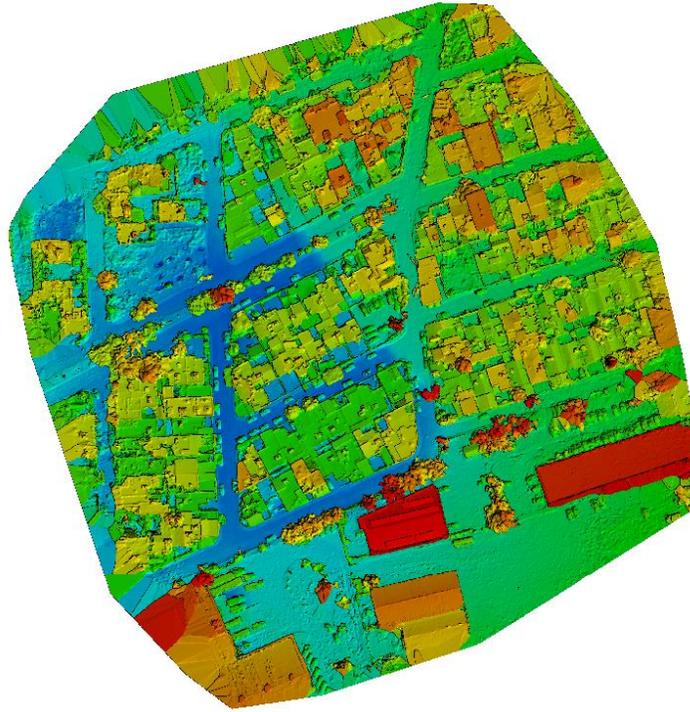


Figura 65. MDS de la medición 3. Elaboración propia (2020).

Se obtuvieron los errores de los PCT incluidos en el procesamiento del mismo de la medición 3, los cuales se muestran en la tabla 17, donde se muestran la precisión con la que fueron procesados, el error en X, Y y Z, y el error de proyección.

Tabla 17. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 3.

PCT	Precisión XY/Z (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error de Proyección (pixel)
BN-1	0.020/0.020	-0.006	0.008	0.002	1.201
BN-2	0.020/0.020	0.015	-0.006	-0.012	0.992
BN-3	0.020/0.020	-0.011	0.019	-0.194	1.197
BN-4	0.020/0.020	0.007	0.014	0.091	1.092
BN-5	0.020/0.020	-0.021	-0.007	0.102	1.038
BN-6	0.020/0.020	-0.013	-0.029	-0.116	1.635
BN-7	0.020/0.020	0.033	0.013	-0.081	1.167
BN-8	0.020/0.020	-0.009	-0.013	0.114	1.288
Media (m)		-0.000594	-0.000094	-0.011887	
Sigma (m)		0.016512	0.015413	0.105006	
Error RMS (m)		0.016523	0.015414	0.105677	

Fuente: Elaboración propia (2020).

La medición 4, se muestra en la figura 66 el ortomosaico, en la figura 67 el MDT y en la figura 68 el MDS.



Figura 66. *Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 4. Elaboración propia (2020).*

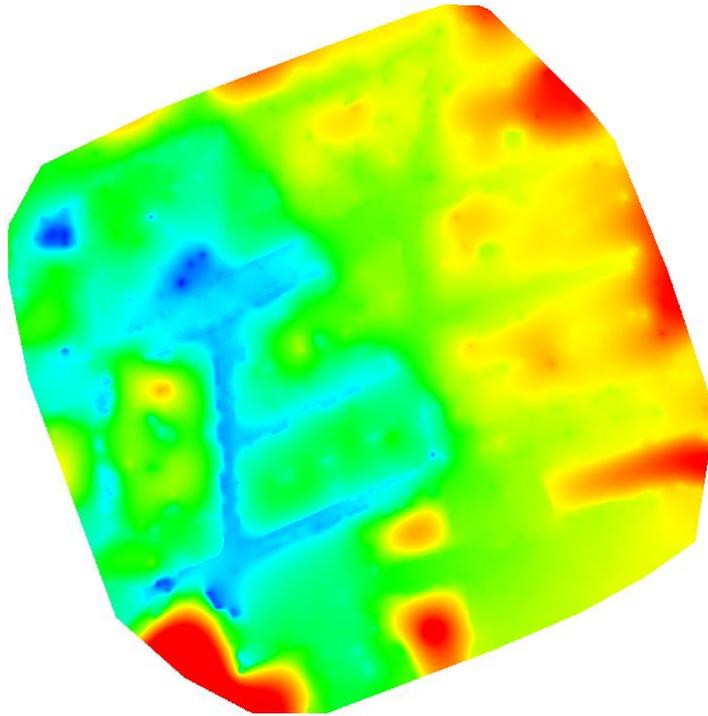


Figura 67. MDT de la medición 4. Elaboración propia (2020).

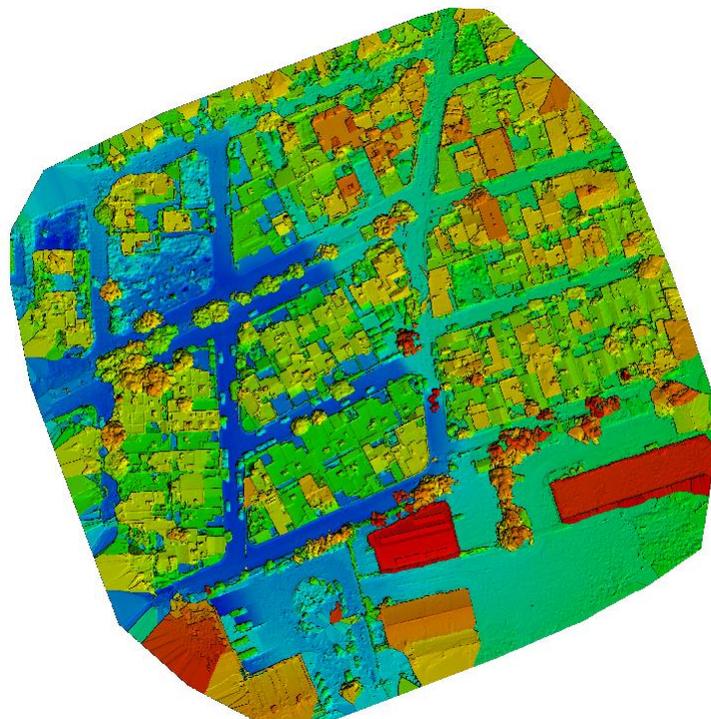


Figura 68. MDS de la medición 4. Elaboración propia (2020).

Se obtuvieron los errores de los PCT incluidos en el procesamiento del mismo de la medición 4, los cuales se muestran en la tabla 18, donde se muestran la precisión con la que fueron procesados, el error en X, Y y Z, y el error de proyección.

Tabla 18. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 4.

PCT	Precisión XY/Z (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error de Proyección (pixel)
BN-1	0.020/0.020	0.001	0.004	0.022	1.016
BN-2	0.020/0.020	-0.006	0.007	-0.013	1.133
BN-3	0.020/0.020	0.010	0.011	-0.140	1.387
BN-4	0.020/0.020	0.019	0.007	0.075	1.377
BN-5	0.020/0.020	0.001	0.014	0.069	1.000
BN-6	0.020/0.020	-0.005	-0.011	-0.056	1.043
BN-7	0.020/0.020	-0.001	-0.000	-0.057	1.138
BN-8	0.020/0.020	0.016	-0.005	0.116	1.117
Media (m)		0.004473	0.003566	0.002006	
Sigma (m)		0.008723	0.007843	0.079542	
Error RMS (m)		0.009803	0.008616	0.079567	

Fuente: Elaboración propia (2020).

La medición 5, se muestra en la figura 69 el ortomosaico, en la figura 70 el MDT y en la figura 71 el MDS.



Figura 69. *Ortomosaico obtenido con Pix4Dmapper de la medición 5. Elaboración propia (2020).*

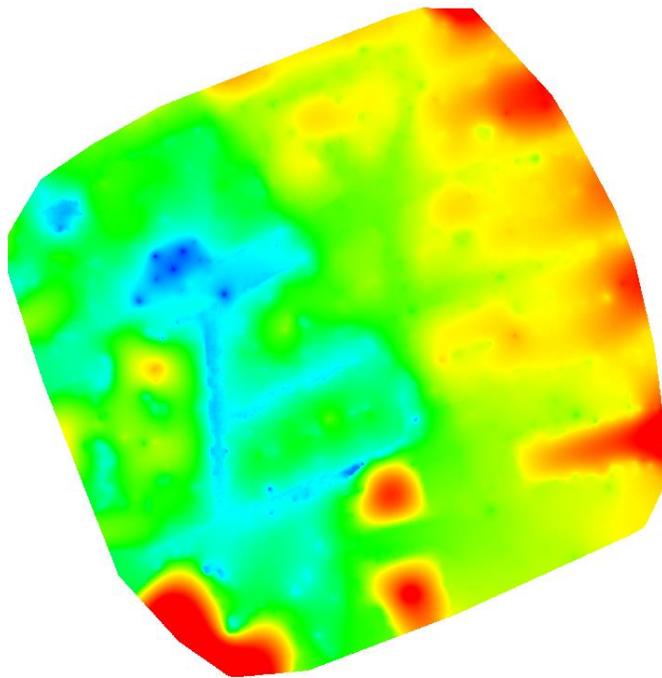


Figura 70. *MDT de la medición 5. Elaboración propia (2020).*

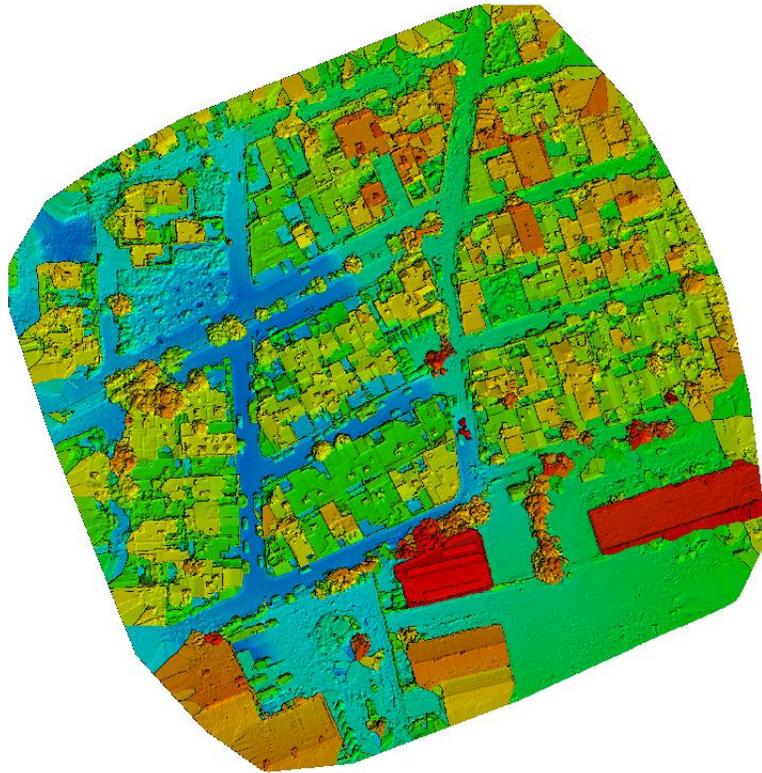


Figura 71. MDS de la medición 5. Elaboración propia (2020).

Se obtuvieron los errores de los PCT incluidos en el procesamiento del mismo de la medición, los cuales se muestran en la tabla 19, donde se muestran la precisión con la que fueron procesados, el error en X, Y y Z, y el error de proyección.

Tabla 19. Errores de PCT en Pix4Dmapper de la medición 5.

PCT	Precisión XY/Z (m)	Error X (m)	Error Y (m)	Error Z (m)	Error de Proyección (pixel)
BN-1	0.020/0.020	-0.038	0.008	0.009	1.025
BN-2	0.020/0.020	0.014	-0.003	-0.008	1.154
BN-3	0.020/0.020	0.060	0.040	-0.115	2.244
BN-4	0.020/0.020	-0.040	0.001	0.114	1.511
BN-5	0.020/0.020	-0.023	0.006	0.096	1.322
BN-6	0.020/0.020	0.020	0.002	-0.102	1.146
BN-7	0.020/0.020	0.012	-0.008	-0.081	1.174
BN-8	0.020/0.020	0.005	-0.042	0.082	0.982
Media (m)		0.001265	0.000611	-0.000526	
Sigma (m)		0.031310	0.020905	0.085955	
Error RMS (m)		0.031335	0.020913	0.085956	

Fuente: Elaboración propia (2020).

Como se puede observar, en los modelos obtenidos con Pix4Dmapper también es posible percibir la falla por subsidencia que atraviesa la colonia “El Ensueño”; así mismo, el MDS cuenta con más texturas que el obtenido en Agisoft Metashape y de esta forma, es mejor comprendido el MDT. Aunado esto, en ambos softwares es posible obtener información de áreas respectivas para conocer si estos contienen asentamientos diferenciales o de alguna manera para obtener la topografía del área considerando la información que contiene cada modelo.

De lo anterior presentado, se muestra a continuación en la tabla 20 un resumen de las elevaciones obtenidas durante cada medición, seguido de ello en la tabla 21 se muestran las diferencias entre cada medición realizada, con la finalidad de obtener los asentamientos totales en todo el periodo de medición.

Tabla 20. Elevaciones obtenidas de las mediciones en el sitio de estudio.

Bancos de Nivel	Elevación (m)				
	Medición 1	Medición 2	Medición 3	Medición 4	Medición 5
BN-1	1799.990	1799.989	1799.986	1799.985	1799.976
BN-2	1801.213	1801.213	1801.211	1801.208	1801.206
BN-3	1799.848	1799.848	1799.835	1799.832	1799.831
BN-4	1800.064	1800.063	1800.060	1800.060	1800.059
BN-5	1800.893	1800.892	1800.890	1800.887	1800.888
BN-6	1801.601	1801.597	1801.592	1801.591	1801.591
BN-7	1801.091	1801.080	1801.078	1801.072	1801.073
BN-8	1800.211	1800.200	1800.194	1800.184	1800.154

Fuente: Elaboración propia (2020).

Tabla 21. Diferencia de elevaciones ente las mediciones realizadas.

BN	Elevaciones (cm)				
	Mediciones				
	1-2	2-3	3-4	4-5	1-5
1	0.10	0.30	0.10	0.90	1.40
2	0.00	0.20	0.30	0.20	0.70
3	0.00	1.30	0.30	0.10	1.70
4	0.10	0.30	0.00	0.10	0.50
5	0.10	0.20	0.30	-0.10	0.50
6	0.40	0.50	0.10	0.00	1.00
7	1.10	0.20	0.60	-0.10	1.80
8	1.10	0.60	1.00	3.00	5.70

Fuente: Elaboración propia (2020).

De la misma manera, se llevó un seguimiento del comportamiento de cada banco de nivel de acuerdo a las mediciones realizadas durante el periodo establecido para los levantamientos los cuales se muestran de las figura 72 a la figura 79 que se enlistan a continuación:

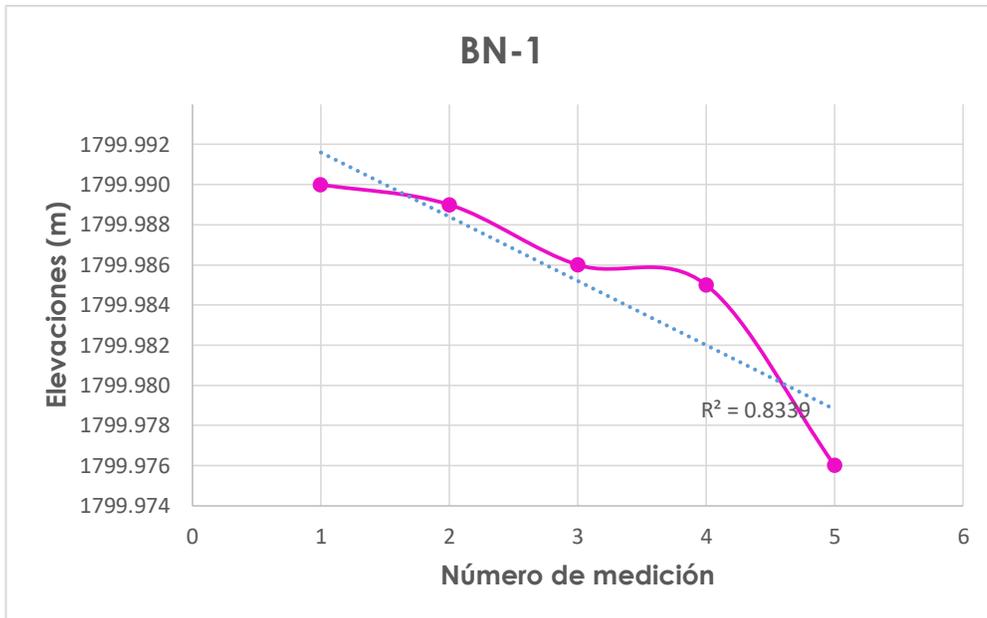


Figura 72. Relación estadística del BN-1 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

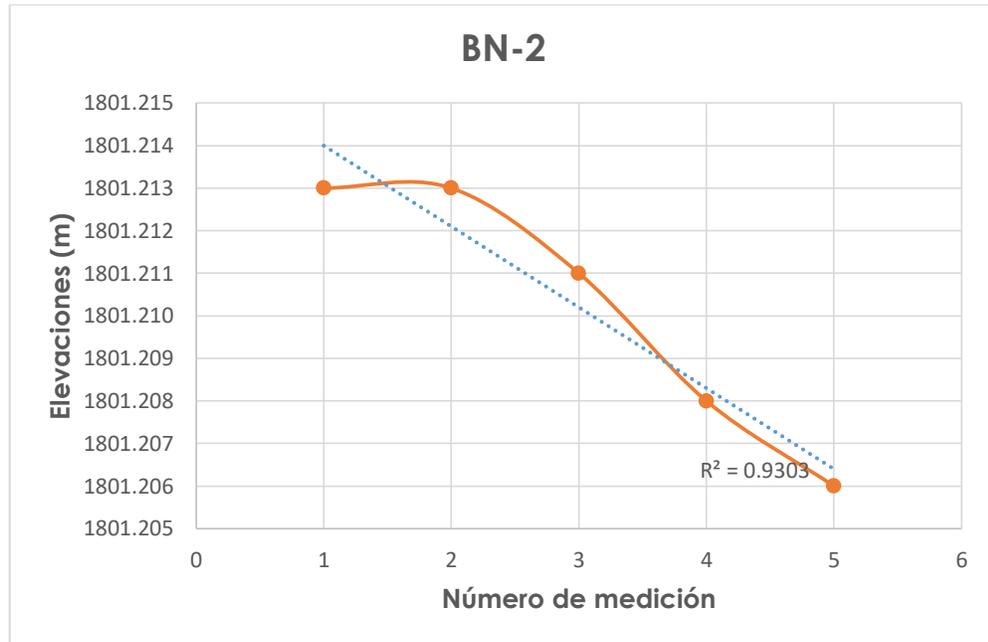


Figura 73. Relación estadística del BN-2 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

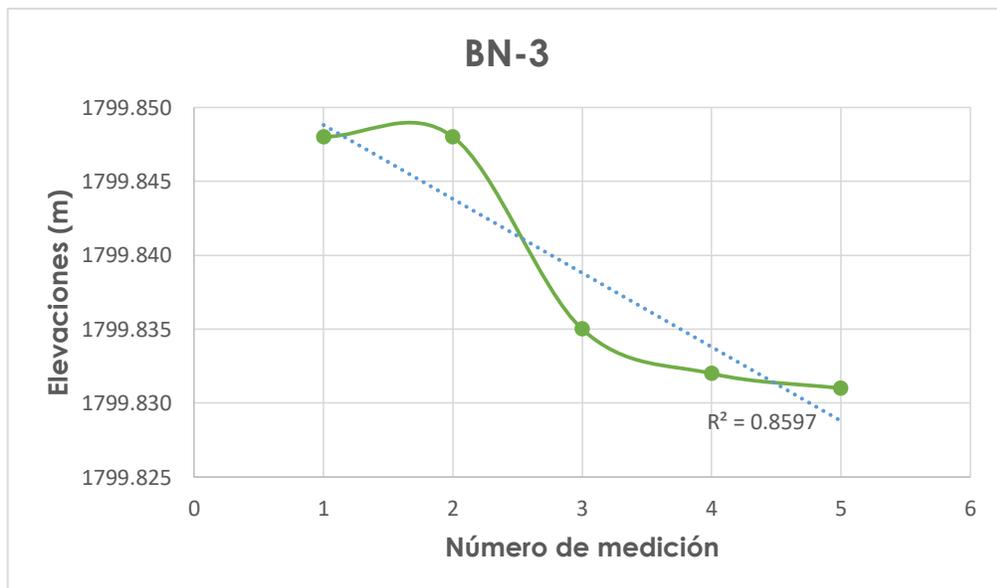


Figura 74. Relación estadística del BN-3 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

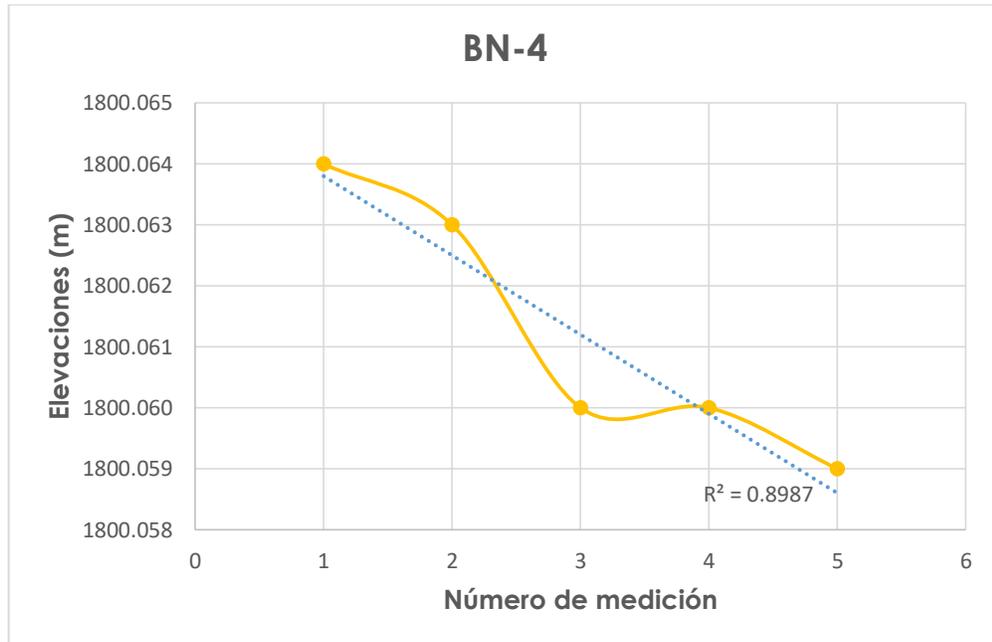


Figura 75. Relación estadística del BN-4 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

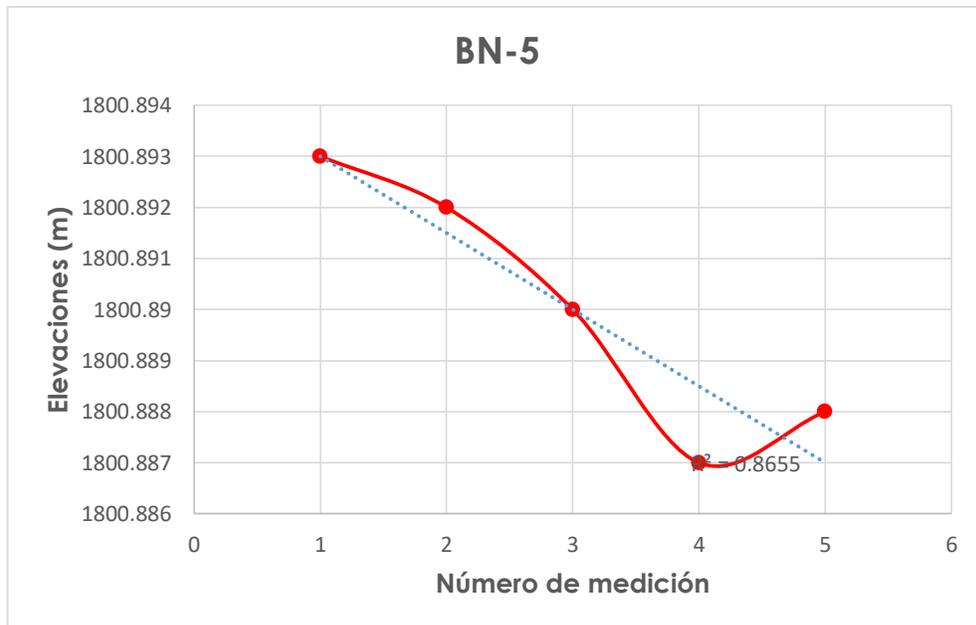


Figura 76. Relación estadística del BN-5 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

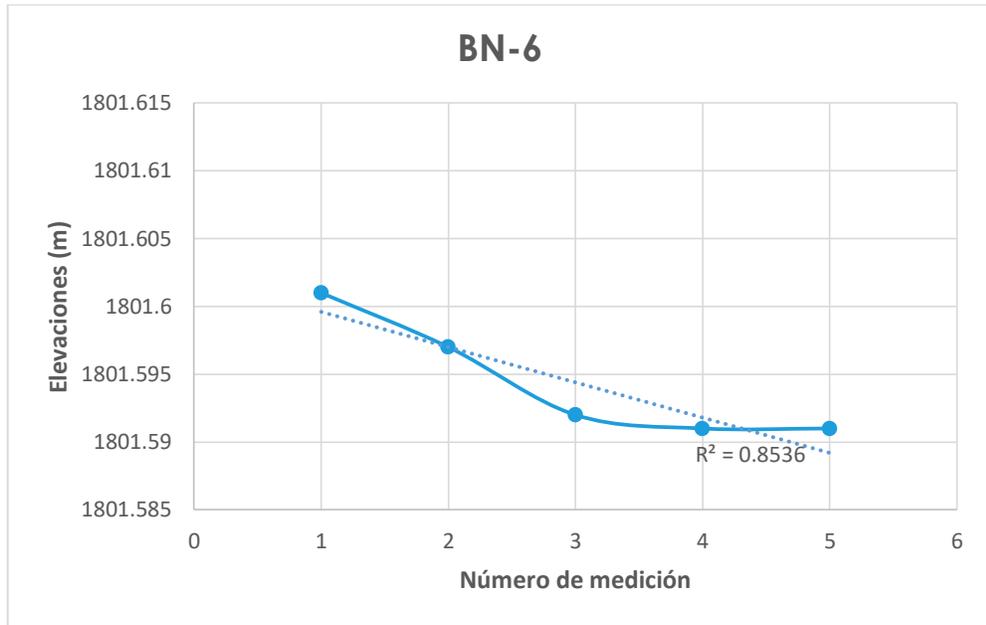


Figura 77. Relación estadística del BN-6 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

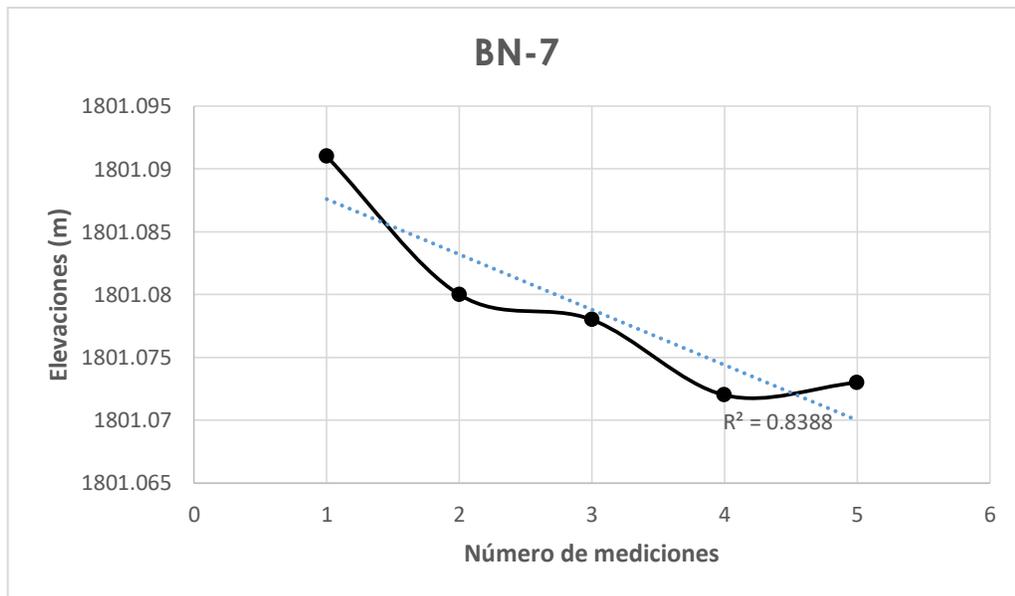


Figura 78. Relación estadística del BN-7 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

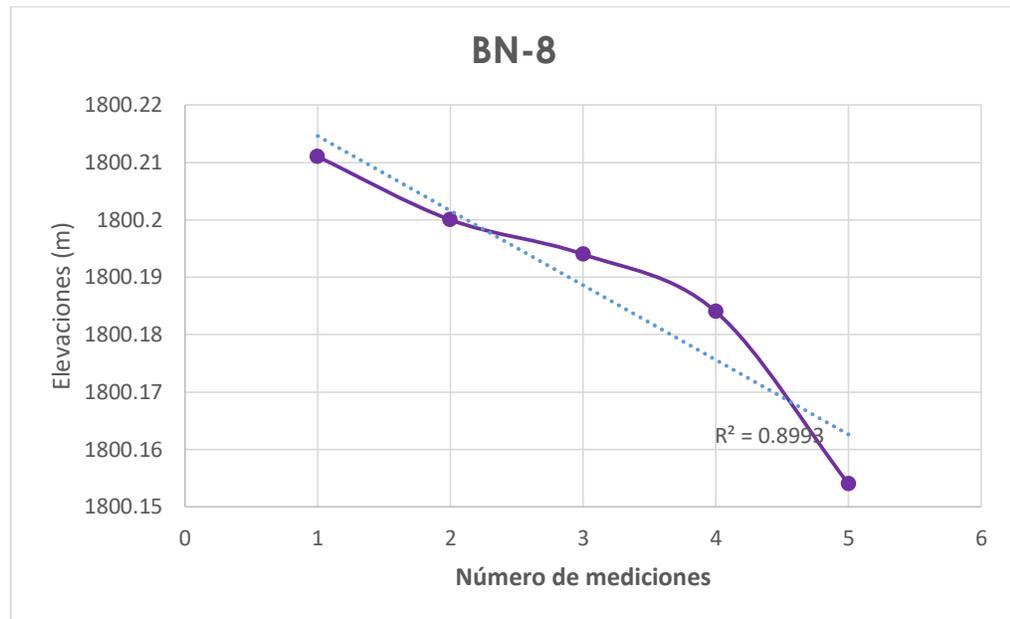


Figura 79. Relación estadística del BN-8 de todas las mediciones realizadas. Fuente: Elaboración propia (2020)

4.2.1. Inspección de visual de daños.

Para tener un mayor entendimiento y fundamento de lo que estaba pasando en la colonia “El Ensueño, se realizó una inspección visual de los daños que presentan los pavimentos en la zona; así como también algunos deterioros que presentaba la infraestructura habitacional existente; en las figuras de la 80 a la 83 se muestran las condiciones actuales del pavimento, el cual en su mayoría es de concreto hidráulico en su mayor extensión.



Figura 80. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Antonio Pérez Alcocer.



Figura 81. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Federico Samaniego.



Figura 82. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Cayetano Rubio (Sentido 1).



Figura 83. Pavimento de concreto hidráulico en la Calle Cayetano Rubio (Sentido 2).

Se puede observar en las figuras anteriores que la mayoría de las losas de concreto cuentan con grietas de esquina, longitudinales, transversales, en bloque, entre otras más; todo esto ocasionado por los distintos asentamientos que se tienen en la colonia por el fenómeno subsidencia agregando la carga vehicular pequeña con la que cuenta, puesto la mayoría de los que transitan por ella son vehículos ligeros y de habitantes de la misma colonia. Se puede notar que es casi imposible reparar dichas losas por la alta severidad de daño con el que cuentan, debido a que

presentan aberturas mayores a 10 mm de ancho en las distintas grietas presentadas a lo largo de la capa superficiales, por lo cual lo recomendable y más adecuado sería sustituir esas losas por algún pavimento flexible, aunque cabe mencionar que debido al fenómeno que se desarrolla en el área estos problemas pudieran persistir después de las reparaciones, considerando que este no se puede controlar ni mitigar, pero es posible disminuir el impacto de daño.

Por otro lado, se identificó la zona de la falla por subsidencia que atraviesa transversalmente toda la colonia “El Ensueño”, donde el pavimento existente es adoquín y la función principal de este, es que funcione como un pavimento articulado, se adapte a los movimientos continuos que tiene el terreno continuamente y que funcione como una capa de rodadura para el tránsito de la zona; en las figuras de la 84 a la 87 se muestra la zona de la falla, la cual es fácil de identificar derivado a los desniveles que se presentan entre las dos partes que de la colonia.



**Figura 84. Pavimento articulado en la calle
Paseo del Gorrión.**



**Figura 85. Pavimento articulado en la calle
Federico Samaniego.**



Figura 86. Pavimento articulado en la calle Cayetano Rubio (Sentido 1).



Figura 87. Pavimento articulado en la calle Cayetano Rubio (Sentido 2).

En las figuras mostradas anteriormente, se pueden observar de manera extraordinaria los desniveles que tiene el pavimento en la zona, los cuales se encuentran por arriba de 120 centímetros entre dos PCT que se encuentran cercanos en la calle Cayetano Rubio. De la misma manera se puede percibir como el pavimento de adoquín predomina en esa zona y este se ha adoptado a la perfección con los movimientos que ha tenido la colonia “El Ensueño”, además de que los daños a la infraestructura urbana como habitacional han sufrido distintos deterioros, algunos de ellos se muestran en las figuras 88 y 89, dicha infraestructura presenta agrietamientos principalmente en las paredes debido a los asentamientos que se presentan en el sitio desde hace muchos años, los habitantes han tratado de mitigar estos daños en sus propiedades de distintas formas pero todos han fallado, debido a que este fenómeno no puede ser controlado y ha obligado a personas a dejar sus hogares, demoler sus casas e incluso hay personas que siguen viviendo ahí, representando un riesgo total para su vida diaria.



Figura 88. Daños a infraestructura habitacional en la calle Paseo del Gorrión.



Figura 89. Daños a infraestructura habitacional en la calle Salvador Septién.

4.2.2. Identificación de patologías de pavimentos mediante ortomosaicos obtenidos por VANT.

Como se mencionó en el punto anterior, para identificar los patologías con las que contaban los pavimentos de la colonia “El Ensueño”, se realizó una inspección visual de los daños, los cuales se han derivado en su mayor parte por los movimientos continuos que presenta la falla por subsidencia que atraviesa dicha colonia, cabe mencionar que algunos de ellos también son daños ocasionados con normalidad por la antigüedad del pavimento y el tránsito vehicular que abunda en la zona. Es por ello, que con el uso de VANT y de un levantamiento de PCT es posible capturar información de grandes áreas en cuestión de minutos, usando ortomosaicos de gran resolución para observar los agrietamientos superficiales de la capa de rodadura, pudiendo identificar así todos los daños que presentan estos mismos de una manera más rápida y eficiente. Es por ello, que a continuación en la figura 90 se muestra un ortomosaico obtenido con la metodología marcada en dicha investigación, con la finalidad de comprobar lo anterior mencionado.



Figura 90. Ortomosaico obtenido mediante vuelo con un VANT y levantamiento de PCT en la colonia “El Ensueño”.

A través de este ortomosaico que se obtuvo usando la metodología propuesta, se pueden visualizar los agrietamientos que tienen las capas superficiales realizando un acercamiento en las zonas requeridas para su análisis, un ejemplo de ello se muestran a continuación en las figuras 91, 92 y 93.

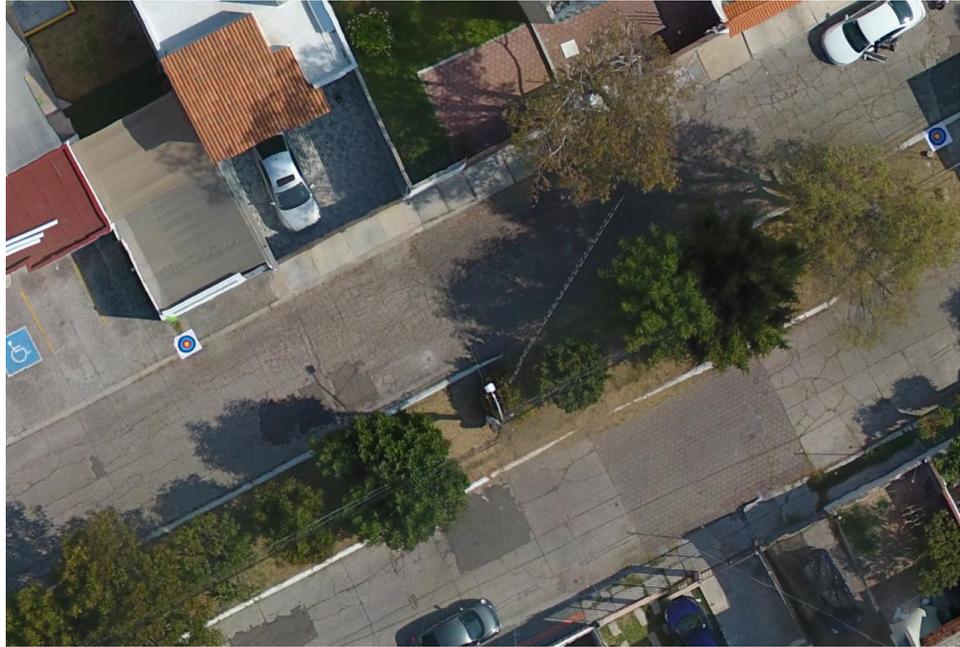


Figura 91. Acercamiento a la capa superficial en las Calles Cayetano Rubio.

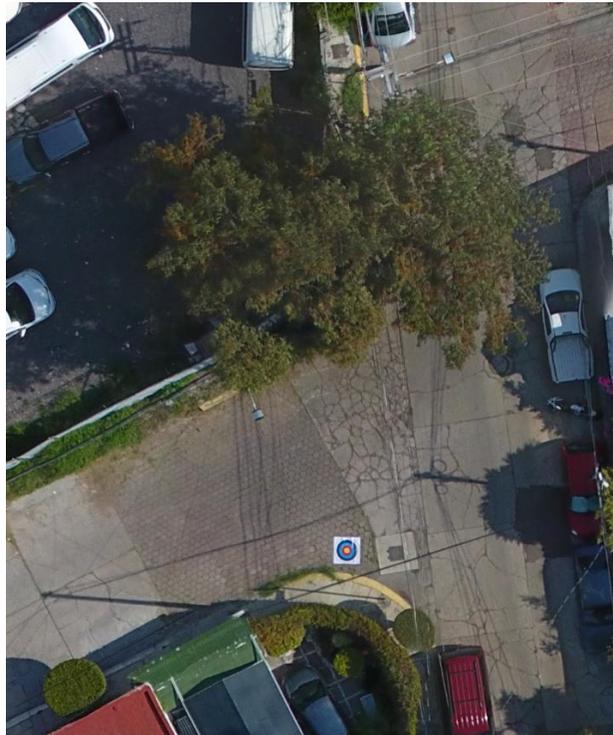


Figura 92. Acercamiento a la capa superficial en la Calle Salvador Septién.

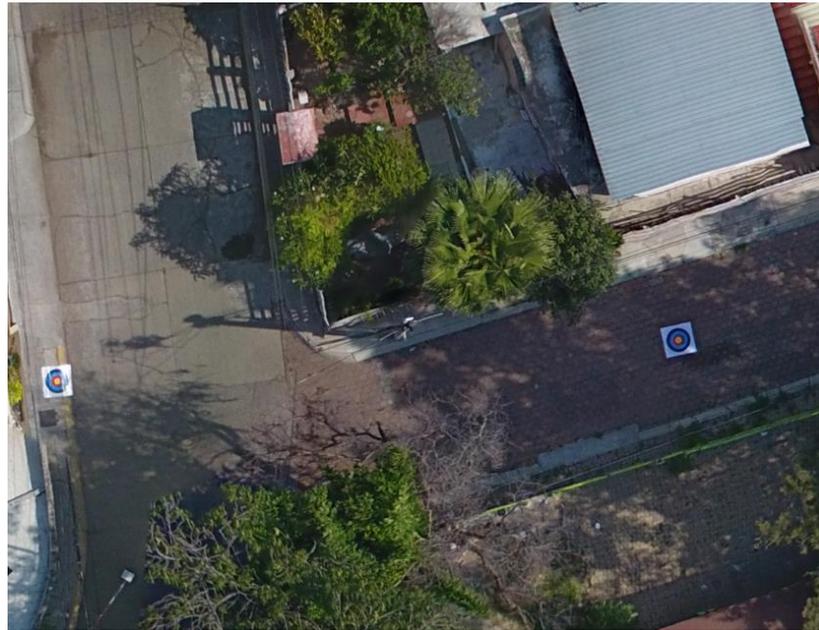


Figura 93. Acercamiento a la capa superficial en Calle la Salvador Septién esquina con Paseo del Gorrión.

De esta manera, obtener los deterioros en los pavimentos mediante la capturas de fotografías por un VANT es una tarea sencilla, y obtener el índice de daños midiendo los agrietamientos en el software es bastante rápido; de esta manera, es posible clasificarlos fácilmente mediante el ancho y largo de la grieta. Todo esto es posible gracias a la obtención de los novedosos ortomosaicos de alta resolución, los cuales tienen distintos beneficios en las distintas áreas de la ingeniería, principalmente en el área de la topografía. Como se mencionó anteriormente, a través de un ortomosaico se puede obtener la topografía de la zona con sus curvas de nivel, así mismo obtener MDS y MDT de la zona, y de la misma manera se puede realizar el análisis de imágenes usando segmentaciones de la misma, utilizando distintos softwares dependiendo de la información que se requiera.

4.2.3. Distorsión angular en la Colonia “El Ensueño”.

Derivado a la infinidad de daños que se presentan en la colonia, ocasionados principalmente por los asentamientos diferenciales que se tienen en la misma, se calculó la distorsión angular, que nos permite conocer la diferencia de los asentamientos máximos referentes a dos puntos cualquiera de referencia.

$$\text{Distorsión angular} = \frac{\delta'}{l}$$

Donde:

δ' = Asentamiento diferencial entre dos puntos (m).

l = Distancia horizontal entre de los puntos (m).

Ahora bien, considerando la expresión anterior se calculó de la distorsión angular entre los siguientes puntos:

- Para los PCT 1-2:

$$\text{Distorsión angular} = \frac{1801.206 - 1799.976}{32.30} = 0.038080$$

- Para los PCT 4 - 5:

$$\text{Distorsión angular} = \frac{1800.888 - 1800.059}{34.50} = 0.024029$$

- Para los PCT 7 - 8:

$$\text{Distorsión angular} = \frac{1801.073 - 1800.154}{20.10} = 0.045721$$

Se puede observar que los valores de la distorsión angular, se encuentran dentro de los límites máximos tolerables de acuerdo a la tabla 22 que se muestra a

continuación, extraída de la N-PRY-CAR-8-01-004/19 de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte.

Tabla 22. Límites máximos tolerables para la distorsión angular

Tipo de estructura	Elementos	Límite adimensional
Puentes y estructuras similares	Con traves simplemente apoyadas	0.005
	Con traves continuas	0.004
Edificaciones	Marcos de acero de hasta cuatro pisos	0.006
	Marcos de concreto de hasta cuatro pisos	0.004
	Estructuras de acero de una o dos plantas, armaduras para cubierta, almacenes con muros flexibles	0.006 a 0.008
	Estructuras de acero de una o dos plantas, con muros de carga de ladrillo recocado y estructuras ligeras	0.002
	Estructuras con acabado interior o exterior sensibles, como yeso, piedra ornamental, teja, entre otros	0.001 a 0.002
	Estructuras con acabado interior o exterior relativamente insensible, como mampostería en seco o paneles móviles	0.002 a 0.003
	Estructuras rígidas de concreto pesado de varias plantas, sobre losa de cimentación estructurada con espesor aproximado de 1.20 m	0.005
	Tubería de concreto con juntas	0.015

4.2.4. Perfiles de la zona de escalonamiento de la falla por subsidencia mediante ArcGIS.

Con la finalidad de conocer una representación de los desniveles que se encuentran actualmente en la zona de estudio, se realizó un procesamiento de la nube de puntos en el software ArcGIS usando la herramienta LAS Dataset con la finalidad de obtener un perfil de la zona de escalonamiento, lo cual se puede ver en

la figura 94, donde se aprecia de una excelente manera los asentamientos que ha tenido la carpeta y el desnivel que existe actualmente en la colonia “El ensueño”.

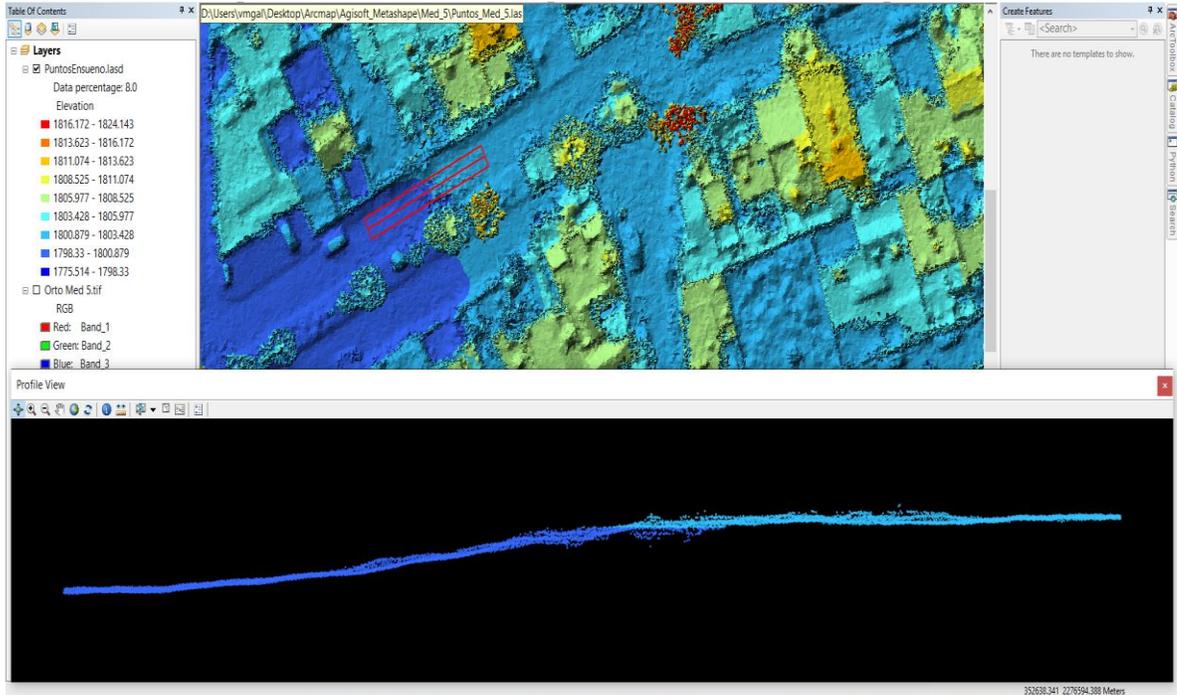


Figura 94. Perfil de escalonamiento, obtenido mediante la herramienta LAS Dataset de ArcGIS.

Fuente: Elaboración Propia (2021).

Para completar dicho análisis, se obtuvieron dos perfiles referentes a la zona de escalonamiento mediante un DEM; el primer perfil denominado S-01 y mostrado representado con una línea color rosa, se ubicó en la calle Cayetano Rubio (Sentido 2), en la figura 95 se muestra la ventana del software con el DEM y la línea guía para dicho procesamiento.

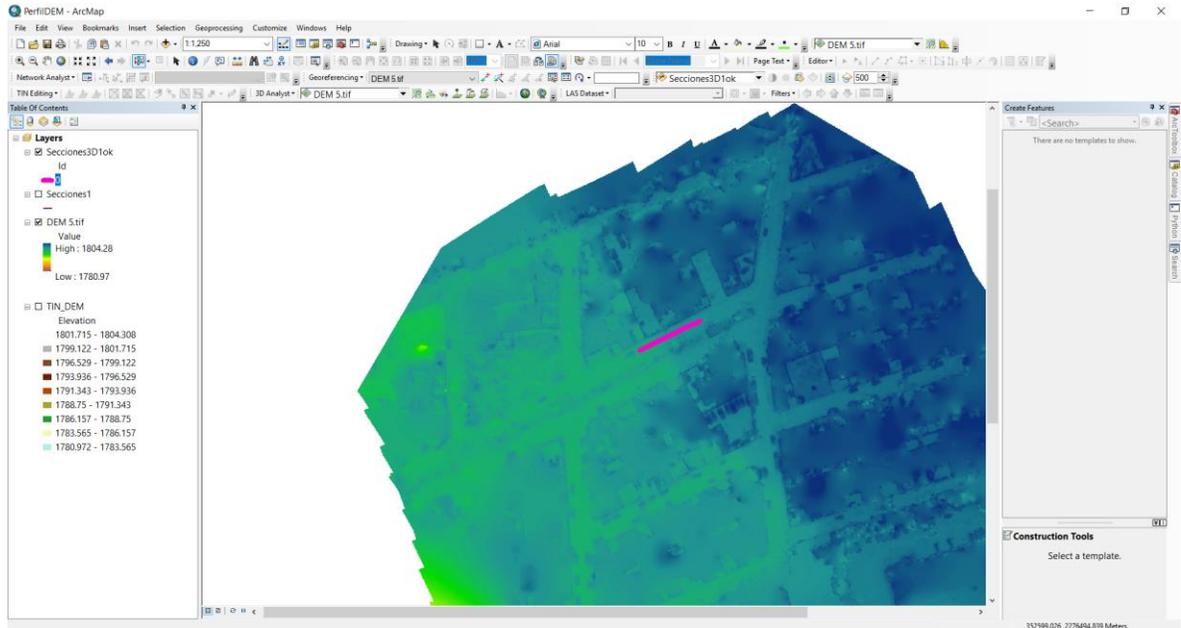


Figura 95. DEM para obtención del perfil S-01 de escalonamiento. Fuente: Elaboración propia (2021).

Posteriormente se obtuvo el perfil de escalonamiento, el cual se muestra en la figura 96, donde es evidente con el que cuenta el pavimento actual.

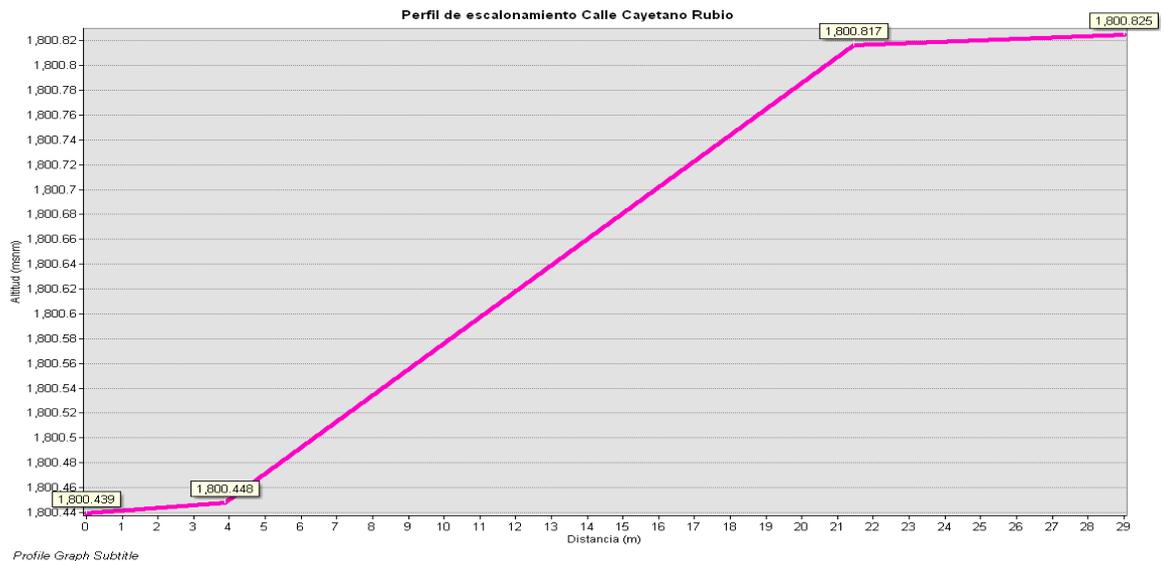


Figura 96. Perfil de escalonamiento Calle Cayetano Rubio. Fuente: Elaboración propia (2021).

Así mismo, se obtuvo el segundo perfil denominado S-02 y mostrado representado con una línea color morada, se ubicó en la calle Salvador Septién Uribe, en la figura 97 se muestra la ventana del software con el DEM y la línea guía para dicho procesamiento.

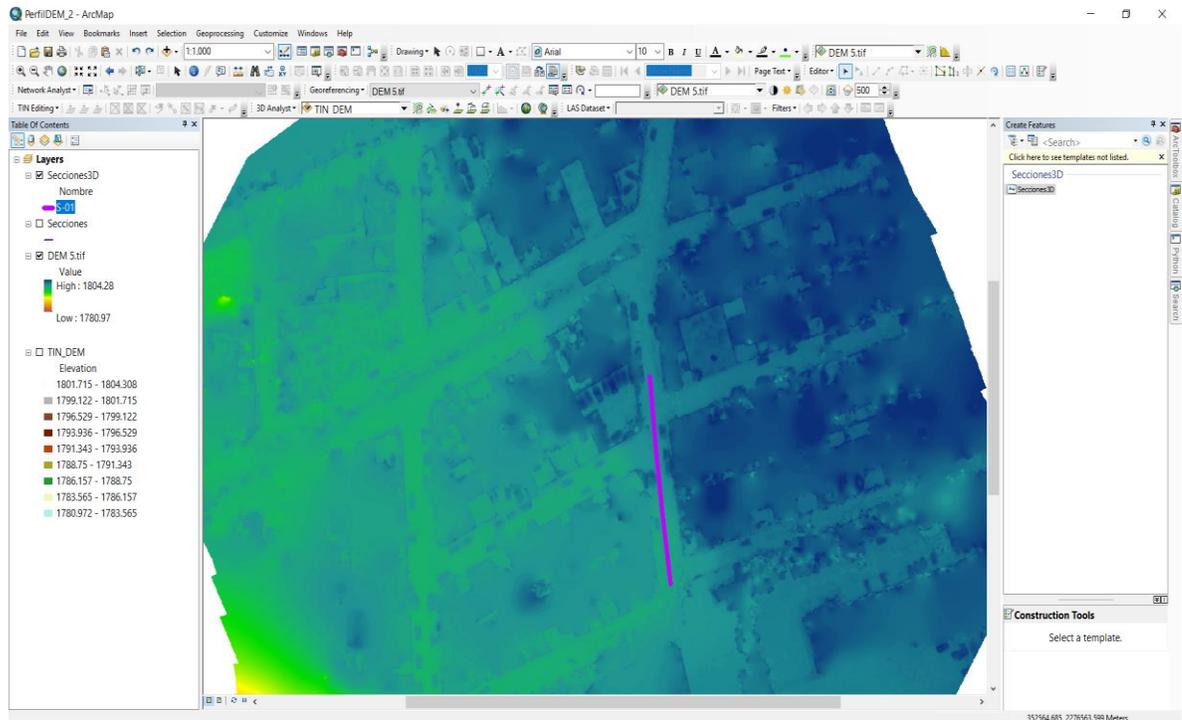


Figura 97. DEM para obtención del perfil S-02 de escalonamiento. Fuente: Elaboración propia (2021).

Finalmente, se obtuvo el segundo perfil de escalonamiento, el cual se muestra en la figura 98, para corroborar los asentamientos de la zona y la existencia de la falla por subsidencia.

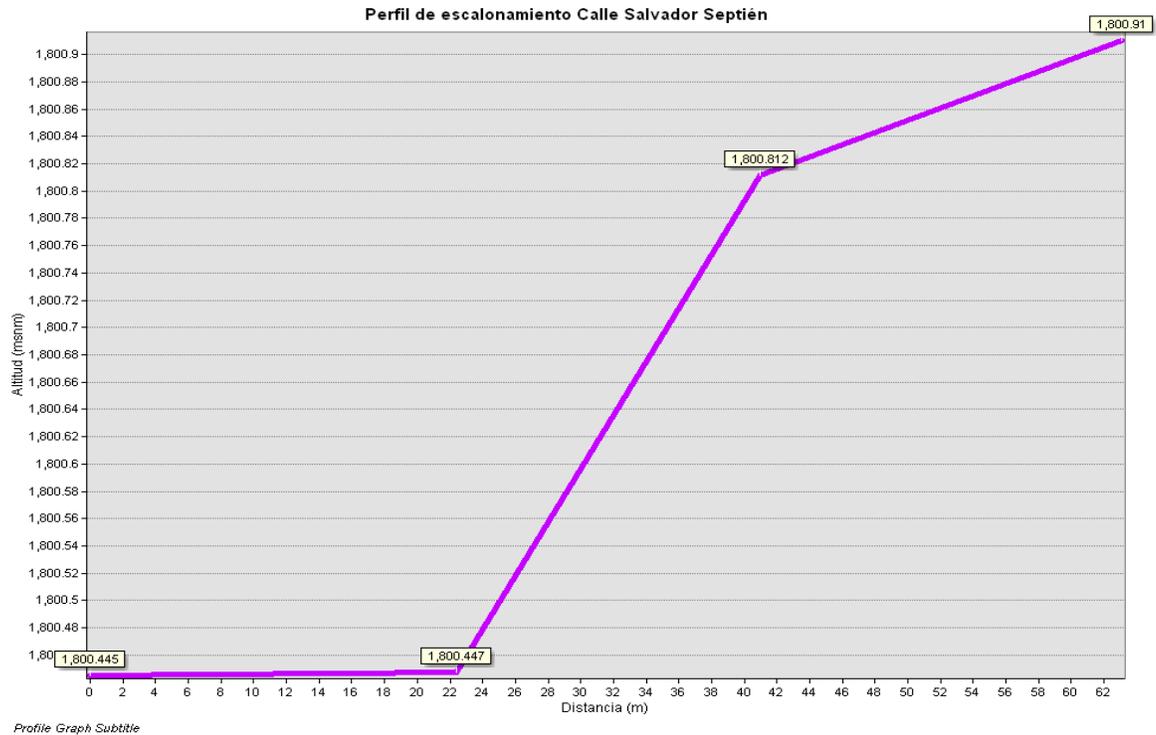


Figura 98. Perfil de escalonamiento Calle Salvador Septién. Fuente: Elaboración propia (2021).

De esta manera, es posible observar los importantes asentamientos que se han dado sobre los pavimentos, los cuales han tenido como resultado que usen un pavimento articulado, en lugar de uno rígido o flexible. El software ArcGIS, es un excelente apoyo para obtener este tipo de información de una manera muy sencilla y rápida, sin requerir información adicional de lo obtenido por Agisoft Metashape, lo cual se vuelve un excelente complemento para el procesamiento de dicha información.

4.2.5. Limitaciones de los levantamientos realizados en la zona de estudio “El Ensueño”.

Durante toda la investigación en el sitio de estudio, el cual fue la colonia “El Ensueño” se tuvieron ciertas limitaciones en la realización de los levantamientos;

sin embargo, se hicieron ciertas consideraciones y se desarrollaron los trabajos con éxito. Algunas de ellas, se mencionan a continuación, pero aunado eso se mencionan para que puedan ser de ayuda y se consideren cuando se desarrollan este tipo de investigaciones en zonas urbanas:

1. Conocer la duración de las baterías de cada equipo de medición y llevar las baterías necesarias de acuerdo a los alcances de las mediciones; en el caso del GPS para conocer los PCT que pueden ser medidos con cada una y saber cuándo es el punto exacto para reemplazarlas y que no se generen errores, debido a que cuando las baterías se descargan, éstas empiezan a ampliar el margen de error durante las mediciones; por otro lado con el VANT, se debe conocer la autonomía de cada batería y de esta manera, considerar el plan y tipo de vuelo a realizarse para que la captura de datos sea la correcta.
2. Colocar PCT visibles en el sitio de estudio, los cuales deben estar en áreas despejadas de árboles, sistemas de iluminación y no deben encontrarse muy cerca de paredes, debido a que esto último puede generar errores en la captación de datos del GPS por la forma conoidal en la que este obtiene datos; así mismo se deben realizar los vuelos cuando el sol está posicionado justo arriba para evitar que este pueda generar sombras y tengas más visibilidad de los PCT. Además de todo lo anterior, se recomienda usar unas dianas con colores fuertes con la finalidad de que puedan ser visibles en los vuelos y posterior a ello, sea más rápida la identificación de los puntos en el procesamiento.
3. Colocar el señalamiento preventivo necesario, mediante conos o trafitambos con la finalidad de resguardar el equipo de medición y la integridad de quienes realizar las mediciones, debido a que en ocasiones los vehículos pasan a una alta velocidad respecto a la permitida en la zona urbana en colonias pequeñas; de manera, los vehículos pueden causar ciertas vibraciones al GPS y con ello, este puede arrojar pequeños errores por los desplazamientos que el equipo pueda tener.

4. Se debe concientizar a los habitantes de la colonia sobre los alcances de la investigación, e informarles que la información obtenida no será usada con fines de lucro, si no para fines investigativo; así como de las autoridades correspondientes.
5. Seguir las recomendaciones de las Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019, la cual establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano.

4.2.6. Comparación entre Agisoft Metashape y PIX4D.

De acuerdo al procesamiento de los datos mediante los softwares Agisoft Metashape y PIX4D, cada uno tiene sus ventajas y desventajas durante el proceso de la información, además de su distinta forma de procesar los datos, aunque cumplen con la finalidad de obtener resultados similares. A continuación se mencionan algunas de estas características que se pudieron identificar durante todo el proceso ejecutado con ambos softwares.

Para el Agisoft Metashape:

Ventajas

- Genera las posiciones de los puntos de apoyo y las estimaciones de errores en cada PCT, lo que ayuda a verificar los errores que se generan por la posición de la cámara durante el vuelo.
- Los errores de las proyecciones de los PCT en sus tres direcciones generan errores menores comparados al PIX4D.
- Se puede obtener el MDT, de una manera sencilla haciendo una clasificación de puntos de terreno, lo cual no demora mucho tiempo.
- Es posible exportar los archivos y obtener más información a otras plataformas para sus modificaciones pertinentes.

Desventajas

- La identificación de los PCT es más tardada debido a que debe ser imagen por imagen, y de esta manera se deben ir marcando los PCT con las coordenadas incluidas.
- Para generar la información necesaria hasta llegar al ortomosaico, es necesario ir generando paso por paso, lo cual puede ser más tardado, además de generar errores al olvidar realizar un paso.

Para el PIX4D:

Ventajas

- La configuración inicial es más sencilla, debido que desde el arranque del programa permite seleccionar todas las características necesarias para el procesamiento de datos, así como de la obtención de los datos finales, de la cual puedes obtener desde curvas de nivel hasta MDE, con tres simples pasos que abarca dicho programa.
- La identificación y exportación de los PCT es más sencilla, debido que incluyendo las coordenadas de los PCT, es posible anclarlos de manera rápida a las imágenes seleccionando dos y posteriormente un marcaje automático con la finalidad de agilizar dicho proceso.
- El ortomosaico generado es más estético, debido a que redondea los bordes con la ayuda de las imágenes obtenidas por el VANT.

Desventajas

- El marcado automático genera demasiado error en la proyección Z, la cual genera una gran desconfiabilidad de los datos, cuando se requiere de precisión.
- El procesamiento para la obtención del MDT más complicado, debido a que no se puede obtener mediante la selección de opciones básicas del programa, si no que se debe realizar otro procesamiento para obtener dicho resultado, lo que requiere de más tiempo.

Dicho lo anterior, se observa que cada uno presenta diferentes características de procesamiento lo que conlleva a decidir por el usuario, el software a utilizar y que por encima de todo permita satisfacer sus necesidades; es ahí, donde se hace el equilibrio entre tiempo y precisión, al hacer el uso de estos dos softwares, donde uno genera menor error en la proyección Z, por lo cual, si se requiere de realizar mediciones como por ejemplo asentamientos, se convierte en una parte fundamental de todo el proceso.

4.2.7. Comparativa de tiempos y costos del método tradicional y el método propuesto en la investigación.

Para comprender mejor el potencial que tiene este trabajo, se realizó la comparativa de tiempos utilizando un método tradicional compuesto por una estación total y un prisma pentagonal; en comparación, con un GPS en modo estático y un VANT, método utilizado en esta investigación, dichos tiempos se muestra en la tabla 23:

Tabla 23. Comparación de tiempos entre los equipos de medición.

Equipos de Medición	Tiempo	
	Medición de Puntos	Levantamiento de patologías
<i>Estación Total y Prisma Pentagonal</i>	-	1 hora 30 minutos, tomando fotografías en todas las calles del área de estudio.
<i>GPS en modo estático y VANT</i>	45 minutos a 1 hora cada PCT, usando dos equipos de medición. Se utilizaron 4 horas por 8 PCT.	9 minutos aproximadamente en un vuelo de doble mallado, cubriendo un área de 27,224 m ²

Por otro lado, en la tabla 24 se muestran a continuación las ventajas y desventajas que tienen los equipos en los levantamientos de este tipo:

Tabla 24. Ventajas y desventajas de los equipos utilizados.

Equipos de Medición	Ventajas	Desventajas
<i>Estación Total y Prisma Pentagonal</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de bajo costo en comparación con un GPS de alta precisión. 	<ul style="list-style-type: none"> • Errores de precisión por distintos factores (viento, visibilidad, coordenadas para ligar puntos erróneos). • Se debe buscar el punto de control más cercano de la Red Geodésica Nacional Pasiva para hacer el enlace desde ese punto hacia alguno de los PCT del área de estudio.
<i>GPS en modo estático y VANT</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Alta precisión en la captura de datos de PCT en campo. • Obtención de coordenadas reales corregidas mediante la Red Geodésica Nacional Activa. • Levantamientos topográficos en grandes extensiones en menor tiempo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de alto costo. • Puede causar errores de precisión cuando se utilizan con mucho viento y nubladas. • Las baterías tienen un rendimiento de medición de 2 horas para que una medición sea confiable.

Por último, en la tabla 25 se mencionan los costos aproximados y los beneficios que se obtienen de uso de cada uno de los equipos.

Tabla 25. Costos y beneficios de los equipos utilizados

Equipo de medición	Equipo para procesamiento	Costo aproximado (\$/Pesos Mexicanos)	Beneficios
Estación total y prisma pentagonal	Equipo de cómputo con los siguientes requerimientos: <ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel core i5 o superior, con más de 3 GHz. • 8 Gb de RAM o más. • Tarjeta gráfica de 4 gb de GPU 	\$200,000.00	<ul style="list-style-type: none"> • Equipo de menos costo que alcances que pudieran ser limitados en tiempo. • Permite el uso en trabajos bajo techo, bosque tupido, presencia de edificaciones y subterráneos.
Gps en modo estático y VANT	Equipo de cómputo con los siguientes requerimientos: <ul style="list-style-type: none"> • Procesador Intel core i7 o superior. • 16 Gb de RAM o más. • Tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 	\$350,000.00	<ul style="list-style-type: none"> • Permite obtener mayor número de puntos en menor tiempo. • Se obtiene mayor información a través de ellos, como por ejemplo: MDE, MDT, topografía, ortofotos, entre otros. • Requerimientos mínimos de personal para su operación de ambos equipos.

también en la infraestructura vial de los fraccionamientos. Hay que mencionar que, se han realizado dos estudios geotécnicos con anterioridad, lo que alude la presencia de una discontinuidad lateral de macizo rocoso; en dichos estudios se realizaron PCAs y SPT, de los cuales se ubicación se muestra en la figura 100, así como también la variación lateral del estrato rocoso.

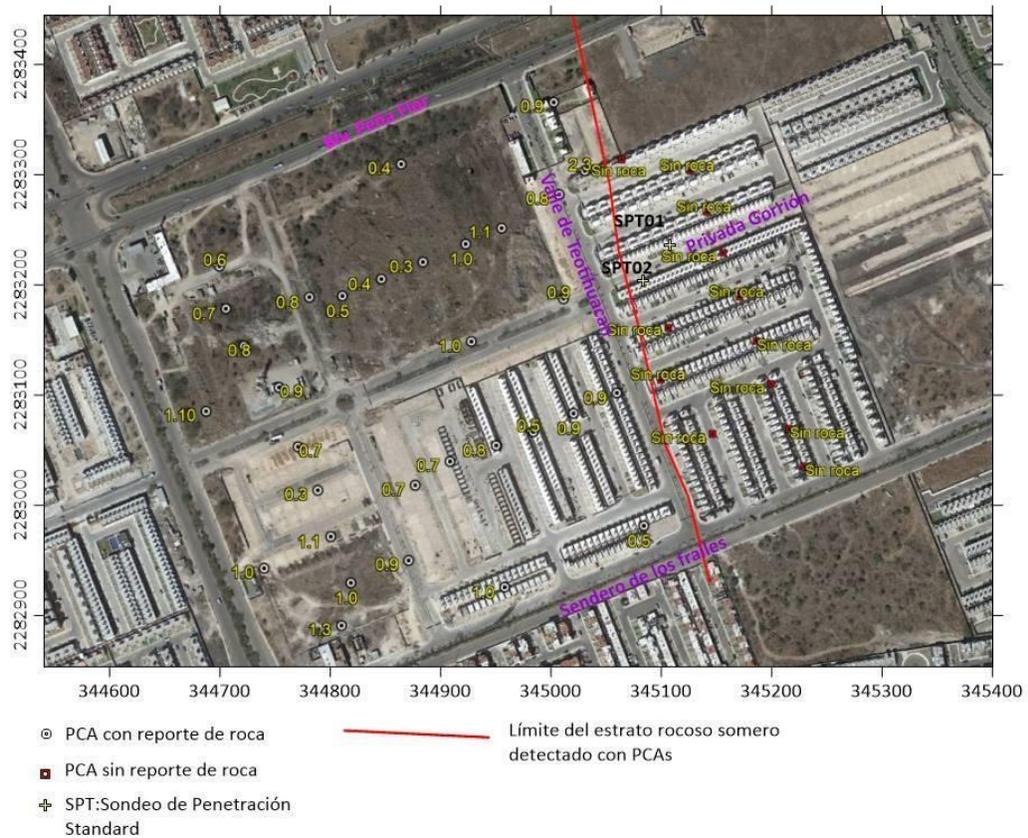


Figura 100. Ubicación de PCAs y SPT en los estudios previos realizados.

Los mayores asentamientos diferenciales de la infraestructura se encuentran en el fraccionamiento “Gorrión”, los cuales se alinean en una traza definida que cruza de sur a norte y atraviesa cuatro fraccionamientos incluido el anterior mencionado.

Es por ello, que para identificar lo mencionado en los párrafos anteriores se procedió a utilizar la metodología para la identificación de dicho fenómeno por medio

de fotogrametría, por lo cual primeramente se ubicaron cuatro PCT y se obtuvieron sus coordenadas, las cuales se muestran en la siguiente tabla 26:

Tabla 26. Coordenadas y elevaciones de PCT en Valle de Santiago

Punto de Control Terrestre	Coordenadas UTM		Elevación (m)
	Norte	Este	Fecha
			28/11/2020
			Medición 1
BN - 1	2283177.7526	345011.4018	1847.5000
BN - 2	2283186.6797	345034.0674	1848.0969
BN - 3	2283361.8922	344984.8807	1850.6345
BN - 4	2283163.4795	345085.8068	1848.0939

Fuente: Elaboración propia (2020)

Posteriormente se realizó el vuelo con el VANT, mediante la planeación en la aplicación Pix4D, la cual se ilustra en la figura 101.

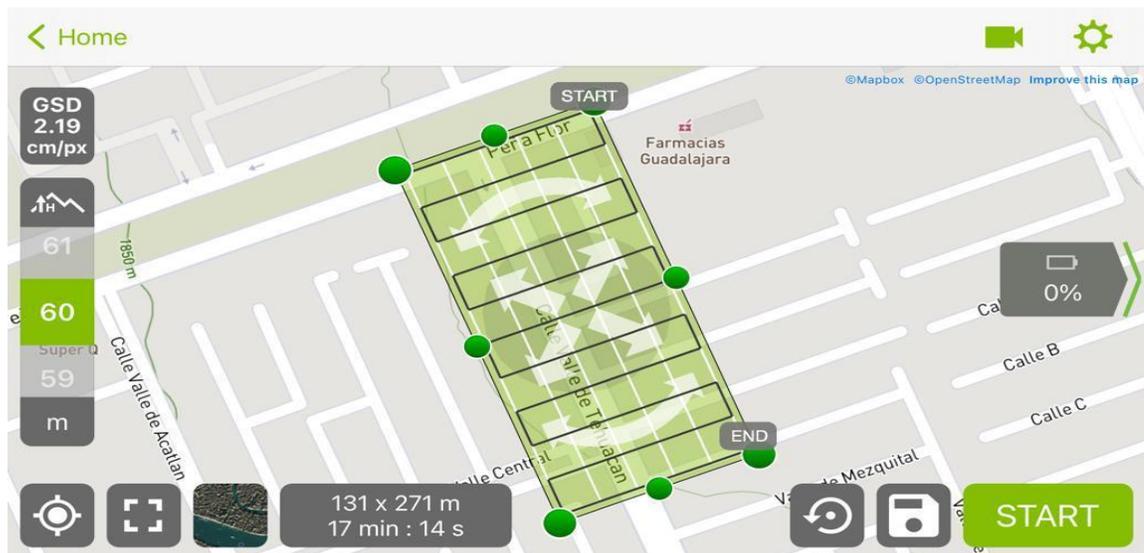


Figura 101. Vuelo programado en Pix4D para la captura de información en Valle de Santiago.

Elaboración propia (2020).

Los resultados obtenidos de dicho vuelo y anclaje a los PCT realizando el procesamiento de dicha información; utilizando 244 imágenes, una altitud de vuelo de 60 m, una resolución de terreno de 1.75 cm/pix y cubriendo un área de 66,400 m².

El ortomosaico resultante del vuelo del VANT, se muestra en la figura 102.



Figura 102. *Ortomosaico de los fraccionamientos en Valle de Santiago. Elaboración propia (2020).*

El MDE obtenido, se muestra en la figura 103 donde se ilustra una interesante gama de colores y es posible identificar de manera rápida, la diferencia de elevaciones en el sitio de estudio, las cuales van desde 1853 msnm a 1838 msnm.

Dicho MDE, fue procesado y modificado mediante ArcMap, debido a que el obtenido por el Agisoft Metashape no estaban muy definidas las elevaciones y causaban confusión.

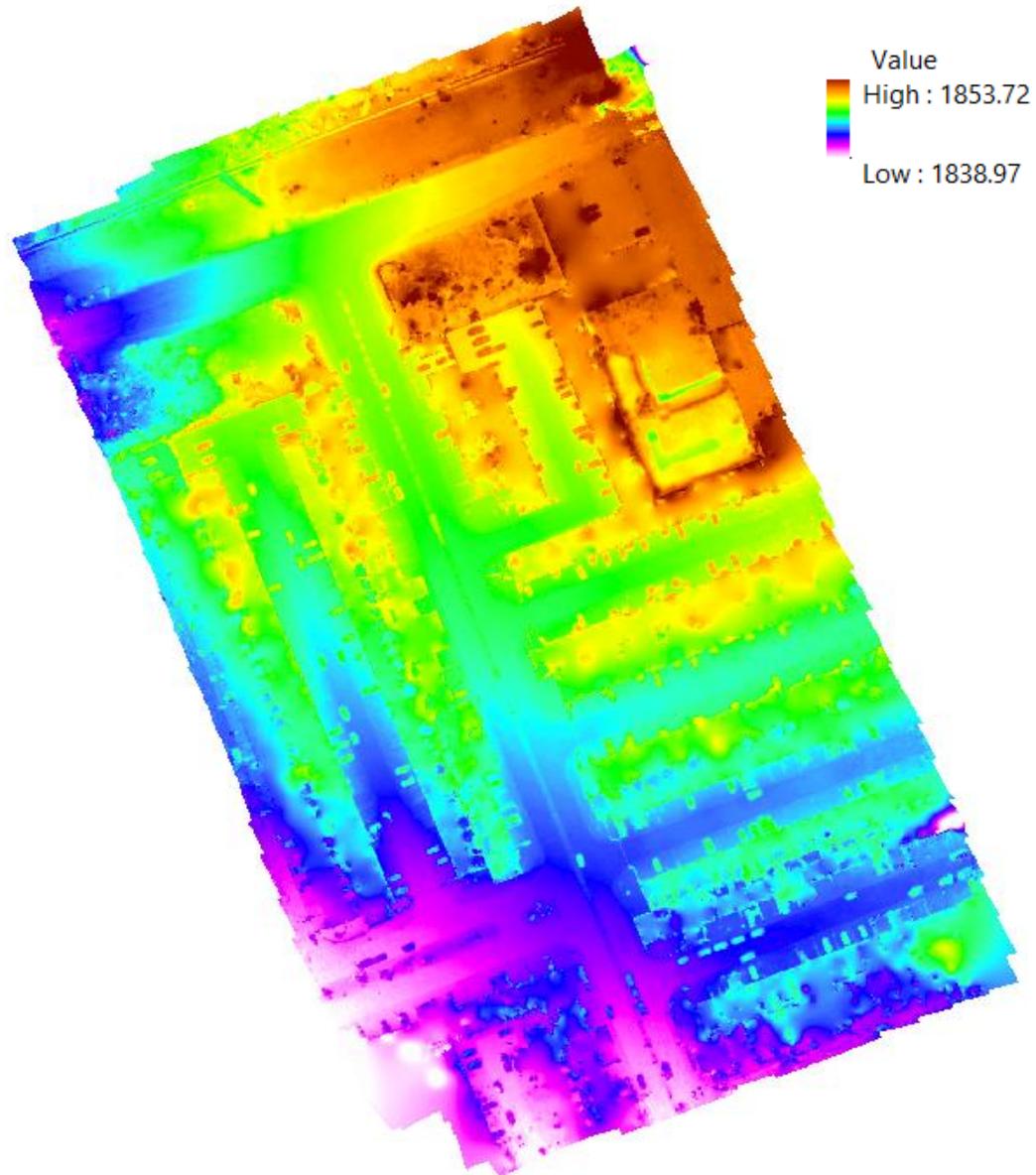


Figura 103. MDT de los fraccionamientos en Valle de Santiago. *Elaboración propia (2020).*

En la figura 103, es posible identificar la discontinuidad lateral que afecta los fraccionamientos de Gorrión, Calandria y Jilguero en la parte central del MDT, la cual va de sur a norte. En la figura 104, se muestra el MDT y la posible ubicación aproximada de la falla que afecta la infraestructura del lugar, cabe mencionar que los desniveles y los movimientos presentados en la zona son muy pequeños y no pueden ser detectados por los vuelos con el VANT, aun usando PCT para tener referencias confiables realizando las correcciones necesarias.

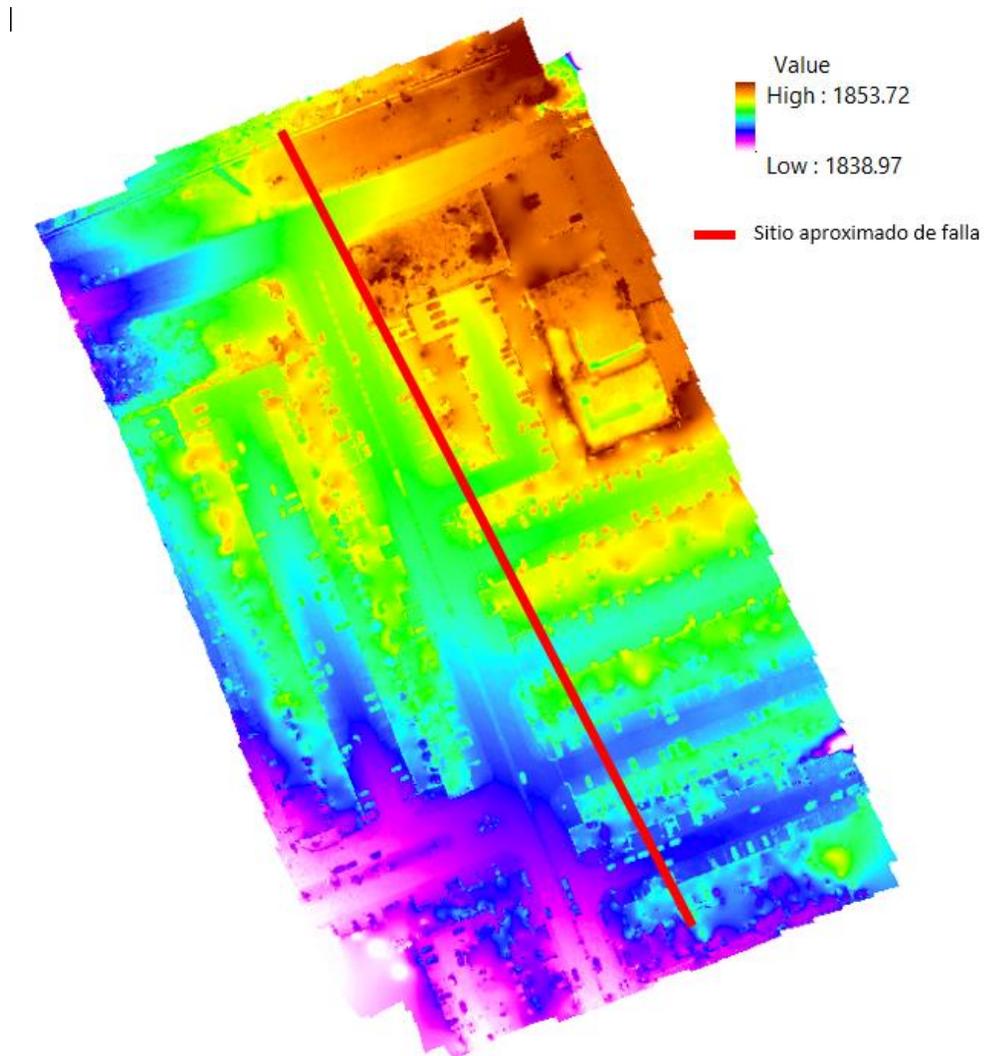


Figura 104. MDT y ubicación de falla en Valle de Santiago. *Elaboración propia (2020).*

Por lo tanto, para emitir un dictamen sobre la situación de este sitio en estudio utilizando dicha metodología expuesta en esta investigación, es necesario que dicha anomalía se siga monitoreando, midiendo PCT y haciendo vuelos con VANT para analizar el comportamiento de todo el sitio de estudio y obtener un mejor dictamen o explicación sobre esta falla. En su caso, esto pudiera complementar los estudios geotécnicos y geofísicos que se han realizado en los fraccionamientos, con la finalidad de emitir un diagnóstico confiable sobre los hechos.

Ahora bien de acuerdo a lo visto anteriormente, se puede hacer la verificación de que la metodología es efectiva, se debe agregar que es recomendable que esta sea aplicada en sitios donde los asentamientos sean más pronunciados para tener mejores resultados. Así mismo, debe ser complementada con monitoreos continuos para identificar con exactitud el comportamiento de cualquier área de estudio; de esta manera hay que mencionar que, los MDE son una herramienta importante para la obtención de información respecto a los asentamientos y agrietamientos de zonas vulnerables por la diferente estratigrafía que puede encontrarse a lo largo del estado de Querétaro y de la República Mexicana.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES

Hoy en día, la tecnología ha evolucionado potencialmente en el ámbito de la ingeniería, obteniendo muchas innovaciones en la realización de tareas para la construcción de distintas obras civiles en México y en el mundo. Es así, como los VANT han abierto camino dentro de la ingeniería y la investigación, debido a su facilidad de uso y pocos requerimientos para poder ser utilizados, considerando que deben ser guiados por las distintas leyes y normas establecidas en nuestro país. Además, los VANT han sido un extraordinario aliado para realizar distintas actividades en las cuales, no implica riesgo alguno para los operadores; asimismo, se ha utilizado para realizar grandes levantamientos topográficos por medio de fotogrametría; y para monitorear áreas después de distintos fenómenos naturales.

Por otro lado, el GPS ejerce también en la actualidad, un papel importante como un magnífico instrumento para adquirir distintos puntos, en cualquier sitio físico de la tierra teniendo como objetivo principal, la obtención de las coordenadas geográficas del lugar.

Ahora bien, parte de esta investigación se centró en usar las dos tecnologías: el VANT y el GPS. Ambas técnicas se han incursionado altamente en la ingeniería, debido los requerimientos mínimos de personal, la operación rápida y confiable de los equipos; además, han potencializado de manera sorprendente la precisión y la reducción del tiempo de recolección de los datos en campo, así como la identificación de daños a través de ortomosaicos y la obtención de modelos digitales de elevación (MDE). Cabe mencionar, que si el VANT es utilizado de forma independiente para la obtención de información, las coordenadas geográficas suelen ser variables por las distintas condiciones del vuelo programado, como puede ser: altura, clima, obstrucciones de edificios, interferencia de satélites, lugar de despegue, calidad del equipo, entre otras más; todo lo anterior debido a que, durante los distintos vuelos que puedan realizarse con el mismo plan de vuelo mediante la aplicación móvil, se generan múltiples variaciones entre las

coordenadas geográficas, las cuales alcanzan en algunas ocasiones variaciones de centímetros hasta metros.

La metodología utilizada en la presente investigación basada en el uso de tecnologías como el VANT y el GPS, en conjunto con el uso de softwares especializados como Topcon Tools, ArcGIS, Agisoft Metashape y Pix4Dmapper, me permitió modelar y conocer la diferencia de los asentamientos actuales, además de los agrietamientos que tienen los pavimentos de un la colonia “El Ensueño”, en la cual desde hace años presenta una falla por subsidencia, la cual ha provocado cuantiosos daños en toda la infraestructura en general; para este caso en específico de la investigación, se utilizaron PCT como apoyo para tener más precisión en los levantamientos que se realizaron en el área, mediante los cuales se obtuvo una mayor precisión sobre la ubicación de la falla por subsidencia que atraviesa la colonia, la cual ha provocado distintos asentamientos y agrietamientos, además de las diferentes alertas entre los colonos. A través de esta metodología, fue posible medir los asentamientos de la falla y diagnosticar la severidad de los daños que le ocasionan estos movimientos a los pavimentos, de acuerdo a estos resultados es se pueden proponer soluciones para el mantenimiento o restauraciones de los pavimentos en general de una manera más factible.

Con respecto a la unificación de las tecnologías y el uso de distintos softwares para el procesamiento de la información obtenida en campo, es posible conocer los diferentes errores de cada PCT mediante el procesamiento de dicho puntos tomando en cuenta los pixeles de las fotografías obtenidas mediante el vuelo del VANT; ambos softwares, tanto el Agisoft Methashape como el PIX4Dmapper, calculan dichos errores mediante la fórmula del Error Cuadrático Medio (ECM), el cual corresponde a la diferencia entre las posiciones inicial y la calculada de los PCT; de esta manera, se calculan los errores totales en las dimensiones X, Y y Z; ahora puedo decir que, esto depende de la forma en que se modifican los pixeles durante el procesamiento con los diferentes softwares o en la obtención de las

fotografías; además de la cantidad de fotografías con las que son georreferenciadas durante el procesamiento realizado.

Dicho lo anterior, para el procesamiento con ambos softwares: el Agisoft Metashape y el Pix4Dmapper, se utilizaron las mismas fotografías capturadas con el VANT y los puntos estáticos obtenidos con el GPS; por lo tanto, se obtuvieron los errores por ambos softwares, donde se pudo determinar que en el Pix4D se adquieren errores totales mayores, los cuales son de hasta 8 centímetros más que en el Agisoft Metashape. Cabe mencionar que estos resultados fueron los obtenidos para el caso en estudio en la colonia “El Ensueño”, por lo cual estos resultados pueden variar de acuerdo a la metodología usada o en su caso, cuando se realiza el procesamiento para la identificación de los PCT en cada una de las fotografías, lo cual eso puede afectar la precisión considerando los diferentes ángulos de cada una de las imágenes consideradas.

Considerando los asentamientos registrados y teniendo como resultado del análisis digital y de campo los cambios de niveles en los PCT distribuidos en la colonia, y los cuales se registraron a lo largo del periodo de análisis, mismo que colaboró para la determinación de las afectaciones registradas durante esta investigación, de manera puntual se determinó derivado del análisis realizado que todos los PCT tuvieron movimientos, de cuales el mínimo asentamiento que se tuvo fue de 0.50 centímetros localizado en los PCT denominado como BN-4 y BN-5; y el mayor asentamiento se tuvo en el BN-8 con un valor de 5.70 centímetros, ambos asentamientos fueron obtenidos de la diferencia entre la primera medición realizada el 21 y 22 de noviembre de 2019 y la última con fecha 19 de octubre de 2020, con un periodo de diferencia de 11 meses entre éstas.

Ahora bien, realizando el análisis de los MDE obtenidos del procesamiento de la información, se puede observar físicamente en los MDT tanto como en lo MDS procesados por los softwares Agisoft Metashape y el Pix4Dmapper, que la localización de la falla por subsidencia es bastante notoria al atravesar por completo

la colonia “El Ensueño”, la diversidad de colores en los modelos son de gran ayuda debido a que con ellos se puede identificar con facilidad y rapidez, si en un área en específico se encuentra una discontinuidad, lo cual puede ser una aporte importante para la creación de Atlas de Riesgo, en este caso para el del Estado de Querétaro.

Ahora bien, el procesamiento de las fotografías y los PCT fue el mismo para ambos softwares, pero existen diferencias muy notorias en los resultados de cada uno de ellos; por ejemplo, en los MDT y MDS obtenidos en Agisoft Metashape, estos modelos son muy parecidos debido a que la textura es prácticamente la misma y la única diferencia es que se alcanzan distinguir un poco más las estructuras y los árboles en el MDS; por otro lado, en el Pix4Dmapper, las diferencias si son realmente notorias, como se puede apreciar la diferencia espectacular de texturas entre el MDT y MDS, considerando que en el MDS se encuentran las estructuras y los árboles, la falla es muy notoria y cuenta con una alta definición.

Por otro lado, se realizó una inspección visual donde se tomaron distintas fotografías, en ellas se puede observar claramente los desniveles que tienen los pavimentos respecto a un lado y el otro de la falla; y también los distintos agrietamientos con los que cuentan en la zona, además se observaron los daños con los que cuentan las viviendas por los asentamientos que se presentan. Cabe mencionar que, los habitantes han recurrido a demoler algunas partes de sus viviendas o en algunos casos en su totalidad, con la finalidad de salvaguardarse un poco y evitar todos los riesgos que consideran este fenómeno, el cual se atribuye que se ha desarrollado principalmente por la extracción de agua subterránea que se hace en las zonas aledañas, en particular se intentó realizar este análisis de los pozos profundos de extracción de agua que se ubican alrededor del área y que puedan contribuir para que los asentamientos se estén dando de una forma acelerada, pero no pudo complementarse debido a que la información de la infraestructura existente a cargo del Organismo Operador era clasificada de

acuerdo a sus lineamientos establecidos en sus acuerdos, con la finalidad de no poner el riesgo dicha infraestructura.

De la misma manera, se comprobó que a través de la obtención de ortomosaicos mediante fotogrametría de alta resolución, se pueden conocer los agrietamientos en las capas superficiales de los pavimentos, con la finalidad de conocer la severidad de daños y realizar programas de mantenimiento rutinarios en lugares donde se requiera esta acción y poder repararlos. El principal beneficio del uso de ortomosaicos, es que requieren mínimo personal y tiempo para poder realizar la inspección de los mismos, con ellos se puede obtener las dimensiones de largo y ancho de las grietas con el uso de software sin necesidad de realizar una tarea complicada.

Ahora bien, prosiguiendo con el análisis efectuado del comportamiento para cada uno de los PCT, en las figuras de la 72 a la 79 se muestra la relación estadística de cada una de las cinco mediciones efectuadas en cada PCT, en ellas es posible visualizar los asentamientos diferenciales en nada banco de nivel durante el periodo de la investigación en el área de estudio. En cada PCT, se puede observar que la correlación lineal (R^2) se encuentra dentro de los parámetros de 0.83 a 0.93 en cada uno de ellos, lo cual resulta ser muy semejante en todos. Por lo tanto, se puede inferir que la colonia “El Ensueño”, se asienta de una manera homogénea.

De acuerdo con los resultados obtenidos de esta investigación, se determinó que la colonia “El Ensueño” continuará presentando asentamientos en distintos puntos, así como también daños en la infraestructura urbana, debido a que esta colonia se encuentra a lo largo de una falla por subsidencia detectada y estudiada desde hace algunos años y que se encuentra en continuo movimiento como se pudo comprobar a lo largo de esta investigación, es por ello que, los pavimentos seguirán presentando desgastes superficiales y daños en las capas superficiales del mismo. Por consiguiente, se confirma que la zona es un lugar inestable por efectos de

subsidencia y que se tiene que atender a la brevedad esta problemática, con la finalidad de poner a salvo a los habitantes de dicha colonia.

Se debe agregar que, de acuerdo al análisis realizado en esta investigación la metodología utilizada es un excelente apoyo para la identificación de los agrietamientos en los pavimentos mediante el uso de ortomosaicos y MDEs; así mismo, se pudieron identificar los sitios con más asentamientos ocasionados por la falla existente. Los ortomosaicos son una excelente herramienta que permite la ubicación e identificación de las áreas en los pavimentos que requieren de atención inmediata por la severidad de daño que presenta la carpeta superficial, todo esto en un periodo corto de tiempo realizando un vuelo con el VANT de tan solo unos minutos, comparado con una inspección visual la cual puede tomar horas, sin considerar el desgaste físico que puede provocar esta actividad, se puede asegurar que usando un GPS en modo estático para obtener puntos con una excelente precisión y un VANT para obtener un levantamiento de excelente resolución, se puede ahorrar hasta un 80% de tiempo comparando los tiempos que se ocupan para obtener datos en campo de un área extensa, además del procesamiento de los datos que se obtienen, los cuales resultan ser bastantes. Por otro lado, se obtiene una precisión mínima de +/- 2.70 centímetros de error para este trabajo, lo cual puede mejorar realizando un mejor marcaje en los PCT del Agisoft Metashape, ya que esta es una interpolación de todos los marcajes que se realizan en las diferentes fotos obtenidas considerando la posición o ángulo de la cámara con la que fueron capturadas, además de los píxeles que representan un trabajo significativo en el procesamiento de las mismas.

De igual modo, mediante un procesamiento de información en el software ArcGIS se obtuvieron los perfiles de escalonamiento en dos calles principales donde a atraviesa la falla; el primer perfil mostrado en la figura 96, se ubicó en la calle Cayetano Rubio y el segundo perfil en la calle Salvador Septién, ambos de manera transversal para obtener el escalonamiento de la falla. En ellas fue posible observar

un desnivel notorio entre un punto y el otro, cabe mencionar que dichos escalonamientos se seguirán presentando por dicho fenómeno existente y de la misma manera los pavimentos seguirán presentando daños, ya que este fenómeno no puede controlarse, siendo parte importante la sobreexplotación de aguas subterráneas.

Ahora bien, podríamos considerar que para determinar una falla por subsidencia en un terreno virgen, es necesario analizar si existe extracción de agua mediante pozos profundos en sitios aledaños o incluso en la zona; debido que a través de ellos se pudiera ir desarrollando dicho fenómeno; siendo así, con el uso de un VANT y realizando un levantamiento para obtener un MDE del terreno, se pudieran obtener diferentes detalles que colaborarían para el diagnóstico de dicho lugar, debido a que al no haber construcciones es más fácil el procesamiento de la información.

Por consiguiente, está investigación propició que a través del uso de nuevas tecnologías, se puedan realizar evaluaciones de infraestructura eficientemente en un corto periodo de tiempo; la metodología utilizada es de gran impacto y puede ser utilizada por las dependencias de gobierno para determinar áreas de riesgo o vulnerables por fenómenos naturales y de esta manera se puedan tomar las medidas de prevención necesarias para salvaguardar la integridad de todas las personas que pudieran estar en peligro; por otro lado, también se puede utilizar para saber cuándo es necesaria la rehabilitación de pavimentos de una zona específica mediante una inspección de las capas superficiales de los pavimentos, con el objetivo de tener parámetros iniciales que contribuyan a tener una noción de que tipo de solución tendría la capa de rodadura para un mejor funcionamiento y durabilidad.

BIBLIOGRAFÍA O REFERENCIAS

- Abellaneda, D. (2016). Estudio y análisis de la subsidencia del terreno en la cuenca del Alto Guadalentín. Investigaciones previas, evolución, causas y consecuencias. (*Tesis de Maestría*). Universidad de Alicante, Alicante, España.
- Adlinge, S., & Gupta, A. (2013). Pavement Deterioration and its Causes. *International Journal of Innovative Research & Development*, 437-450.
- Aguirre, G., Zuñiga, R., Pacheco, F., Guzman, M., & Nieto, J. (2012). El graben de Querétaro, México. Observaciones de fallamiento activo. *GEOS*, 20(1), 1-27.
- Akturk, E., & Altunel, A. (2018). Accuracy Assessment of a Low-Cost UAV Derived Digital Elevation Model (DEM) in a Highly Broken and Vegetated Terrain. *Measurement*, 136, 382-386.
- Anguiano, M., Corral, L., Trujillo, G., Salas, D., & García, A. (2018). Topographic investigation from a low altitude unmanned aerial vehicle. *Optics and Lasers in Engineering*, 110, 63-71.
- Arriola, S., Barahona, A., Miller, C., & Rimolo, R. (2016). Diseño de un sistema de adquisición de datos para fotogrametría con vehículos aéreos no tripulados (UAV). *Tecnología en Marcha.*, 29(4), 92-101.
- Ávila, J., & Garduño, V. (2008). A GPR study of subsidence-creep-fault processes in Morelia, Michoacán, Mexico. *Engineering Geology*, 100, 69-81.
- Banerjee, A., & Ray, S. (2019). Spatial Models and Geographic Information Systems. *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. Encyclopedia of Ecology (Second Edition)*, 2, 178-188.

- Barmounakis, E., Vlahogianni, E., & Golias, J. (2017). Unmanned Aerial Aircraft Systems for transportation engineering: Current practice and future challenges. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 5, 111-122.
- Burger, W., & Burge, M. (2009). *Principles of Digital Image Processing*. London: Springer-Verlag London Limited.
- Cabral, E., Díaz, M., & Delgado, H. (2011). Subsidencia y sus mapas de peligro: Un ejemplo en el área nororiental de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 63(1), 53-60.
- Carreón, D., Cerca, M., Luna, L., & Gámez, F. (2005). Influencia de la estratigrafía y estructura geológica en el flujo de agua subterránea del Valle de Querétaro. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 22(1), 1-18.
- Carreón, D., Cerca, M., & Galloway, D. (2010). *Land Subsidence, Associated Hazards and the Role of Natural Resources Development*. (Vol. 339). Querétaro, México: Wallingford, Oxfordshire : International Association of Hydrological Sciences, 2010.
- Carreón, D., Cerca, M., Ochoa, G., Teatini, P., & Zuñiga, F. (2016). Shearing along faults and stratigraphic joints controlled by land subsidence in the Valley of Queretaro, Mexico. *Hydrogeology Journal*, 24(3), 657-674.
- Carreón, D., Hidalgo, C., & Hernández, M. (2006). Mecanismos de fracturamiento de depósitos arcillosos en zonas urbanas. Caso de deformación diferencial en Chalco, Estado de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*(2), 237-250.
- Castellazzi, P., Ivera, A., Arroyo, N., Martel, R., Calderhead, A., Normand, J., & Gárfias, J. (2016). Land subsidence in major cities of Central Mexico: Interpreting InSAR-derived land subsidence mapping with hydrogeological

- data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 47, 102-111.
- Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral, E., & Amelung, F. (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series. *Remote Sensing of Environment*, 140, 94-106.
- Chávez, O. (2008). Modelación física - experimental del fenómeno de subsidencia. (*Tesis de Maestría*). Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid, España.: Ediciones RIALP, S.A.
- Colomina , I., & Molina , P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79-97.
- Comba, L., Biglia, A., Ricauda, D., & Gay, P. (2018). Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture. *Computers and Electronics in Agriculture*, 155, 84-95.
- Corapcioglu, M. (1984). Land subsidence-a state-of-the-art review. *Fundamentals of Transport Phenomena in Porous Media*, 369-444.
- Cortés, J., Medina, F., & Mendoza, J. (2010). Implementación de un sistema de posicionamiento global utilizando el módulo GPS SIRFSTARIII. MTI-6 DE STARSNAV. *Scientia et Technica Año XVI*, 45, 233-238.
- Domingo, J., Duarte, J., Moreno, M., Puig-Vidal, M., & Samitier, J. (2000). Caracterización automática de pequeños actuadores por láser. *Proc. Seminario Anual de Automática, Electrónica Industrial e Instrumentación SAAEI'00*, (págs. 253-256). Cataluña, España.

- Duarte, J., Fernández, F., & Moreno, M. (2009). Técnicas para medida para pequeños desplazamientos. *Dyna*, 76(158), 167-176.
- Eisenbeiss, H. (2009). *UAV Photogrammetry*. Zurich, Germany: Institute of Geodesy and Photogrammetry Swiss Federal Institute of Technology Zurich Wolfgang-Pauli-Strasse 15.
- Escalante, J., Cáceres, J., & Porras, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Tecnura*, 20(50), 119-140.
- Fernández, J., & Gutiérrez, G. (2016). Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89-105.
- Figuroa, S., Vargas, J., Ramos, J., Hernández, V., & Villaseñor, C. (2018). Land subsidence by groundwater over-exploitation from aquifers in tectonic valleys of Central Mexico: A review. *Engineering Geology*, 246.
- Freimuth, H., & König, M. (2018). Planning and executing construction inspections with unmanned aerial vehicles. *Automation in Construction*, 96, 540-553.
- Galloway, D., Jones, D., & Ingebritsen, S. (1999). Land Subsidence in the United States. *U.S. Geological Survey Circular 1182*.
- González, R., Woods, R., & Eddins, S. (2009). *Digital Image Processing Using MATLAB® Second Edition*. Estados Unidos de América: Gatesmark Publishing®.
- González, L., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson Educación.
- González, R., Woods, R., & Eddins, S. (2020). *Digital Image Processing Using MATLAB, 3rd edition*. Gatesmark Publishing.
- Greenwood, W., Lynch, J., & Zekkos, D. (2019). Applications of UAVs in Civil Infrastructure. *J. Infrastruct. Syst.*, 25(2), 1-20.

- Gross, J., & Heumann, B. (2016). A Statistical Examination of Image Stitching Software Packages For Use With Unmanned Aerial Systems. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82, 419-425.
- Herrera, G., Fernández, J., Tomás, R., Cooksley, G., & Mulas, J. (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia (SE Spain) using A-DInSAR data – modelling and validation. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 647-661.
- INEGI. (2019). *Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción*.
- Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander Von Humboldt. (2006). Los Sistemas de Información Geográfica. *Geoenseñanza*, 11(1), 107-106.
- Kenner, R., Bühler, Y., Delaloye, R., Ginzler, C., & Phillips, M. (2014). Monitoring of high alpine mass movements combining laser scanning with digital airborne photogrammetry. *Geomorphology*, 206, 492-504.
- Laribi, A., Walstra, J., Ougrine, M., Seridi, A., & Dechemi, N. (2015). Use of digital photogrammetry for the study of unstable slopes in urban areas: Case study of the El Biar landslide, Algiers. *Engineering Geology*, 187, 73-83.
- Liew, L., Wang, Y., & Cheah, W. (2012). Evaluation of Control Points' Distribution on Distortions and Geometric Transformations for Aerial Images Rectification. *Procedia Engineering*, 41, 1002-1008.
- Liosis, N., Marpu, P., Pavlopoulos, K., & Ouarda, T. (2018). Ground subsidence monitoring with SAR interferometry techniques in the rural area of Al Wagan, UAE. *Remote Sensing of Environment*, 216, 276-288.
- Lira, P. (2016). Estudio de la vulnerabilidad estructural de las construcciones ante fracturamientos por subsidencia. *Tesis de Maestría*. Universidad Autónoma de Aguascalientes, Aguascalientes.

- Llenera , E., & Suárez, E. (2015). Sistema de navegación para personas no videntes, mediante el uso del sistema de posicionamiento híbrido (GPS & GLONAS), para la Universidad de las Fuerzas Armadas -ESPE. 1-12.
- Manson, S., Bonsal, D., Kernik, M., & Lambin, E. (2015). Geographic Information Systems and Remote Sensing. *International Encyclopedia of the Social & Behavioral Sciences*, 64-68.
- Marsal, R., & Mazari, M. (1959). El subsuelo de la Cd. de México. *México, D. F. UNAM, Fac. de Ingeniería, I y II*, 505 pp.
- Martínez, P., Agüera, F., Carvajal, F., Mesas, F., García, A., & Pérez, F. (2018). Assessment of UAV-photogrammetric mapping accuracy based on variation of ground control points. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 72, 1-10.
- Medellín, G. (2015). Evaluación y proyección de daños por el fenómeno de subsidencia en la Avenida 5 de Febrero y propuesta de solución. (*Tesis de Maestría*). Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro.
- Meinzer, O. (1928). Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Economic Geology*, 23(3), 263-291.
- Miller, M., & Shirzaei, M. (2019). Land subsidence in Houston correlated with flooding from Hurricane Harvey. *Remote Sensing of Environment*, 225, 368-378.
- Nex, F., & Remondino, F. (2013). UAV for 3D mapping applications: a review. *Applied Geomatics*, 6(1), 1-15.
- Ochoa, G., Carreón, D., Franceschini, A., Cerca, M., & Teatini, P. (2018). Overexploitation of groundwater resources in the faulted basin of Querétaro, Mexico: A 3D deformation and stress analysis. *Engineering Geology*.

- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*. España: CreateSpace Independent Publishing Platform.
- Pacheco, J. (2007). Modelo de subsidencia del valle de Querétaro y predicción de agrietamientos superficiales. (*Tesis de Doctorado*). Universidad Autónoma de México, Santiago de Querétaro, Querétaro.
- Pacheco, J., Arzate, J., Rojas, E., Arroyo, M., Yutsis, V., & Ochoa, G. (2006). Delimitation of ground failure zones due to land subsidence using gravity data and finite element modeling in the Querétaro valley, México. *Engineering Geology*, 83, 143-160.
- Pacheco, J., Hernández, M., Burbey, T., González, N., Ortiz, J., Zermeño, M., & Solís, A. (2013). Land subsidence and ground failure associated to groundwater exploitation in the Aguascalientes Valley, México. *Engineering Geology*, 164, 172-186.
- Pan, Z., An, L., & Wen, C. (2019). Recent advances in fuel cells based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. *Applied Energy*, 240, 473-485.
- Patterson, T., McClean, S., Morrow, P., Parr, G., & Luo, C. (2014). Timely autonomous identification of UAV safe landing zones. *Image and Vision Computing*, 32(9), 568-578.
- Peña, J. (2010). *Sistemas de información geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Alicante, España: Departamento de Ecología, Universidad de Alicante.
- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. Salamanca: Ed. Ávila.
- Pérez, J. (2001). Apuntes de fotogrametría III. (*Tesis de Licenciatura*). Universidad de Extremadura, Centro Universitario de Mérida, Mérida, España.

- Ping Hu, J., Bin Wu, W., & Lin Tan, Q. (2012). Application of Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing for Geological Disaster Reconnaissance Along Transportation Lines: A Case Study. *Applied Mechanics and Materials*, 2376-2379.
- PIX4D. (2015). *Designing the images acquisition plan*.
- Poland, J. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. UNESCO Studies and Reports in Hydrology no. 40.: New York; Unipublications.
- Poland, J., Lofgren, B., & Riley, F. (1972). Glossary of selected terms useful in studies of the mechanics of aquifer systems and land subsidence due to fluid withdrawal. *U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2025*.
- Raina, P., Mudur, S., & Popa, T. (2019). Sharpness fields in point clouds using deep learning. *Computers & Graphics*, 78, 37-53.
- Rico, A., & Del Castillo, H. (2005). *La Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres. Carreteras, Ferrocarriles y Aeropistas* (Vol. II). (N. Editores, Ed.) D.F., México: Limusa.
- Rodríguez, R., & Rodríguez, I. (2006). Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 58(2), 265-269.
- Ruzgienė, B., Berteška, T., Gečyte, S., Jakubauskienė, E., & Aksamitauskas, V. (2015). The surface modelling based on UAV Photogrammetry and qualitative estimation. *Measurement*.
- Sahu, P., & Sikdar, P. (2011). Threat of land subsidence in and around Kolkata City and East Kolkata Wetlands, West Bengal, India. *Journal of Earth System Science*, 120(3), 435-446.

- Salas, P. (2019). Identificación de agrietamientos superficiales por medio de un vehículo aéreo no tripulado (UAV). (*Tesis de Maestría*). Universidad Autónoma de Querétaro, Santiago de Querétaro, Querétaro.
- Samad, A., Kamarulzaman, N., Hamdani, M., Mastor, T., & Hashim, K. (2013). The Potential of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Civilian and Mapping Application. *IEEE 3rd International Conference on System Engineering and Technology*, 313-318.
- Saxena, A., Sun, M., & Y. Ng. , A. (2009). Make3D: Learning 3D Scene Structure from a Single Still Image. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 31(5), 824-840.
- Secretaría de Comunicaciones y Transporte. (2019). Requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) en el espacio aéreo mexicano. *Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019. Diario Oficial de la Federación*.
- Seo, J., Duque, L., & Wacker, J. (2018). Drone-enabled bridge inspection methodology and application. *Automation in Construction*, 94, 112-126.
- Shviro, M., Haviv, I., & Baer, G. (2017). High-resolution InSAR constraints on flood-related subsidence and evaporite dissolution along the Dead Sea shores: Interplay between hydrology and rheology. *Geomorphology*, 293, 53-68.
- Siebert, S., & Teizer, J. (2014). Mobile 3D mapping for surveying earthwork projects using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) system. *Automation in Construction*, 41, 1-14.
- Sieberth, T., Wackrow, R., & Chandler, J. (2016). Automatic detection of blurred images in UAV image sets. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 122, 1-16.

- Sobrino, J. (2003). *Teledetección*. España: Servicios de Publicaciones, Universidad de Valencia.
- Suárez, L., & Regueiro, M. (1997). *Guía ciudadana de los riesgos geológicos. The American Institute of Professional Geologists (Versión española ed.)*. Madrid, España: Ilustre Colegio Oficial de Geólogos de España.
- Tomás, R.; Herrera, G.; Delgado, J.; Peña, F.; (2009). Subsidencia del Terreno. *Enseñanza de las Ciencias de la Tierra*, 17, 295-302.
- U.S. Department of Transportation Federal Highway. (2014). *Distress Identification Manual for the Long-Term Pavement Performance Program*.
- Vázquez, J., & Backhoff, M. (2017). *Proceso geo-informático de datos generados mediante drones para la gestión de infraestructura del transporte*. Sanfandila, Qro.: Publicación Técnica No. 490.
- Villareal, J. (2015). Análisis de la precisión de levantamientos topográficos mediante el empleo de vehículos aéreos no tripulados (UAV) respecto a la densidad de puntos de control. *Tesis de Licenciatura*. Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador.
- Yuste, R., Del Barrio, J., Vargas, N., & Moya, J. (2013). Teledetección Ambiental de Alta Resolución mediante aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados. 6° *Congreso Forestal Español*. Victoria-Gasteiz: Sociedad Española de Ciencias Forestales.
- Zeybek, M., & Şanlıoğlu, İ. (2018). Point Cloud Filtering on UAV Based Point Cloud. *Measurement*.
- Zhang, B., Lu, C., Wang, J., Sun, Q., He, X., Cao, G., . . . Gong, B. (2019). Using storage of coal-mining subsidence area for minimizing flood. *Journal of Hydrology*, 572, 571-581.

- Zhong, Y., Ma, A., Ong, Y., Zhu, Z., & Zhang, L. (2018). Computational intelligence in optical remote sensing image processing. *Applied Soft Computing*, 64, 75-93.
- Zhu, Z., Zhou, Y., Seto , K., Stokes, E., Deng, C., Pickett, S., & Taubenböck, H. (2019). Understanding an urbanizing planet: Strategic directions for remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 228, 164-182.

ANEXOS

GLOSARIO

Fundamentos geodésicos

La Geodesia esferoidal es la ciencia que establece la ciencia que establece la forma y dimensiones de la Tierra, además ésta ayuda a elaborar el marco teórico para el establecimiento de los sistemas de referencias y la definición de los vértices geodésicos; siendo así, estos vértices colaboran en el cálculo de las coordenadas de cualquier punto en un sistema de referencia definido, considerando que el elipsoide es la forma geométrica que más se adapta a la forma real de la Tierra (Olaya, 2014). El mismo autor continúa, indicando que un elipsoide se encuentra determinado por dos parámetros: el semieje mayor (r_1) y el semieje menor (r_2) expuestos en la figura 99.

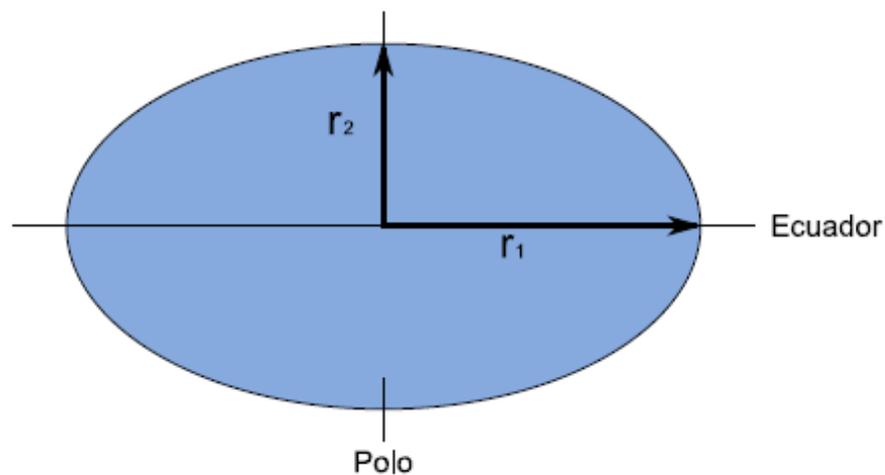


Figura 105. Parámetros que definen el elipsoide. Fuente: Olaya (2014)

El elipsoide WGS 84 (*World Geodetic System 84*) es un sistema de coordenadas utilizado mundialmente que explora cualquier punto de la Tierra, sus parámetros característicos son: semieje mayor 6378137 m y semieje menor 6356752.714 m. Al vínculo de un sistema de coordenadas con la Tierra se le conoce

como *datum* geodésico, el cual define la orientación de un elipsoide determinado de la superficie terrestre, para construir, observar y calcular su red geodésica extendida al territorio nacional con fines científicos y cartográficos, constituyendo un medio de conexión uniforme entre distintos trabajos.

Teledetección

La adquisición de información a distancia, sin entrar en contacto material con el objeto observado, a través de sensores localizadas en plataformas móviles o satélites es conocida como teledetección (Sobrino, 2003 y Zhong *et al.*, 2018).

Zhu *et al.* (2019) menciona que en los últimos cincuenta años las contribuciones científicas de la teledetección han mejorado en distintas áreas urbanas como por ejemplo: la caracterización de áreas urbanas, los cambios en la cobertura del suelo urbano y la teledetección térmica de climas urbanos

Pérez y Muñoz (2006), aluden que un sistema de teledetección espacial parte de la interacción de los siguientes componentes: una fuente generadora de radiación electromagnética (el sol), que pasa a través de la atmosfera y es reflejada en la cubierta terrestre para después ser recogida por un sensor óptico-electrónico situado en plataformas espaciales, los cuales se muestran en la figura 100. En los sistemas de recepción se hace un primer tratamiento de la imagen que permite la depuración de algunos errores geométricos o radiométricos, para finalmente, la imagen digital pueda ser analizada por los usuarios mediante procesos visuales o digitales y poder así crear mapas temáticos o tablas estadísticas que describan el comportamiento de una variable espacial.

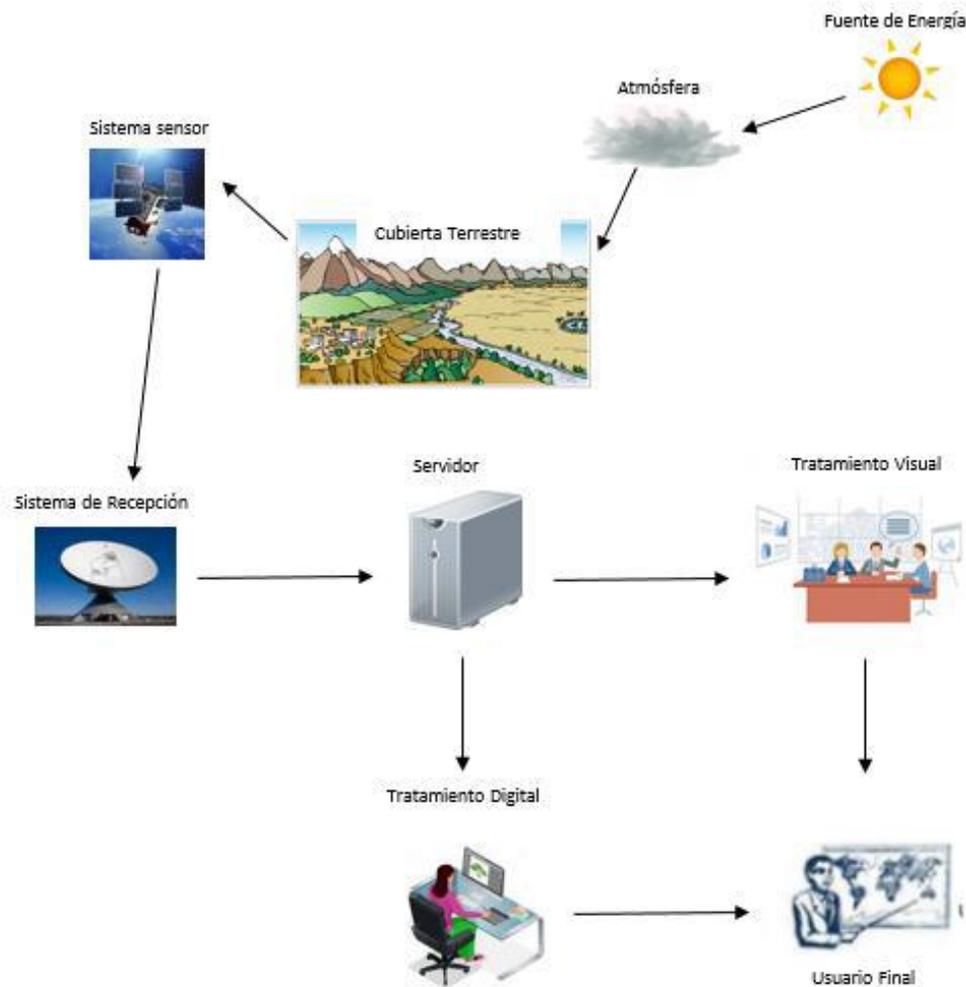


Figura 106. Elementos que intervienen en la teledetección. Fuente: Tomado de Salas (2019), adaptado de Chuvieco (1995)

Modelo digital de elevación (MDE)

INEGI (2019), alude que un modelo digital de elevación (MDE) es una representación visual y matemática de los valores de altura relacionadas al nivel medio del mar, el cual posibilita caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo; Akturk y Altunel (2018) citan que los MDE se utilizan con frecuencia en estudios relacionados con la geología, el medio ambiente,

la ingeniería y la arquitectura. Los mismos autores continúan, aludiendo que para áreas de difícil acceso o condiciones difíciles, es factible producir un MDE con imágenes VANT de bajo costo y la precisión obtenida sería suficientemente comparable con otros métodos. Por otro lado INEGI (2019), mencionan que existen dos tipos: uno es el Modelo Digital de Superficie (MDS) que representa todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno mostrado en la figura 101; y el otro es el Modelo Digital del Terreno (MDT), el cual produce la forma del terreno una vez que fueron removidos todos los elementos ajenos al mismo como son la vegetación, edificaciones y demás elementos que no forman parte del terreno como se muestra en la figura 102:

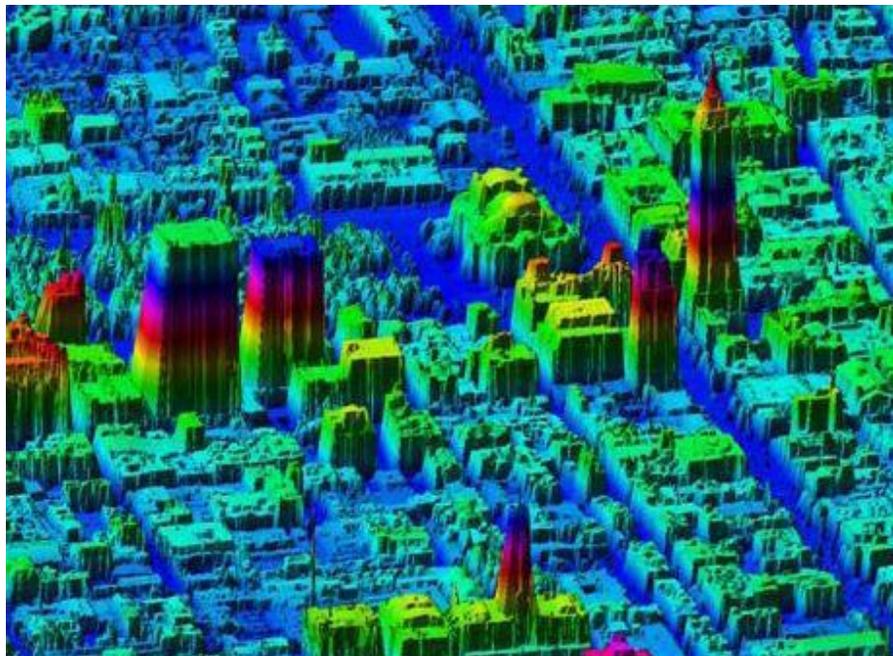


Figura 107. Modelo Digital de Superficie LIDAR del Distrito Federal. Fuente: INEGI (2019).

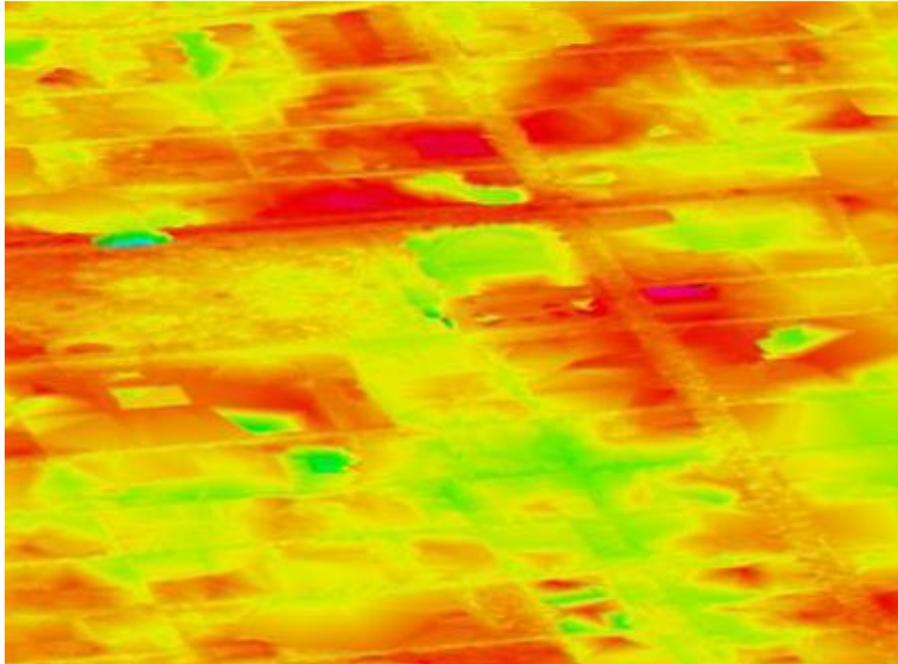


Figura 108. Modelo Digital de Terreno LIDAR del Distrito Federal. Fuente: INEGI (2019).

Fotogrametría

Como lo mencionan Saxena *et al.* (2009), para poder determinar modelos 3D se usa la fotogrametría, de lo cual nace del análisis de la unión imágenes desde diferentes ángulos (visión estereoscópica) y de geometrías proyectivas.

Por eso, Arriola *et al.* (2016) nos indican que un levantamiento fotogramétrico se fundamenta en obtener mapas tridimensionales con alta precisión, tomando varias imágenes considerando un traslape entre ellas, asentando tiempo y ubicación en donde se captura cada una, lo anterior para poder general un modelo digital de elevación.

A su vez, Eisenbeiss (2009) incluye el término “fotogrametría VANT”, la cual es considerada como a una nueva herramienta de medición fotogramétrica que opera de manera semiautónoma o autónoma controladas a distancia. Tener la

posibilidad de mezclar métodos fotogramétricos con un VANT puede ser muy útil para obtener datos precisos, automatizados y controlados por un ordenador.

Es así, como en la fotogrametría VANT se identifican dos métodos cartográficos tradicionales: Modelos de Elevación Digital y los ortomosaicos georreferenciados (Nex y Remondino, 2013; Colomina y Molina, 2014).

Aunado lo anterior, Gross y Heumann (2016), mencionan que los métodos tradicionales aéreos son difíciles o consumen mucho tiempo debido a la escasez de información auxiliar suficientemente precisa; pero que algunos programas de computación pueden optimizar y aumentar la precisión geométrica.

Precisión de fotogrametría

Villareal (2015) menciona que en un modelo fotogramétrico se debe garantizar la precisión tomando en cuenta puntos de control y coordenadas (X, Y, Z), las cuales pueden tomarse de preferencia con un GPS. Mediante un proceso de aerotriangulación continúa el mismo autor, es posible obtener la orientación de cada imagen en el sistema de coordenadas proyectado y así obtener un Modelo Digital de Elevación (MDE). Según Yuste *et al.* (2013) en cuanto a precisión, como ejemplo un vuelo a 100 m de altura, el error medio de coordenadas X, Y, Z, sería inferior a los 5 cm.

Nube de puntos

Zeybek y Şanlıoğlu (2018) mencionan que los VANT han funcionado como un excelente equipo de medición y mapeo, que además son capaces de recopilar datos de una nube de puntos en alta resolución; la cual a través de un filtrado de datos se puede construir un modelo digital de elevaciones.

Sin embargo Raina *et al.* (2019), alude que la nube de puntos sigue siendo una representación importante para los datos en 3D, no solo para tecnologías establecidas como el LiDAR y fotogrametría, sino también en nuevas tecnologías emergentes como dispositivos de realidad mixta.

Por su parte, Comba *et al.* (2018) menciona que el algoritmo general para el procesamiento de nubes de puntos se puede dividir en tres pasos principales: 1) evaluación precisa de la superficie y altura del terreno local de cada punto de la nube, 2) procedimiento de exploración y puntuación de la nube de puntos en base a un área a medir y, finalmente, 3) detección de áreas de interés y evaluación de las características locales.

Tipos de resolución

Resolución Espacial

Según Chuvieco (1995), este tipo de resolución escoge al elemento más pequeño, el cual puede diferenciarse en una imagen que es conocida como pixel; y está definido por el tamaño de pixel. Es por ello que, a medida que se perfecciona la resolución espacial, el tamaño del archivo digital incrementa requiriendo una capacidad de almacenamiento mayor en el ordenador.

Resolución Temporal

Chuvieco (1995) menciona que este tipo de resolución indica la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor, dicho de otra manera, la periodicidad con la que se toman las imágenes de la misma área de una extensión geográfica; por lo tanto, esta cobertura depende de los parámetros de altura del sensor, velocidad de captura y el ángulo de visión

Por otro lado, Escalante *et al.* (2016) escribe que comparando las plataformas como satélites, la obtención de alta resolución espacial y temporal, los VANT tienen

por ventaja el bajo costo de adquisición y de operación, el uso en lugares peligrosos y la optimización de tiempo para obtener la información.

Reconstrucción de fotografías en 3D.

Para poder generar un MDE y hacer la reconstrucción fotogramétrica de un área; Arriola *et al.* (2016) menciona que es necesario utilizar un programa de computación en el cual se pueda agrupar la información de cada fotografía georreferenciada y a través de ello se pueda obtener un modelo en 3D. Para ello, existen distintos programas de computacionales comerciales en los cuales se puede realizar el anterior procesamiento; dos de ellos es el Agisoft Metashape y el PIX4D; en los cuales se puede realizar el procesamiento fotogramétrico de imágenes digitales y generar datos espaciales en 3D que pueden ser empleados en aplicaciones de SIG, además de la producción de efectos visuales, así como mediciones indirectas de objetos a escalas diferentes.

En la figura 103, se presenta el procedimiento de procesamiento de imágenes y construcción de modelos 3D comprende cuatro etapas principales: i) la alineación de la cámara en donde se buscan puntos comunes en las imágenes y las combina, dando como resultado una nube de puntos y un conjunto de posiciones de cámara, ii) la construcción de nubes de puntos densos iii) la construcción de malla poligonal 3D que representa la superficie del objeto basada en la nube de puntos densos puede ser mediante dos métodos algorítmicos la de campo de altura (para superficies de tipo plana) y arbitrario (para cualquier tipo de objeto) y iv) algún modo de texturización para la generación de orto mosaicos.

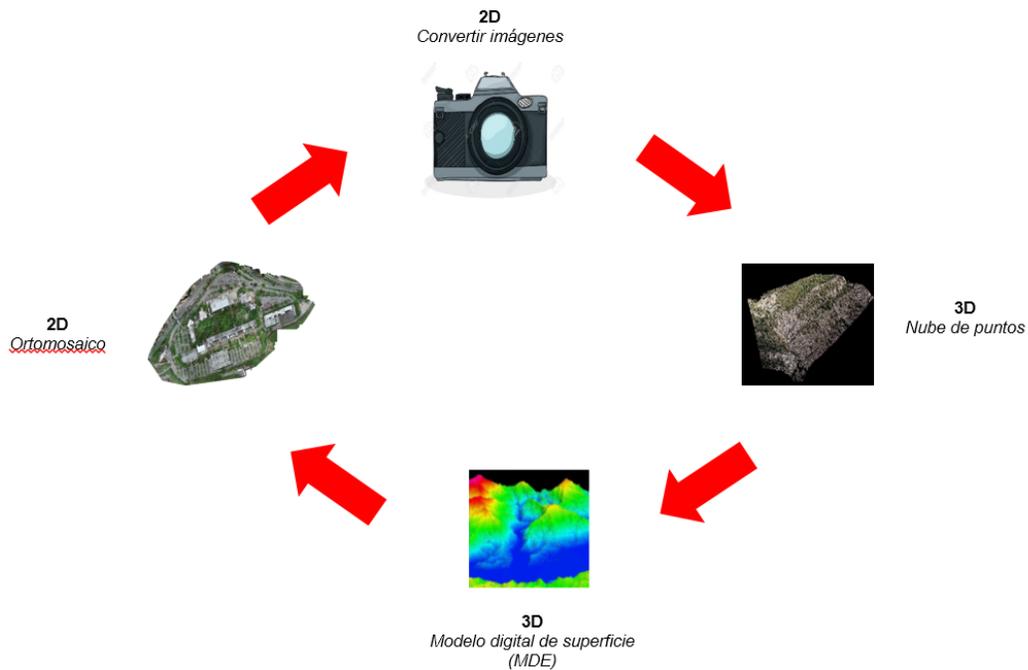


Figura 109. Procesamiento de imágenes y construcción de modelos 3D. Fuente: Elaboración Propia

Puntos de Control Terrestres

Cruz (2008), menciona que un punto de control es un sitio físico en tierra, del cual se conoce su ubicación por medio de un sistema de coordenadas y que puede ocuparse como guía. El propósito de dichos puntos es brindar información para el proceso de georreferencia de objetos espaciales y fenómenos de interés de acuerdo a las necesidades de cada proyecto; por su parte, Liew *et al.* (2012) indica que los puntos de control terrestres se utilizan para la rectificación de imágenes aéreas en un enfoque no paramétrico.

Pérez (2001) asegura que para tener un mayor control en la corrección plani-altimétrica de las imágenes, es necesario fijar cinco puntos, distribuidos en las esquinas y uno en el centro, con la finalidad de obtener una mayor precisión al momento de efectuar el proceso de restitución; de la misma manera, Martínez *et al.*

(2018) alude que el número de puntos de control terrestres y su distribución en el área de estudio son realmente significativas para tener una mejor precisión en la fotogrametría VANT.

NORMATIVA DE LA SCT PARA EL VUELO DE LOS VANT

A continuación se expresa un resumen de los lineamientos generales y disposiciones para el vuelo de los VANT, regidos por la SCT mediante la NOM-107-SCT3-2019 en el espacio aéreo mexicano:

1. Objetivo y Campo de Aplicación.

La presente Norma Oficial Mexicana establece los requerimientos del Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia (RPAS) para operar dentro del espacio aéreo mexicano; de la misma manera para su comercialización en el territorio nacional.

El campo de aplicación va dirigido a toda persona física/moral, operadores de estado que pretendan operar u operen un RPAS; asimismo aplica a los fabricantes y armadores de RPAS, personas físicas/morales que requieran importar RPAS a territorio nacional y a los comercializadores de RPAS.

Nota 1: La presente Norma Oficial Mexicana no aplica a los RPAS de Estado que efectúen operaciones militares que son destinadas o en posesión del Ejército, Armada y Fuerza Aérea Nacionales; mismas que deben sujetarse a las disposiciones de tránsito aéreo señaladas en el artículo 37 de la Ley de Aviación Civil; asimismo no es aplicable a aeronaves no tripuladas clasificadas como autónomas, ni a los globos libres no tripulados.

Nota 2: La presente Norma Oficial Mexicana no aplica a los RPAS operados en espacios cerrados; es responsabilidad del propietario de la instalación y del organizador del evento el establecer las medidas de seguridad correspondientes.

4. Disposiciones Generales.

4.1. Todo operador de RPAS, de conformidad a su peso máximo de despegue y uso, debe dar cumplimiento a lo establecido en la presente Norma Oficial Mexicana.

4.2. Todo operador de RPAS de estado, excepto las militares, debe dar cumplimiento a los requerimientos y limitaciones de los RPAS Privado No comercial, de acuerdo a su peso máximo de despegue, establecidos en la presente Norma Oficial Mexicana.

4.3. Todo operador de RPAS para investigación científica, debe dar cumplimiento a los requerimientos y limitaciones de los RPAS Privado No comercial, de acuerdo a su peso máximo de despegue, establecidos en la presente Norma Oficial Mexicana.

4.4. Todo Fabricante de RPAS debe dar cumplimiento a lo establecido en el numeral 9 de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.5. Toda persona física/moral que requiera importar RPAS a territorio nacional debe dar cumplimiento a lo establecido en el numeral 10 de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.6. Todo Comercializador de RPAS debe dar cumplimiento a lo establecido en el numeral 11 de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.7. Con el fin de garantizar la seguridad operacional de las aeronaves, cualquier persona física o moral, o por cualquier entidad federal o local, podrá reportar de manera inmediata los avistamientos de RPAS alrededor de los aeropuertos y helipuertos de conformidad al Apéndice “L” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana, con el mayor detalle posible.

4.8. Las operaciones del RPAS que causen heridas o la muerte de personas o daños a las propiedades de terceros, serán reportadas con el mayor detalle

posible a la comandancia del aeropuerto más próximo, por cualquier persona física o moral o por cualquier entidad federal o local, en plazo no mayor a 5 días, usando el “Reporte de Daños por RPAS”, descrito en el Apéndice “M” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.9. Clasificación del RPAS.

4.9.1. Todo operador de RPAS que pretenda operar en espacio aéreo mexicano, debe dar cumplimiento a la presente Norma Oficial Mexicana, con base al peso máximo de despegue y uso del RPA, de conformidad con la siguiente tabla:

Clasificación de Sistemas de Aeronaves Pilotadas a Distancia.				
Peso máximo de despegue		Uso		Cumplimiento al Numeral de la presente Norma Oficial Mexicana
Igual o menor a 2 kg	RPAS Micro	Recreativo		4.10, 4.11 y 5.1.
		Privado Comercial	No o Comercial	4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8*
Mayor a 2 kg y hasta 25 kg	RPAS Pequeño	Recreativo		4.10, 4.11 y 6.1.
		Privado Comercial	No o Comercial	4.10, 4.11, 6.2 y 8*
Mayor a 25 kg	RPAS Grande	Recreativo		4.10, 4.11 y 7.1.
		Privado Comercial	No o Comercial	4.10, 4.11, 7.2 y 8*

*El numeral 8 sólo es aplicable cuando se requiera realizar operaciones especiales.

4.10. Requerimientos generales de operación.

4.10.1. El piloto debe operar el RPAS a una distancia de separación de al menos 9.2 Km (5 MN) de cualquier aeródromo.

Nota: Los aeródromos son todos los descritos en Apéndice “I” Informativo de la presente Norma Oficial Mexicana y todos los que se encuentran listados en el archivo “Base de datos de Aeródromos y Helipuertos” vigente, publicado en el sitio de internet de la SCT/DGAC, que tengan en la columna “situación” de la hoja de Excel, el estatus de vigente.

4.10.2. El piloto debe operar el RPAS a una distancia de separación de al menos 0.900 Km (0.5 MN) de cualquier helipuerto.

Nota: Los helipuertos son todos los que se encuentran listados en el archivo “Base de datos de Aeródromos y Helipuertos” vigente, publicado en el sitio de internet de la SCT/DGAC. Que tengan en la columna “situación” de la hoja de Excel, el estatus de vigente.

4.10.3. El piloto del RPAS no debe dejar caer y/o arrojar (aunque tenga paracaídas) objetos o materiales que puedan causar daño a cualquier persona o propiedad.

4.10.4. El piloto del RPAS no debe operar la aeronave si el vuelo no puede hacerse de manera segura. Esta condición debe determinarse en una inspección de pre vuelo. La inspección de pre vuelo debe contener por lo menos lo indicado en el Apéndice “E” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.10.5. El piloto del RPAS no debe operar la aeronave pilotada a distancia en las áreas prohibidas, restringidas o peligrosas, establecidas en la PIA/AIP, Sección ENR 5.1.

4.10.6. El piloto del RPAS antes de realizar una operación, debe verificar los NOTAMS que activan áreas prohibidas o restringidas mencionadas en el numeral

4.10.5 de la presente Norma Oficial Mexicana o áreas temporales que prohíben la realización de operaciones bajo reglas de vuelo visual (VFR) con aeronaves.

Nota: Los NOTAMS se verifican en la oficina del servicio de información de vuelo del aeropuerto controlado más próximo.

4.10.7. El operador y/o piloto de RPAS no debe utilizar la aeronave pilotada a distancia para transportar mercancías peligrosas y/o sustancias prohibidas, ni para emplear o transportar armas o explosivos.

4.10.8. El piloto del RPAS debe mantener el control de la trayectoria de vuelo de la aeronave pilotada a distancia en todo momento.

4.10.9. El piloto del RPAS no debe operar el RPAS de una manera negligente o temeraria que ponga en peligro la vida o la propiedad de terceros.

4.10.10. El operador y/o piloto del RPAS debe operar entre la salida y la puesta del sol, salvo que el operador del RPAS obtenga una autorización de parte de la Autoridad Aeronáutica para vuelos nocturnos de conformidad al numeral 8 de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.10.11. El piloto del RPAS debe dar en todo momento y sin excepción alguna, el derecho de paso a cualquier aeronave tripulada, a menos que la aeronave pilotada a distancia y la aeronave tripulada estén bajo control positivo por los Servicios de Tránsito Aéreo.

4.10.12. Salvo que se cuente con una Autorización para operaciones especiales, en la modalidad de operaciones restringidas; el piloto del RPAS no debe operar desde vehículos en movimiento, a menos que el vehículo se esté moviendo sobre el agua y esto sea indispensable para su adecuada operación.

4.10.13. Las operaciones del RPAS que causen accidentes o incidentes o daños a terceros, deben ser reportadas con el mayor detalle posible a la comandancia del aeropuerto más próximo, por el operador del RPAS o por el piloto

de RPAS, en un plazo no mayor a 5 días, usando el “Reporte de Daños por RPAS”, descrito en el Apéndice “M” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana.

4.10.14. El piloto del RPAS no debe operar más de una RPA al mismo tiempo.

4.10.15. Los RPAS para investigación científica, deben obtener autorización de la Autoridad Aeronáutica, conforme a lo indicado en la presente Norma Oficial Mexicana, autorización de INEGI en cumplimiento con los artículos 60 y 61 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica y permiso de la Secretaría de la Defensa Nacional en cumplimiento con el artículo 29 fracción XVIII de la Ley Orgánica de la Administración Pública Federal.

4.10.16. No podrán operar en México un RPAS con matrícula o registro extranjero u operados por operadores de RPAS extranjeros, diferentes a los mencionados en el numeral 4.10.15 de la presente Norma Oficial Mexicana, a menos de que exista un acuerdo bilateral entre la Autoridad Aeronáutica y la Autoridad de Aviación Civil del estado de registro/matricula.

4.10.17. El operador del RPAS debe cumplir con el mantenimiento y con la información e instrucciones de aeronavegabilidad continua del fabricante del RPAS.

4.10.18. La Autoridad Aeronáutica podrá convalidar las autorizaciones expedidas por otras Autoridades de Aviación Civil del país en que se hayan otorgado, siempre y cuando ese país cuente con un convenio bilateral de colaboración, donde se especifique de mutuo acuerdo los procedimientos para aceptar la operación de RPAS por esta Autoridad Aeronáutica

4.11. Responsabilidades.

4.11.1. El operador y/o piloto del RPAS es el responsable de su operación, uso y en caso de incidente o accidente, de los daños y/o lesiones causados por la misma.

4.11.2. El operador del RPAS es el responsable del uso que se dé a la información obtenida durante la operación de la aeronave.

4.11.3. El operador y/o piloto del RPAS es el responsable de respetar todas las Leyes, Reglamentos y Normas de índole Federal o Local, relacionadas con Seguridad Nacional, Seguridad Pública, protección de la privacidad, propiedad intelectual, entre otras.

4.11.4. El piloto del RPAS no debe operar la RPA en estado de ebriedad o bajo los efectos de estupefacientes, psicotrópicos o enervantes.

5. Requerimientos y Limitaciones del RPAS Micro.

5.1. RPAS Micro para uso Recreativo.

5.1.1. El operador de RPAS que opere o pretenda operar en esta clasificación, además de lo establecido en los numerales 4.10. y 4.11 de la presente Norma Oficial Mexicana, debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

a) Obtener el folio de registro de RPAS a través de la inscripción de los documentos por los cuales se adquiera, transmita, modifique, grave o extinga la propiedad, la posesión y los demás derechos reales sobre las aeronaves civiles pilotadas a distancia con un peso máximo de despegue mayor a 0.250 kg en el sitio de internet de la SCT/DGAC; con fundamento en el artículo 47 fracción VI de la Ley de Aviación Civil y 14 del Reglamento del Registro Aeronáutico Mexicano. La obtención del folio de registro de RPAS debe efectuarse de conformidad al numeral 15.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Operar la RPA a una altura máxima de 122 metros (400 ft), excepto en lo indicado en el inciso d) del presente numeral;

c) No operar la RPA más allá de una distancia horizontal de 457 metros (1500 ft.) respecto al piloto;

d) Operar la RPA a una altura máxima de 100 metros (328 ft), en el área comprendida entre los círculos de 9.2 Km (5 MN) y 18.5 Km (10 MN), alrededor de los aeródromos listados en el numeral I.1 del Apéndice “I” Informativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

e) No exceder la velocidad máxima de operación, establecida por el fabricante del RPAS;

f) No se debe operar sobre personas a menos que participen directamente en la operación de la RPA o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome de la RPA, debiendo mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con las personas no relacionadas con la operación, de al menos 10 metros (32 ft). Salvo lo indicado en el numeral 8.3.1. de la presente Norma Oficial Mexicana.

NOTA 1: Si el peso máximo de despegue de la RPA es igual o menor a 250 gramos, ésta se puede operar sobre personas.

g) No operar la RPA en los corredores en los que operan los helicópteros publicados en las Cartas Visuales del PIA de México;

h) Contar en la estación de control con copia simple del folio de registro del RPAS, emitido por la Autoridad Aeronáutica.

5.1.2. El operador del RPAS debe operar la RPA a línea de vista, sin ayuda de ningún otro dispositivo que los lentes correctivos, por lo que el operador de RPAS debe ser capaz de ver la RPA durante todo el vuelo con el fin de saber su localización, actitud, altitud, dirección, la existencia de otros tráficos aéreos o de otros peligros y determinar que la RPA no ponga en peligro la integridad física o la vida de las personas o daños a la propiedad.

5.1.3. Todo RPAS para esta clasificación, con un peso máximo de despegue mayor a 250 gr, debe contar con lo siguiente:

a) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de una distancia horizontal del piloto;

b) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de la altura máxima permitida;

c) Un número de serie; y

d) Manual de usuario o instrucciones de uso.

5.2. RPAS Micro para uso Privado No comercial o Comercial.

5.2.1. El operador de RPAS que opere o pretenda operar en esta clasificación, debe cumplir con todos los Requerimientos y limitaciones del RPAS Micro para uso Recreativo de conformidad al numeral 5.1 de la presente Norma Oficial Mexicana (exceptuando lo indicado en el inciso f), numeral 5.1.1); adicionalmente debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

Contar con una póliza de Seguro de Responsabilidad Civil vigente por daños a terceros conforme al artículo 72 de la Ley de Aviación Civil.

b) Mantener en la estación de control durante la operación del RPAS con los siguientes documentos en copia simple:

1. Folio de registro del RPAS;

2. Póliza de Seguro de responsabilidad civil vigente;

3. En caso de aplicar, autorización del INEGI, para mostrarla a la autoridad que se la requiera, de conformidad al inciso c) del presente numeral.

c) En caso de captar fotografías aéreas con cámaras métricas o de reconocimiento y de otras imágenes por percepción remota dentro del espacio aéreo nacional; debe contar con la autorización de la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en cumplimiento con los artículos 60 y 61 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica;

d) No se debe operar sobre personas a menos que participen directamente en la operación de la RPA o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome de la RPA, debiendo mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con las personas no relacionadas con la operación, de al menos 10 metros (32 ft). Si el peso máximo de despegue de la RPA es igual o menor a 250 gramos, ésta se puede operar sobre personas. Salvo lo indicado en el numeral 8.3 de la presente Norma Oficial Mexicana.

5.2.2. El operador de RPAS de esta clasificación, para operarlo dentro del espacio aéreo controlado, requiere una autorización especial emitida por la Autoridad Aeronáutica, de conformidad con el numeral 8.4 de la presente Norma Oficial Mexicana.

6. Requerimientos y Limitaciones del RPAS Pequeño.

6.1. RPAS Pequeño para uso Recreativo.

6.1.1. El operador de RPAS que opere o pretenda operar en esta clasificación, además de lo establecido en los numerales 4.10. y 4.11 de la presente Norma Oficial Mexicana, debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

a) Obtener el folio de registro de RPAS a través de la inscripción de los documentos por los cuales se adquiera, transmita, modifique, grave o extinga la propiedad, la posesión y los demás derechos reales sobre las aeronaves civiles pilotadas a distancia, en el sitio de internet de la SCT/DGAC; con fundamento en el artículo 47 fracción VI de la Ley de Aviación Civil y 14 del Reglamento del Registro Aeronáutico Mexicano. La obtención del folio de registro de RPAS debe efectuarse de conformidad al numeral 15.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Operar dentro de Clubes de Aeromodelismo autorizados por la Autoridad Aeronáutica, debiendo cumplir con los requerimientos y limitaciones de operación

bajo los cuales se rige dicho club y en espacios aéreos definidos para utilización del mismo club;

c) No exceder la velocidad máxima de operación establecida por el fabricante del RPAS;

d) Operar la RPA a una altura máxima de 122 metros (400 ft); excepto en lo indicado en el inciso f) del presente numeral;

e) No operar la RPA más allá de una distancia horizontal de 457 metros (1500 ft.) respecto al piloto;

f) Operar la RPA a una altitud máxima de 100 metros (328 ft), en el área comprendida entre los círculos de 9.2 Km (5 MN) y 18.5 Km (10 MN), alrededor de los aeródromos listados en el en el numeral I.1 del Apéndice “I” Informativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

g) Operar la RPA en condiciones meteorológicas libre de nubes y con la superficie a la vista;

h) Mantener una visibilidad mínima de 1.5 Km. (0.8 MN) desde la localización de la estación de control, antes de iniciar la operación de la RPA;

i) No operar sobre personas, a menos que participen directamente en la operación de la RPA o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome de la RPA;

Mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con respecto a las personas no relacionadas con la operación de:

1. Al menos 30 metros (98 ft), para los RPAS con un peso máximo de despegue superior a 2.001 Kg y hasta 10.000 Kg;

2. Al menos 50 metros (164 ft), para los RPAS con un peso máximo de despegue superior a 10.001 Kg y hasta 25.000 Kg.

6.1.2. El operador del RPAS debe operar la RPA a línea de vista, sin ayuda de ningún otro dispositivo que los lentes correctivos, por lo que el operador de RPAS debe ser capaz de ver la RPA durante todo el vuelo con el fin de saber su localización, actitud, altitud, dirección, la existencia de otros tráficos aéreos o de otros peligros y determinar que la RPA no ponga en peligro la integridad física o la vida de las personas o daños a la propiedad.

6.1.3. Todo RPAS para esta clasificación, debe contar con lo siguiente:

a) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de una distancia horizontal del piloto;

b) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de la altura máxima permitida;

c) Un número de serie; y

d) Manual de usuario o instrucciones de uso;

6.2. RPAS Pequeño para uso Privado No comercial o Comercial.

6.2.1. El operador de RPAS que opere o pretenda operar en esta clasificación, además de lo establecido en los numerales 4.10. y 4.11 de la presente Norma Oficial Mexicana, debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

a) Contar con una autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica, de conformidad con el numeral 6.2.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) No exceder la velocidad máxima de operación establecida por el fabricante del RPAS;

c) Operar la RPA a una altura máxima de 122 metros (400 ft), excepto en lo indicado en el inciso e) del presente numeral;

d) No operar la RPA más allá de una distancia horizontal de 457 metros (1500 ft.) respecto al piloto;

e) Operar la RPA a una altura máxima de 100 metros (328 ft), en el área comprendida entre los círculos de 9.2 Km (5 MN) y 18.5 Km (10 MN), alrededor de los aeródromos listados en el numeral I.1 del Apéndice “I” Informativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

f) Operar la RPA en condiciones meteorológicas libre de nubes y con la superficie a la vista.

g) Mantener una visibilidad mínima de 1.5 Km. (0.8 MN), desde la localización de la estación de control, antes de iniciar la operación de la RPA;

h) No operar sobre personas, a menos que participen directamente en la operación de la RPA o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome de la RPA. Salvo lo indicado en el numeral 8.3 de la presente Norma Oficial Mexicana.

i) Mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con respecto a las personas no relacionadas con la operación de:

1. Al menos 30 metros (98 ft), para los RPAS con un peso máximo de despegue mayor a 2 Kg y hasta 10 Kg;

2. Al menos 50 metros (164 ft), para los RPAS con un peso máximo de despegue mayor a 10 Kg y hasta 25 Kg.

j) No operar la RPA en los corredores en los que operan los helicópteros publicados en las Cartas Visuales del PIA de México;

k) Contar en la estación de control con:

1. **Copia del Manual de Operación del RPAS, aprobado por la Autoridad Aeronáutica.**

2. Copia de la autorización de operación vigente;

3. Copia de folio de registro del RPAS, emitido por la Autoridad Aeronáutica;

Libro de bitácora;

5. Oficio de Aprobación de la Póliza de Seguro de Responsabilidad Civil por daños a terceros vigente;

6. Autorización de piloto del RPAS vigente;

7. En caso de aplicar, autorización del INEGI, para mostrarla a la autoridad que se la requiera, de conformidad al inciso l) del presente numeral.

l) En caso de captar fotografías aéreas con cámaras métricas o de reconocimiento y de otras imágenes por percepción remota dentro del espacio aéreo nacional; contar con la autorización de la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en cumplimiento con los artículos 60 y 61 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica.

6.2.2. El operador del RPAS debe operar la RPA a línea de vista, sin ayuda de ningún otro dispositivo que los lentes correctivos, por lo que debe ser capaz de ver la RPA durante todo el vuelo con el fin de saber su localización, actitud, altitud, dirección, la existencia de otros tráficos aéreos o de otros peligros y determinar que la RPA no ponga en peligro la integridad física o la vida de las personas o daños a la propiedad.

6.2.3. Para obtener la autorización de operación del RPAS Pequeño para uso Privado No comercial o Comercial.

6.2.3.1. Todo operador de RPAS para esta clasificación, debe operar de acuerdo a las limitaciones de operación incluidas en la autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica. La obtención de la autorización de operación

del RPAS, debe efectuarse de conformidad al numeral 15.4 de la presente Norma Oficial Mexicana;

6.2.3.2. Todo operador de RPAS para obtener la autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica para esta clasificación debe contar con:

a) Folio de registro de RPAS a través de la inscripción de los documentos por los cuales se adquiera, transmita, modifique, grave o extinga la propiedad, la posesión y los demás derechos reales sobre las aeronaves civiles pilotadas a distancia, en el sitio de internet de la SCT/DGAC; con fundamento en el artículo 47 fracción VI de la Ley de Aviación Civil y 14 del Reglamento del Registro Aeronáutico Mexicano. La obtención del folio de registro de RPAS debe efectuarse de conformidad al numeral 15.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Información General del RPAS de conformidad con el Apéndice “A” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

c) Etiqueta de Identificación de conformidad al numeral 6.2.3.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

d) Autorización de piloto del RPAS de conformidad al Apéndice “C” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

e) Manual de Operación del RPAS, en idioma español; aprobado por la Autoridad Aeronáutica de conformidad al Apéndice “F” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

f) Oficio de Aprobación de la Póliza de Seguro de Responsabilidad Civil vigente por daños a terceros, conforme al artículo 72 de la Ley de Aviación Civil, emitido por la Autoridad Aeronáutica.

g) Estudio Aeronáutico de Seguridad y Administración de Riesgos de conformidad con el Apéndice “G” de la presente Norma Oficial Mexicana;

6.2.3.3. Todo RPAS para esta clasificación, debe estar identificado con una etiqueta de material resistente a la intemperie, conteniendo el fabricante, modelo, número de serie y folio de registro del RPAS, los cuales a su vez se indicarán en la autorización de operación.

6.2.3.4. Todo RPAS para esta clasificación, debe contar con lo siguiente:

a) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de una distancia horizontal del piloto;

b) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de la altura máxima permitida;

c) Un número de serie.

d) Manual de usuario o instrucciones de uso.

6.2.4. El operador de RPAS de esta clasificación, para operarlo dentro del espacio aéreo controlado, requiere una autorización especial emitida por la Autoridad Aeronáutica, de conformidad con el numeral 8.4 de la presente Norma Oficial Mexicana.

7. Requerimientos y Limitaciones del RPAS Grande.

7.1. RPAS Grande para uso Recreativo.

7.1.1. El operador de RPAS que pretenda operar en esta clasificación, además de lo establecido en los numerales 4.10. y 4.11 de la presente Norma Oficial Mexicana, debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

a) Obtener el Certificado de Matrícula a través de la inscripción de los documentos por los cuales se adquiriera, transmita, modifique, grave o extinga la propiedad, la posesión y los demás derechos reales sobre las aeronaves civiles pilotadas a distancia; con fundamento en el artículo 47 fracción VI de la Ley de Aviación Civil y 14 del Reglamento del Registro Aeronáutico Mexicano. La obtención

del Certificado de Matrícula de RPAS debe efectuarse de conformidad al numeral 15.4 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Operar dentro de Clubes de Aeromodelismo autorizados por la Autoridad Aeronáutica de conformidad al artículo 60 del Reglamento de la Ley de Aviación Civil, debiendo cumplir con los requerimientos y limitaciones de operación bajo los cuales se rige dicho club y en espacios aéreos definidos para utilización del mismo club;

c) No exceder la velocidad máxima de operación establecida por el fabricante del RPAS;

d) Operar la RPA a una altura máxima de 122 metros (400 ft); excepto en lo indicado en el inciso f) del presente numeral;

e) No operar la RPA más allá de una distancia horizontal de 457 metros (1500 ft.) respecto al piloto;

f) Operar la RPA a una altitud máxima de 100 metros (328 ft) sobre el nivel del suelo, en el área comprendida entre los círculos de 9.2 Km (5 MN) y 18.5 Km (10 MN), alrededor de los aeródromos listados en el numeral I.1 del Apéndice “I” Informativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

g) Operar la RPA en condiciones meteorológicas libre de nubes y con la superficie a la vista.

h) Mantener una visibilidad mínima de 1.5 Km. (0.8 MN), desde la localización de la estación de control, antes de iniciar la operación de la RPA;

i) No operar sobre personas, a menos que participen directamente en la operación de la RPA o estén situadas debajo de una estructura que les provea de una protección razonable en caso de desplome de la RPA;

j) Mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con respecto a las personas no relacionadas con la operación de al menos 50 metros (164 ft).

7.1.2. El operador del RPAS debe operar la RPA a línea de vista, sin ayuda de ningún otro dispositivo que los lentes correctivos, por lo que el operador de RPAS debe ser capaz de ver la RPA durante todo el vuelo con el fin de saber su localización, actitud, altitud, dirección, la existencia de otros tráficos aéreos o de otros peligros y determinar que la RPA no ponga en peligro la integridad física o la vida de las personas o daños a la propiedad.

7.1.3. Todo RPAS para esta clasificación, debe contar con lo siguiente:

a) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de una distancia horizontal del piloto;

b) Un software que automáticamente no le permita a la RPA volar más allá de la altura máxima permitida;

c) Un número de serie; y

d) Manual de usuario o instrucciones de uso.

7.2. RPAS Grande para uso Privado No comercial o Comercial.

7.2.1. El operador de RPAS que pretenda operar en esta clasificación, además de lo establecido en los numerales 4.10. y 4.11. (salvo los numerales 4.10.1 y 4.10.2), de la presente Norma Oficial Mexicana, debe cumplir con los siguientes requerimientos y limitaciones:

a) Contar con una autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica, de conformidad con el numeral 7.2.4 de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) No operar a una velocidad que exceda la máxima establecida por el fabricante del RPAS;

c) Operar la RPA a un nivel de vuelo sobre el terreno, acorde al equipo instalado;

Mantener una distancia de separación del RPAS con respecto a las nubes, superior a:

1. 300 metros (984 ft) de distancia vertical por debajo de la nube, y

2. 1500 metros (0.8 MN) de distancia horizontal.

e) Mantener una visibilidad mínima de 5 Km. (2.7 MN), desde la localización de la estación de control, antes de iniciar la operación de la RPA;

f) No operar sobre personas, a menos que estén situadas debajo de una estructura que les provea una protección razonable por la caída de la RPA, Salvo lo indicado en el numeral 8.3 de la presente Norma Oficial Mexicana.

g) Operar en el espacio aéreo clase G, salvo que exista la autorización especial emitida por la Autoridad Aeronáutica para navegar en espacio aéreo controlado, de conformidad al numeral 8.4. de la presente Norma Oficial Mexicana, y previa coordinación con los Servicios de Tránsito Aéreo;

h) No operar en los corredores en los que operan los helicópteros publicados en las Cartas Visuales del PIA de México;

i) En caso de captar fotografías aéreas con cámaras métricas o de reconocimiento y de otras imágenes por percepción remota dentro del espacio aéreo nacional; contar con la autorización de la Dirección General de Geografía y Medio Ambiente del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), en cumplimiento con los artículos 60 y 61 de la Ley del Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica;

j) Mantener una distancia horizontal de seguridad perimetral con respecto a las personas no relacionadas con la operación de al menos 50 metros (164 ft);

k) Cumplir con todas las Directivas de Aeronavegabilidad aplicables, emitidas por la Autoridad de Aviación Civil del estado de diseño/fabricación del RPAS y/o por la Autoridad Aeronáutica;

I) Contar en la estación de control con:

1. Copia del Manual de Operación del RPAS, aprobado por la Autoridad Aeronáutica;

2. Copia de la autorización de operación vigente;

3. Libro de bitácora;

4. Certificado de Matrícula;

5. Certificado de Aeronavegabilidad vigente;

6. Oficio de Aprobación de la Póliza de Seguro de Responsabilidad Civil por daños a terceros vigente;

7. Licencia de Piloto del RPAS vigente;

8. En caso de aplicar, autorización del INEGI, para mostrarla a la autoridad que se la requiera, de conformidad al inciso i) del presente numeral.

7.2.2. El operador de RPAS de esta clasificación, para operarlo dentro del espacio aéreo controlado, requiere una autorización especial emitida por la Autoridad Aeronáutica, de conformidad con el numeral 8.4 de la presente Norma Oficial Mexicana.

7.2.3. Para obtener la Aprobación de Tipo del RPAS Grande.

7.2.3.1. Todo fabricante de RPAS para obtener la aprobación de Tipo emitida por la Autoridad Aeronáutica para esta clasificación debe contar con:

a) Plan de Aprobación de conformidad con el Apéndice “D” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Información General del RPAS de conformidad con el Apéndice “A” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

c) Cumplimiento de los Estándares de Aeronavegabilidad aceptados por la Autoridad Aeronáutica para el Diseño de Tipo, de conformidad a los Ordenamientos Jurídicos aplicables en la materia;

Manuales aplicables (Manual de Vuelo, de Mantenimiento). Dichos manuales deben cumplir con el estándar de aeronavegabilidad seleccionado en el inciso c) del presente numeral;

e) El RPAS debe satisfacer los requisitos de equipamiento e instrumentos para comunicaciones, navegación y vigilancia que se requieren para las aeronaves tripuladas para operar en espacio aéreo controlado, de conformidad a lo indicado en los Ordenamientos Jurídicos aplicables en la materia.

7.2.4. Para obtener la autorización de operación del RPAS Grande para uso Privado No comercial o Comercial.

7.2.4.1. Todo operador de RPAS para esta clasificación, debe operar de acuerdo a las limitaciones de operación incluidas en la autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica. La obtención de la autorización de operación del RPAS, debe efectuarse de conformidad al numeral 15.4 de la presente Norma Oficial Mexicana.

7.2.4.2. Todo operador de RPAS para obtener la autorización de operación emitida por la Autoridad Aeronáutica para esta clasificación debe contar con:

a) Información General del RPAS de conformidad con el Apéndice “A” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

b) Certificado de Matrícula a través de la inscripción de los documentos por los cuales se adquiera, transmita, modifique, grave o extinga la propiedad, la posesión y los demás derechos reales sobre las aeronaves civiles pilotadas a distancia; con fundamento en el artículo 47 fracción VI de la Ley de Aviación Civil y 14 del Reglamento del Registro Aeronáutico Mexicano. La obtención del Certificado

de Matrícula de RPAS debe efectuarse de conformidad al numeral 15.4 de la presente Norma Oficial Mexicana;

c) Identificación de conformidad al numeral 7.2.4.3 de la presente Norma Oficial Mexicana;

d) Manual de Operación del RPAS, en idioma español; aprobado por la Autoridad Aeronáutica de conformidad al Apéndice “F” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

e) Estudio Aeronáutico de Seguridad y Administración de Riesgos, de conformidad al Apéndice “G” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

f) Oficio de Aprobación de la Póliza de Seguro de Responsabilidad Civil vigente por daños a terceros, conforme al artículo 72 de la Ley de Aviación Civil, emitido por la Autoridad Aeronáutica.

g) Licencia de piloto RPAS de conformidad al Apéndice “C” Normativo de la presente Norma Oficial Mexicana;

h) Aprobación de Tipo, expedido por la Autoridad Aeronáutica de conformidad al numeral 7.2.3 de la presente Norma Oficial Mexicana; o Certificado Tipo o su Convalidación de conformidad al artículo 127 del Reglamento de la Ley de Aviación Civil.

i) Certificado de Aeronavegabilidad.

7.2.4.3. El operador de RPAS debe asegurar que la RPA tenga pintadas las marcas de nacionalidad y de matrícula y la bandera nacional en un lugar visible, las cuales a su vez se indicarán en la autorización de operación.

7.2.4.4. Todos los RPAS Grandes, deben contar con:

a) Un dispositivo que permita su identificación automática;

b) Un número de serie;

c) Manual de Mantenimiento y Manual de Vuelo;

d) Un dispositivo que limite su operación en zonas prohibidas.

7.2.4.5. Para obtener el Certificado de Aeronavegabilidad del RPAS Grande.

7.2.4.5.1. Todo operador de RPAS de esta clasificación, debe obtener su Certificado de Aeronavegabilidad emitido por la Autoridad Aeronáutica de conformidad al ordenamiento jurídico aplicable para la obtención del certificado.