



**COORDINACIÓN DE DESARROLLO
PROFESIONAL E INSTITUCIONAL**

SUBCOORDINACIÓN DE POSGRADO

T E S I S

**LEVANTAMIENTO Y SUPERVISIÓN DE INFRAESTRUCTURA CIVIL
MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTS)**

que para obtener el grado de
Maestro en
Ciencias y Tecnología del Agua

presenta
Sergio Iván Jiménez Jiménez

Tutor: Dr. Waldo Ojeda Bustamante

Jiutepec, Morelos

2017

Con fundamento en los artículos 21 y 27 de la Ley Federal del Derecho de Autor y como titular de los derechos moral y patrimoniales de la obra titulada “LEVANTAMIENTO Y SUPERVISIÓN DE INFRAESTRUCTURA CIVIL MEDIANTE VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs)”, otorgo de manera gratuita y permanente al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, autorización para que fijen la obra en cualquier medio, incluido el electrónico, y la divulguen entre su personal, estudiantes o terceras personas, sin que pueda percibir por tal divulgación una contraprestación.

SERGIO IVÁN JIMÉNEZ JIMÉNEZ

Jiutepec, Morelos a 06 de noviembre del 2017

DEDICATORIA

A mis padres Isaac Jiménez Sánchez y Roselia Jiménez Gutiérrez por su enseñanza y apoyo incondicional.

A mis hermanos María Virgen y Jorge Irán, por todo lo que hemos pasado juntos.

A Mariana de Jesús por todo su apoyo y por estar conmigo en todo momento.

A mis amigos Roció, María Fernanda, Anastasio, Juan, Eugenia, Abraham...

AGRADECIMIENTO

A DIOS por esa lluvia de bendiciones que riega sobre mí, "...sin faltantes"

Al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua por permitirme adquirir conocimientos mediante los cuales se puede servir a la sociedad.

A los miembros del comité revisor: Dr. Waldo Ojeda Bustamante, Dr. Jorge Flores Velázquez, Dr. Ronald Ernesto Ontiveros Capurata, Dr. Alberto González Sánchez y al Dr. Mauro Iñiguez Covarrubias, por su apoyo y por sus valiosos comentarios y sugerencias.

Al Lic. Braulio David Robles Rubio, a la Ing. Mariana de Jesús Marcial Pablo y al Ing. Anastasio Toledo Estrada, por su valiosa ayuda en la adquisición de la información.

A los académicos del IMTA por haberme transmitido sus conocimientos en mi formación profesional y personal, cumpliendo su deber.

ÍNDICE GENERAL

I. RESUMEN	2
II. INTRODUCCIÓN	4
III. MARCO TEÓRICO	6
3.1. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs).....	6
3.1.1. Tipos de VANTs.....	6
3.1.2. Ventajas y desventajas.....	7
3.1.3. Aplicaciones civiles.....	8
3.2. TELEDETECCIÓN Y FOTOGRAMETRÍA APOYADA CON VANTs.....	9
3.2.1. Teledetección.....	9
3.2.2. Fotogrametría.....	10
3.2.3. Aplicaciones de la fotogrametría.....	11
3.2.4. Cámaras digitales.....	13
3.2.5. Imágenes aéreas digitales.....	13
3.2.6. Puntos de apoyo o de control terrestre.....	15
3.2.7. Planeación y adquisición de imágenes con VANTs.....	16
3.2.8. Restitución fotogramétrica de imágenes.....	18
3.2.9. Modelos digitales de elevación (MDE).....	20
3.2.10. Ortomosaico.....	24
3.3. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES.....	24
3.3.1. Detección de discontinuidades.....	25
3.3.2. Detección de similitudes.....	26
3.4. CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES.....	27
3.4.1. Clasificadores por pixel.....	27
3.4.2. Clasificadores orientados a objetos.....	28
3.5. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS.....	30
3.5.1. Métodos convencionales.....	31
3.5.2. Métodos basados en sensores remotos.....	34
IV. MATERIALES Y MÉTODOS	39
4.1. MATERIALES.....	39
4.1.1. Equipo utilizado.....	39

4.1.2.	<i>Imágenes satelitales</i>	40
4.1.3.	<i>Software</i>	40
4.2.	MÉTODOS.....	40
V.	LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS APOYADOS CON VANTs	41
5.1.	INTRODUCCIÓN.....	41
5.2.	OBJETIVOS.....	42
5.3.	HIPÓTESIS.....	42
5.4.	METODOLOGÍA.....	43
5.4.1.	<i>Zona de estudio</i>	43
5.4.2.	<i>Planeación y adquisición de información: Tlaola</i>	45
5.4.3.	<i>Planeación y adquisición de información: Chicahuaxtla</i>	47
5.4.4.	<i>Procesamiento de la información</i>	50
5.4.5.	<i>Curvas de nivel y secciones</i>	54
5.4.6.	<i>Estimación de la precisión</i>	55
5.5.	RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	57
5.5.1.	<i>Procesamiento de las imágenes</i>	57
5.5.2.	<i>Precisión de los modelos</i>	62
5.5.3.	<i>Topografía</i>	65
5.6.	CONCLUSIONES.....	67
VI.	CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR UNA INUNDACIÓN, USANDO INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE UN VANT	69
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	69
6.2.	OBJETIVOS.....	70
6.3.	METODOLOGÍA.....	70
6.3.1.	<i>Área de estudio</i>	71
6.3.2.	<i>Imágenes satelitales y ortomosaicos</i>	72
6.3.3.	<i>Clasificación de imagen satelital (antes de la inundación)</i>	72
6.3.4.	<i>Clasificación del ortomosaico (después de la inundación)</i>	77
6.3.5.	<i>Análisis de la precisión de las clasificaciones</i>	80
6.3.6.	<i>Análisis multitemporal de cambios</i>	81

6.3.7.	<i>Aplicación de la metodología de clasificación en un caso de estudio usando VANTs</i>	81
6.4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	82
6.4.1.	<i>Clasificación de la imagen satelital (antes de la inundación)</i>	82
6.4.2.	<i>Clasificación del ortomosaico (después de la inundación)</i>	91
6.4.1.	<i>Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo antes y después de la inundación</i>	100
6.4.2.	<i>Aplicación de la metodología de clasificación con VANTs</i>	102
6.5.	CONCLUSIONES	104
VII.	SUPERVISIÓN DE PRESAS USANDO VANTs	106
7.1.	INTRODUCCIÓN	106
7.2.	OBJETIVOS	107
7.3.	METODOLOGÍA	107
7.3.1.	<i>Zona de estudio</i>	107
7.3.2.	<i>Adquisición de la información: Presa la boquilla</i>	110
7.3.3.	<i>Adquisición de la información: Presa Valerio trujano</i>	111
7.3.4.	<i>Procesamiento de la información</i>	112
7.3.5.	<i>Análisis de la información</i>	112
7.4.	RESULTADOS	123
7.4.1.	<i>Presa la boquilla</i>	123
7.4.2.	<i>Presa Valerio trujano</i>	133
7.5.	CONCLUSIONES	137
VIII.	BIBLIOGRAFÍA	138
IX.	ANEXOS	146
9.1.	PRECISIÓN TLAOLA	146
9.2.	PRECISIÓN CHICAHUAXTLA	150
9.3.	PLANOS DE TLAOLA Y CHICAHUAXTLA	157

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 3.1. Tipos de VANTs a) Multirotor y b) de ala fija	6
Figura 3.2. Curvas de respuesta espectral típicas de algunas coberturas terrestres	10
Figura 3.3. Modelo Tridimensional texturizado de una iglesia de España, (Peinado, Fernández, & Agustín, 2014).	12
Figura 3.4. a) Modelo de puntos, b) Modelo con superficies Triangulares, c) Modelo con superficies y texturas d) Modelo con curvas de nivel cada 0.5 mm de un cráneo de escayola (Pérez, 2006).	12
Figura 3.5. Vista de un edificio generado por un modelo de realidad virtual (Hernández <i>et al.</i> , 2008).	12
Figura 3.6. Imagen aérea de una cancha deportiva del IMTA tomada con un VANT a 40 m de altura	14
Figura 3.7. Resolución espacial de dos imágenes obtenidas con dos vehículos a) 5 cm (con VANT) y b) 30 cm (Satelital).	14
Figura 3.8. Identificación y reseña de un punto de control	16
Figura 3.9. Misión de vuelo con UgCS	18
Figura 3.10. MDS y MDT del centro de la ciudad de Lausana, Suiza (Pix4D, 2017).	19
Figura 3.11. Modelo Digital de Superficie de la ciudad de México obtenido con LiDAR (INEGI, 2017).	22
Figura 3.12. Modelo Digital de Terreno de la ciudad de México obtenido con LiDAR (INEGI, 2017).	22
Figura 3.13. Ortomosaico de un canal del DR075 generado con información de un VANT....	24
Figura 3.14. Segmentación y clasificación de una porción de una parcela agrícola cultivada, dividida en: Cultivo (verde claro), vegetación herbácea (verde oscuro) y suelo desnudo (Rojo) (Torres-Sánchez <i>et al.</i> , 2015).	29
Figura 3.15. Receptor GPS RTK	32
Figura 3.16. Trípode, estación total Nikon y prisma	33
Figura 3.17. A) Modelo digital de elevación obtenida con una estación total, B) ortomosaico del área levantada con la estación total	33
Figura 3.18. Hokkaido, Japón, levantamientos láser de una carretera después de un temblor, y los resultados obtenidos (Soubra & Lorenzo, 2004).	35
Figura 3.19. Modelo digital de superficie (MDS) con tintas hipsométricas generado por un sensor LiDAR (Ruiz & Kornus, 2003).	37
Figura 3.20. Modelo en 3D de un canal obtenido con imágenes traslapadas de un VANT	38

Figura 4.1. Dron hexacóptero DJI y cámara SONY NEX-7.	39
Figura 4.2. GPS RTK (izquierda), Cámara Multiespectral Tetracam (derecha).	39
Figura 5.1. Metodología general para levantamientos topográficos	43
Figura 5.2. Macro y microlocalización del municipio de Tlaola.....	44
Figura 5.3. Ríos que atraviesan el poblado de Chicahuaxtla.....	44
Figura 5.4. Ríos que atraviesan el poblado de Tlaola.....	45
Figura 5.5. Distribución de los puntos de control y verificación en Tlaola.	46
Figura 5.6. GPS Base y marcas de puntos de control sobre la superficie	46
Figura 5.7. Misiones de vuelo para el poblado de Tlaola.....	47
Figura 5.8. Puntos de control y de verificación en Chicahuaxtla.	48
Figura 5.9. Marcas de puntos de control (izquierda) y verificación (derecha).....	48
Figura 5.10. Misiones de vuelo para el poblado de Chicahuaxtla.....	49
Figura 5.11. Flujo de trabajo usado, apoyado con el software PhotoScan	50
Figura 5.12. Ubicación de puntos de control por procesamiento para Tlaola.	52
Figura 5.13. Ubicación de puntos de control por procesamiento para Chicahuaxtla.	53
Figura 5.14. Flujo de trabajo para generar curvas de nivel	54
Figura 5.15. Eje de proyecto para el poblado de Tlaola.....	54
Figura 5.16. Eje de proyecto para el poblado de Chicahuaxtla.	55
Figura 5.17. Flujo de trabajo para determinar la precisión de los modelos digitales	56
Figura 5.18. Tiempos empleados en el flujo de trabajo fotogramétrico con un VANT para 37.4 ha (Izquierda, Tlaola) y 64 ha (derecha, Chicahuaxtla)	57
Figura 5.19. Ubicación y superposición de imágenes para Tlaola (Izquierda) y Chicahuaxtla (derecha).....	58
Figura 5.20. Diferentes niveles de distorsión en un ortomosaico debido al grado de traslape entre imágenes, Zona central del ortomosaico con alto grado de traslape y distorsión ligera (izquierda), Zona periférica del ortomosaico con bajo traslape y alta distorsión (derecha).	58
Figura 5.21. Discretización de nube de puntos del terreno para Tlaola (izquierda) y Chicahuaxtla (derecha).....	59
Figura 5.22. Ortomosaico de Tlaola	60
Figura 5.23. Ortomosaico de Chicahuaxtla	60
Figura 5.24. Modelo digital de superficie y de terreno de Tlaola	60
Figura 5.25. Modelo digital de superficie y de terreno de Chicahuaxtla.....	61

Figura 5.26. Precisión en el plano (X, Y, Z) de los modelos para Tlaola por punto de control	63
Figura 5.27. Precisión en el plano (X,Y,Z) de los modelos para Chichahuaxtla por punto de control.....	65
Figura 5.28. Topografía en zonas despejadas.....	66
Figura 5.29. Topografía en vegetación aislada.....	66
Figura 5.30. Topografía en zonas urbanas.....	66
Figura 5.31. Topografía en vegetación densa.....	66
Figura 6.1. Metodología general para la cartografía.	70
Figura 6.2. Área de estudio sobrepuesta sobre una imagen satelital WorldView-3.....	71
Figura 6.3. Flujo de Trabajo en la clasificación de la vegetación	73
Figura 6.4. Zonas de clasificación del cauce.	74
Figura 6.5. Flujo de Trabajo para clasificar las carreteras en la imagen satelital.....	75
Figura 6.6. Zonas de clasificación de las construcciones (imagen satelital).	76
Figura 6.7. Flujo de Trabajo clasificación construcciones (ortomosaico).....	78
Figura 6.8. Flujo de Trabajo para la clasificación de carretera en el ortomosaico	79
Figura 6.9. Flujo de Trabajo de la clasificación del cauce (ortomosaico).....	80
Figura 6.10. Algoritmo herramienta Borrar de ArcMap (ESRI, 2017).	81
Figura 6.11. Imagen binarizada con ExG de la zona de estudio (Blanco=vegetación).....	82
Figura 6.13. Clasificación de la vegetación en el área de estudio (imagen satelital).	83
Figura 6.14. Rango de valores de la banda verde por zona, a) zona uno (20-75), b) zona dos (20-75), c) zona tres (38-78) y d) zona 4 (38-69).....	83
Figura 6.15. Etapas de la clasificación del cauce: a) imagen falso color, b) clasificación según banda verde (38-69, zona 4), c) rellenar huecos, d) unión de segmentos, e) eliminar objetos pequeños.	84
Figura 6.16. Clasificación de la vegetación y el cauce en el área de estudio (imagen satelital).	84
Figura 6.17. Segmentos con valor en la banda azul>176 (imagen satelital)	85
Figura 6.18. Clasificación del cauce en el área de estudio (imagen satelital)..	85
Figura 6.19. Etapas de la clasificación del pavimento: a) imagen en falso color, b) Segmentación, c) Clasificación según banda azul y el parámetro Density, d) Eliminación de segmentos (área<1,075 px), e) relación de borde con segmentos vecinos (>0.2) y valor en banda azul>169, f) Unión de segmentos.....	86
Figura 6.20. Errores en la clasificación del pavimento (imagen satelital)..	86

Figura 6.21. Índice ExG por zona (color verde), a) zona uno (<-0.025), b) zona dos (<-0.04), c) zona tres (<-0.054) y d) zona 4 (<-0.082).	87
Figura 6.22. Etapas de la clasificación de losas rojas (Zona 1), a) Segmentación, b) Clasificación según índice exceso de verde (valores <-0.025), c) Unión de segmentos, d) Eliminación de segmentos (densidad <1.5 y área <150 px, e) Relación borde con segmentos vecinos (>0.35) .88	88
Figura 6.23. Rango de valores de la banda azul por zona (color azul), a) zona uno (>165), b) zona dos (>164), c) zona tres (>170).	89
Figura 6.24. Etapas de la clasificación de losas de concreto (Zona 1), a) clasificación según banda azul (azul claro), b) Unión de segmentos, c) pasar a clase construcciones objetos con densidad >1.7 y área >120 px, d) Relleno de huecos, e) Relación de borde con segmentos vecinos (>0.55), f) eliminar clase losas de concreto, g) unión de segmentos.	89
Figura 6.25. Cobertura uso de suelo después de la inundación.	90
Figura 6.26. Etapas de la clasificación de la vegetación: a) imagen en falso color, b) segmentación, c) clasificación según el ExG, d) Relleno de huecos, e) relación borde con segmentos vecinos f) unión de segmentos.	91
Figura 6.27. Clasificación de la vegetación en el área de estudio (ortomosaico).	92
Figura 6.28. Vegetación (blanco) no considerada en el índice de verde (ortomosaico).	92
Figura 6.29. Errores en discretizar la vegetación con el índice de exceso de verde.	93
Figura 6.30. Detalles Segmentación construcciones (ortomosaico).	93
Figura 6.31. Raster de diferencia de altura entre el MDS y MDT	94
Figura 6.32. Etapas de la clasificación de las construcciones: a) imagen falso color b) Segmentación, c) clasificación según la diferencia en alturas entre el MDS y MDT, c) unión de segmentos, d) suavizado del borde, f) eliminar objetos pequeños (rosa).	94
Figura 6.33. Clasificación de las construcciones (ortomosaico).	95
Figura 6.34. Detalle: Errores en la clase construcciones (ortomosaico).	95
Figura 6.35. Etapas de la clasificación de las carreteras de concreto: a) imagen falso color b) segmentación, c) clasificación según la banda azul (>139), d) relación borde con segmentos vecinos, e) unión de segmentos, f) eliminar objetos pequeños.	96
Figura 6.36. Clasificación del pavimento (ortomosaico).	97
Figura 6.38. Clasificación de techos de concreto como carreteras (ortomosaico).	97
Figura 6.39. Etapas de la clasificación del cauce: a) imagen falso color b) Clasificación del borde según la desviación estándar en las alturas del MDT, c) relleno de huecos, d) unión de segmentos, e) eliminar objetos pequeños	98
Figura 6.40. Mapa de uso de suelo y cobertura después de la inundación.	99
Figura 6.41. Cambios en la cobertura del suelo después de la inundación.	101

Figura 6.42. Casas arrastradas durante la inundación y construidas entre abril y septiembre	102
Figura 6.43. Cartografía de Tlaola.....	103
Figura 7.1. Macro y microlocalización de la presa La Boquilla.....	107
Figura 7.2. Cortina de la presa La Boquilla.....	108
Figura 7.3. Macro y microlocalización de la presa Valerio Trujano	109
Figura 7.4. Vista aérea de la cortina de la presa Valerio trujano.....	109
Figura 7.5. Ubicación de puntos de control en la cortina de la presa La Boquilla.....	110
Figura 7.6. Misión de vuelo sobre la presa la boquilla.....	111
Figura 7.7. Misiones de vuelo sobre la cortina de la presa Valerio Trujano	112
Figura 7.8. Imagen en RGB de una grieta sobre la cortina	114
Figura 7.9. Ortomosaico de la presa La Boquilla	123
Figura 7.10. Nube de puntos de la presa La Boquilla.....	123
Figura 7.11. Modelo digital de superficie de la presa La Boquilla	124
Figura 7.12. Medida de la longitud de la cortina y el ancho del parapeto.....	124
Figura 7.13. Perfil de la cortina de la presa La Boquilla	125
Figura 7.14. Histograma de intensidades de la imagen de la cortina.	126
Figura 7.15. Clasificación de zonas húmedas (rojo) basado en objetos usando el algoritmo Otsu multiumbral.	126
Figura 7.16. Clasificación de zonas húmedas (rojo) basado en pixel con Matlab	127
Figura 7.17. Filtro Gaussiano con distintos parámetros de escala.....	128
Figura 7.18. Valores de la imagen en escala de grises con mascara palaciana en la detección de puntos	128
Figura 7.19. Grietas basadas en detección de puntos	129
Figura 7.20. Clasificación de grietas con un solo umbral (Otsu): a) Puntos, b) líneas	129
Figura 7.21. Modelo de imagen en escala de grises con mascara palaciana en la detección de líneas.....	130
Figura 7.22. Grietas basadas en detección de líneas	130
Figura 7.23. Modelo de imagen en escala de grises con mascara palaciana en la detección de puntos	131
Figura 7.24. Grietas basadas en detección de bordes	131
Figura 7.25. Clasificación de una grieta y una junta	132
Figura 7.26. Ortomosaico de la presa Valerio Trujano	133

Figura 7.27. Modelo digital de superficie de la presa Valerio Trujano.....	134
Figura 7.28. Modelo 3D de la obra de excedencia de la presa Valerio trujano.....	134
Figura 7.29. Imagen de la zona de estudio y en escala de grises con filtro Gaussiano	135
Figura 7.30. Clasificación del vaso de la presa (Blanco)	135
Figura 7.31. Detección del borde entre la cortina y el vaso de la presa	136
Figura 7.32. Elevaciones en el borde entre la cortina y el vaso de la presa Valerio Trujano..	136
Figura A-1: Plano de vista en planta y perfil para el poblado de Tlaola	157
Figura A-2: Plano de vista en planta para el poblado de Chicahuaxtla.....	158
Figura A-3: Plano de vista en perfil para el poblado de Chicahuaxtla	159

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Aplicaciones civiles de los VANTs (Barrientos et al., 2007 y Ojeda, Flores, & Unland, 2014).....	8
Cuadro 2. Ejemplos de métodos de captura de datos para la construcción del MDE (Felicísimo, 1994).....	20
Cuadro 7. Número de imágenes identificadas por puntos de control para Tlaola.....	51
Cuadro 8. Número de imágenes identificadas por puntos de control para Chicahuaxtla.	51
Cuadro 9. Características de los procesamientos fotogramétricos de las imágenes.	59
Cuadro 10. Precisión en cm de los Modelos digitales por procesamiento para Tlaola	63
Cuadro 11. Precisión en cm de los Modelos digitales por procesamiento para Chicahuaxtla ..	64
Cuadro 12. Escala de valoración del coeficiente Kappa	81
Cuadro 13. Matriz de confusión de la clasificación de la imagen satelital antes de la inundación	90
Cuadro 14. Matriz de confusión de la clasificación del ortomosaico después de la inundación	99
Cuadro 15. Cambio de la cobertura por la inundación en la zona de estudio	100
Cuadro 16. Matriz de confusión de la clasificación de Tlaola	103
Cuadro 17. Elevación de los puntos de verificación	122
Cuadro 18. Matriz de error de las clasificaciones con distintos algoritmos de umbralización	127
Cuadro A1. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 PC.....	146
Cuadro A2. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 (b) PC.	146
Cuadro A3. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 5 PC.....	147

Cuadro A4. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 6 PC.	147
Cuadro A5. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 8 PC.	148
Cuadro A6. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 9 PC.	148
Cuadro A7. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 10 PC.	149
Cuadro A8. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 11 PC.	150
Cuadro A9. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 PC.	150
Cuadro A10. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 (b) PC.	151
Cuadro A11. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 5 PC.	152
Cuadro A12. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 6 PC.	153
Cuadro A13. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 8 PC.	153
Cuadro A14. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 10 PC.	154
Cuadro A15. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 12 PC.	155
Cuadro A16. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 14 PC.	156

I. RESUMEN

En este trabajo se generaron y validaron metodologías para realizar levantamientos topográficos y supervisión de infraestructuras civiles con el apoyo de vehículos aéreos no tripulados (VANTs). Se adquirieron imágenes con un VANT hexacóptero de cuatro sitios de estudio: dos poblaciones semiurbanas (Tlaola y Chichahuaxtla) ubicadas en la sierra norte del estado de Puebla, y la cortina de dos presas, la presa la Boquilla, ubicado en el distrito de riego (DR) 05, Delicias, Chihuahua y la presa Valerio trujano, ubicado en el DR 068, Tepecoacuilco, Guerrero. Utilizando la técnica fotogramétrica se generaron los modelos digitales de superficie (MDS), modelos digitales de terreno (MDT) y ortomosaico de los sitios.

Para cada población semiurbana, se realizaron 8 restituciones fotogramétricas, variando el número de puntos de control (PC), desde 4 hasta 14. Se determinaron los factores que definen la resolución espacial de los modelos digitales y la influencia del número de puntos de control en la precisión de los MDT. Además, con un ortomosaico del poblado de Chichahuaxtla y una imagen satelital de alta resolución (30 cm/pixel), se realizó una clasificación basado en objetos dividida en cinco grandes clases: vegetación, construcciones, carreteras, cauces y otros. Y mediante la comparación de ambas clasificaciones se determinaron los cambios de uso de suelo que provoco una inundación ocurrida en el mes de agosto del 2016 en dicho poblado.

En el caso de las presas, se analizaron los ortomosaicos y se generaron metodologías, usando técnicas de umbralización y segmentación basada en detección de discontinuidades, para determinar la ubicación de zonas húmedas y grietas existentes sobre la cortina y calcular la elevación media del vaso.

Los resultados muestran que la fotogrametría con VANTs permite obtener modelos digitales de elevación y ortomosaicos de alta precisión y resolución espacial de centímetro, en lapsos de tiempos relativamente cortos. Estos productos se pueden utilizar para obtener la topografía de un sitio o para detectar características de importancia en infraestructuras civiles.

La resolución espacial de los modelos digitales (8.4 cm/pixel en Tlaola y 21 cm/pixel en Chichahuaxtla) dependió de la altura de vuelo y de la calidad con que se generó la alineación de las imágenes y densificación de la nube de puntos, y la resolución de los ortomosaicos (2.0 cm/pixel en Tlaola y 2.9 cm/pixel en Chichahuaxtla) dependió únicamente de la altura de vuelo a la que se adquirieron las imágenes.

La precisión en el eje Z, dependió del número de puntos de control utilizados en la restitución fotogramétrica; el RMSE en este eje disminuyo cuando se aumentó el número de puntos de control. Los MDT georeferenciados con cuatro puntos de control presentaron RMSE desde 3 m hasta 16.6 cm, los georefenciados con cinco hasta 14 puntos presentaron RMSE desde 15.4 cm hasta 5.9 cm.

La precisión del MDT en X y Y, dependió de la ubicación de los puntos de control en el terreno, cuando se usaron puntos de control cuya distancia a otro punto más cercano era superior de 500 m se encontraron precisiones desde 81 cm hasta 9.4 cm, en caso contrario, los RMSE fluctuaron desde 11.3 cm hasta 2.1 cm.

En el poblado de Chichahuaxtla, los grandes cambios de uso de suelo se centran sobre las márgenes del río Zempoloantongo. Después de la inundación, la clase que más se redujo en superficie fue el de vegetación (1.9 ha), y la que menos reducción tuvo fue el cauce (0.08 ha); la clase que más superficie aumento fue “otros” (1.53 ha) que en realidad se trata de suelo desnudo y la de menor aumento fueron las construcciones (0.02 ha). El suelo desnudo creció (“Otros”) debido a la erosión que provoco la inundación, la cual también ocasiono que la alineación del cauce cambiara y su ancho aumentara.

En la detección de grietas, de los métodos probados, el que mejor discrimino esta característica fue el de detección de borde de Canny. En la detección de zonas húmedas, con el índice propuesto, se encontró que sí sobre la cortina existe vegetación se debe usar un algoritmo multiumbral para clasificar las zonas húmedas, en caso contrario es suficiente con un algoritmo de un solo valor umbral. En el cálculo de la elevación media del vaso, con la metodología propuesta, se encontró un error medio de -6.1 cm con respecto a elevaciones obtenidas en campo.

II. INTRODUCCIÓN

La posibilidad de obtener la topografía de un sitio con alta resolución espacial y temporal es cada vez más importante para diversas disciplinas. Actualmente la topografía tiene distintas aplicaciones, como en levantamientos de trazos; deslindes; divisiones de tierra; determinaciones de áreas; nivelación de terrenos; construcción de bordos, canales y drenes; cuantificación de volúmenes extraídos, en los trabajos topográficos antes, durante y después de la construcción de obras, como carreteras, ferrocarriles, edificios, puentes, canales, presas, fraccionamientos, servicios municipales (Alcántara, 2014).

Los levantamientos topográficos, apoyados con métodos tradicionales como estaciones totales o niveles, exigen una inversión de días o semanas y brindan resoluciones gruesas. Los basados en imágenes satelitales además de que su precisión es superior al metro pueden presentar dificultades por baja calidad espacial de los datos, cobertura de nubes o efectos atmosféricos. Los basados en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTs) vienen a solucionar algunos de los problemas anteriores, ya que se pueden adquirir datos de manera rápida y muy precisa que pueden ser procesados comúnmente con la técnica fotogramétrica en nubes de puntos, modelos digitales de superficie (Flener *et al.*, 2013) y ortomosaicos (Hernández, 2006).

La característica más importante de los VANTs en la topografía, se evidencia en el proceso de captura y almacenamiento de datos de campo, aumentando la posibilidad de obtener un producto final con mayor rapidez y de mayor calidad; sin embargo, cada vez se requieren equipos computacionales más sofisticados para el procesamiento de la información en gabinete.

El auge que tienen los VANTs se debe principalmente a la miniaturización de sus componentes, además, no se arriesgan vidas humanas ante el mal funcionamiento del vehículo (Ojeda, Flores, & Unland, 2014) y es útil para aquellas zonas de difícil acceso geográfico como volcanes, incendios, zonas de desastre como deslaves o inundaciones (Barrientos *et al.*, 2007). Esta tecnología está evolucionando de manera exponencial aportando nuevas aplicaciones en la minería, monitoreo de cultivos, bosques y otros ecosistemas, inspección de obra civil e investigaciones medioambientales, así como en la vigilancia (Martínez *et al.*, 2015).

En la supervisión de obras civiles, los VANTs ofrecen diversas ventajas, las principales son: i) Se obtienen fotografías y videos en alta resolución de la obra en pocas misiones de vuelo, a un bajo costo. Los VANTs vuelan cerca de la superficie de interés para localizar grietas, problemas de erosión corrosión y defectos de construcción, que de otro modo requerirían plataformas, andamios, escaleras o arneses de seguridad. Anteriormente esta tarea demandaba el uso de vehículos tripulados o brigadas de supervisión, con un gran consumo de tiempo y recursos. ii) No se expone la vida del operador. El recorrido se programa de forma remota y se asiste por medio de un sistema de seguimiento computarizado. iii) En el VANT se pueden colocar cámaras térmicas y termográficas, útiles en la detección de corrosión, fugas y motores con problemas de calentamiento (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2017) .

Ante las crecientes aplicaciones y la flexibilidad de utilización de estos aparatos resulta necesario validar en campo y en gabinete la precisión, los tiempos, los alcances y eficiencias que pueden llegar a brindar los productos generados con VANTs en los levantamientos y en la supervisión de infraestructura civil para que puedan ser considerados confiables.

III. MARCO TEÓRICO

3.1. VEHÍCULOS AÉREOS NO TRIPULADOS (VANTs)

Un vehículo aéreo no tripulado (VANT) o dron es un equipo sin tripulación humana con la capacidad de realizar distintas actividades (Gora, 2015), está acondicionado para transportar sensores remotos y/o dispositivos auxiliares operados a distancia que pueden ser pre-programados para fines diversos.

La dirección general de aeronáutica civil mexicana (DGAC, 2015) lo define como un sistemas de aeronave piloteada a distancia, controlada por una persona que se le denomina “piloto en tierra”, mediante un sistemas de control de tierra, y cuando aplique, con apoyo de una computadora, enlaces de comunicación y equipo adicional que sea necesario para su operación de forma segura.

3.1.1. Tipos de VANTs

Al igual que en las aeronaves tripuladas, los VANTs se clasifican según su condición de sustentación (de ala fija o multirotores) (Figura 3.1), según su tipo de propulsión (eléctricos, turbohélices, a reacción, etc.), según su tiempo de autonomía, según su altura máxima de vuelo y su alcance.



Figura 3.1. Tipos de VANTs a) Multirotor y b) de ala fija

Los multirotores son impulsados por tres o más motores, despegan y aterrizan verticalmente, permiten realizar vuelos controlados, estacionario y en espacios reducidos, no requieren de un operador con demasiada experiencia de vuelo, ofrecen la ventaja de proporcionar una vista de 360° y de incorporar diferentes cámaras y su autonomía de vuelo es reducido pudiendo llegar a ser de un par de minutos, (Domínguez, Martínez, & Sandoval, 2013).

Los drones de ala fija son capaces de mantener un nivel de vuelo controlado y son propulsados por un motor de explosión o de reacción, permiten realizar vuelos de largo alcance y a gran

altitud (>120 m), consumen menos energía que los multirrotor por tanto su autonomía de vuelo es mayor, su control de vuelo es complejo por la dificultad en las maniobras y no permiten realizar vuelos estacionarios.

Dependiendo del tipo de misión u objetivo que se pretende realizar, un tipo de VANT (multirrotor o ala fija) es seleccionado. Por ejemplo, en aquellos casos donde se requiera que el equipo realice maniobras en forma estacionaria y/o a baja velocidad (Barrientos *et al.*, 2007), el VANT más adecuado sería el de multirrotor que también puede ser usado para eventos más urgentes como recabar información previa y con fines de planeación (Ojeda, Flores, & Unland, 2014). En cambio, si se desea realizar vuelos a velocidades y alturas superiores (<120 m), por ejemplo para recolectar datos cartográficos, la opción más prudente sería optar por los drones de ala fija.

3.1.2. Ventajas y desventajas

La teledetección a partir de sensores montados en VANTs presenta varias ventajas respecto a la fotografía aérea convencional, e incluso frente a las imágenes captadas desde plataformas satelitales en aplicaciones que requieran alta resolución; pero no así para estudios regionales (Di Leo, 2015). Estas ventajas fundamentales son: mayor resolución espacial, mayor resolución temporal, ya que pueden volar a muy baja altura (<100 m) y obtener imágenes con mayor frecuencia; pueden ser manejados autónomamente por el usuario, son capaces de tomar imágenes en días nublados y el costo de los sensores empleados es relativamente bajo, pudiéndose usar cámaras digitales convencionales (Peña *et al.*, 2014); sin embargo la ventajas más obvia es que estos equipos pueden llegar a lugares inaccesibles: zonas donde no existen caminos, áreas accidentadas, vegetación muy densa o, inclusive, con conflictos sociales.

Barrientos *et al.* (2007) reportan que la principal desventaja de esta tecnología es que se requiere de pilotos especializados, lo cuales normalmente dedican toda su atención al vuelo de la aeronave no pudiendo prestar atención al entorno o a la misión.

Según (Ojeda, Flores, & Unland, 2014) las principales ventajas y desventajas generales de los VANTs son:

a) Ventajas

- ❖ No se arriesgan vidas humanas ante el mal funcionamiento del vehículo.
- ❖ Útil para aquellas zonas de difícil acceso geográfico, orden público, volcanes, incendios, concentración de radioactividad, zonas de desastre como deslaves o inundaciones entre otros.
- ❖ Posibilidad de obtener fotografías aéreas de alta resolución, en tiempo real si se cuenta con el equipo y accesorios.
- ❖ No presenta problemas por condiciones atmosféricas (nubosidad) que impide la utilidad del uso de imágenes de satélite, ya que la altura de vuelo puede ser por debajo de las nubes.

- ❖ Bajo costo en la adquisición de imágenes aéreas.
- ❖ Adquisición de imágenes aéreas en “casi” cualquier momento lo cual permite la realización de estudios espacio-temporales.

b) Desventajas

- ❖ Dependen de una estación de seguimiento en tierra.
- ❖ Vulnerabilidad a varios factores ambientales, aves, aviones, redes eléctricas, entre otros.
- ❖ Limitaciones de peso de carga.
- ❖ Dificultad de integración en el espacio aéreo.
- ❖ Requiere de equipo auxiliar de bajo peso y volumen que generalmente son caros.
- ❖ Limitación en la duración y alcance de los vuelos por limitada capacidad de carga de equipo y baterías.
- ❖ Sujeto regulación y normatividad de uso del espacio aéreo. En algunos países se limita su uso debido a la dificultad de obtener permisos de vuelo.

3.1.3. Aplicaciones civiles

Si bien fue en el sector militar donde surgieron los VANTs y el que ha impulsado su desarrollo, desde hace ya algunos años han surgido diferentes aplicaciones civiles, que han ampliado el interés, la investigación y el desarrollo de estos sistemas, a la vez que han originado nuevos requisitos en su operatividad (Barrientos *et al.*, 2007).

En los últimos años el desarrollo de los VANTs junto con los sensores remotos ha aumentado exponencialmente en todo el mundo, ya que sus aplicaciones son muy numerosas. Actualmente, esta tecnología aporta aplicaciones no solo para la adquisición de imágenes sino también para diversos análisis de datos espacio-temporal, desde levantamientos cartográficos hasta reconocimientos de patrones terrestres o medición remota de propiedades o variables de interés de la superficie, (Ojeda, Flores, & Unland, 2014).

Además, están siendo utilizados con éxito en la minería, control de biomasa vegetal de cultivos, bosques y otros ecosistemas, inspección de construcciones e investigaciones medioambientales, así como en la vigilancia e inspección de infraestructuras sobre todo las generadoras de energía alternativa, como los campos fotovoltaicos y parques eólicos (Martínez *et al.*, 2015).

En el Cuadro 1 se presentan las aplicaciones más importantes de esta tecnología por área de estudio destacando el tipo de VANT más común para realizar la misión.

Cuadro 1. Aplicaciones civiles de los VANTs (Barrientos et al., 2007 y Ojeda, Flores, & Unland, 2014).

Área	Aplicaciones	VANT más común
Agricultura	Vigilancia de los cultivos fumigación.; Análisis del estrés hídrico; Vigilancia de ganado.	M
Filmografía	Cine y Reportaje fotográfico.	M, AF

Ingeniería	Inspección de infraestructura: Oleoductos y Gaseoductos. Inspección de obra civil: puentes viaductos, presas.	M
Climatología	Muestreo y análisis de la atmósfera para la previsión; Monitorización de contaminación atmosférica; Toma de muestras y monitorización de partículas en Aerosol atmosférica	M, AF
Desastres Naturales	Reconocimiento y toma de datos en Huracanes, Riadas, Volcanes. Noticias, información y fotografías, imágenes, por ejemplo grado de afectación, nivel de siniestros, población afectada	M, AF
Desastres no naturales	Radioactivos; Vertidos contaminantes (Petróleo); Incendios forestales	M, AF
Cartografía	Topografía	AF
Electricidad	Inspección de líneas eléctricas	H
Vigilancia	Inmigración ilegal; Contrabando; Seguimiento y control del tráfico; Zonas de embotellamiento.	M, AF
Ríos	Control de supervisión de los cursos de agua y el nivel, las inundaciones y la contaminación.	AF
Recursos naturales	Pesca; Minería	M, AF

*M=Multirotor, AF= Ala fija

3.2. TELEDETECCIÓN Y FOTOGRAMETRÍA APOYADA CON VANTs

La convergencia que se produce entre fotogrametría y teledetección se debe fundamentalmente a que la primera incorpora sensores CCD (Charge Coupled Devices), y que en la segunda la resolución espacial se ha incrementado hasta alcanzar valores de centímetros (Hernández, 2006). La teledetección permite trabajar en un amplio abanico de radiaciones en el espectro electromagnético y las cámaras analógicas empleadas en fotogrametría se restringían al espectro visible; lo anterior permite admitir que ambas disciplinas se complementan.

La sociedad internacional de fotogrametría y sensores remotos (ISPRS) unifica en una sola definición a la fotogrametría y teledetección. Define que la fotogrametría y teledetección es el arte, ciencia y tecnología para obtener información fiable acerca de la Tierra y su medio ambiente, o de otros objetos físicos, a partir de imágenes procedentes de sensores y mediante procesos de grabación, medición, análisis y representación.

3.2.1. Teledetección

Por teledetección se entiende, de modo genérico, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella, y en el ámbito de las ciencias de la tierra, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales (Pérez & Muñoz, 2006). Integra un amplio conjunto de conocimientos y tecnologías empleadas en la observación, el análisis y la interpretación de fenómenos terrestres y planetarios (Di Leo, 2015).

La teledetección surge y se desarrolla en el siglo XX, distinguiéndose en su evolución dos etapas básicas, la teledetección aérea y la espacial. Los años 60 con el desarrollo de satélites artificiales marcan el punto de inflexión hacia lo que se ha denominado la era espacial (Sobrino *et al.*, 2000).

La evolución de esta disciplina desde los comienzos hasta la actualidad ha venido precedida por un constante avance en la calidad de los sensores y las plataformas usadas (Sobrino *et al.*, 2000). El desarrollo reciente desde plataformas aéreas se enfoca en el empleo de VANTs, orientados a la captura de datos geospaciales (Martínez *et al.*, 2015).

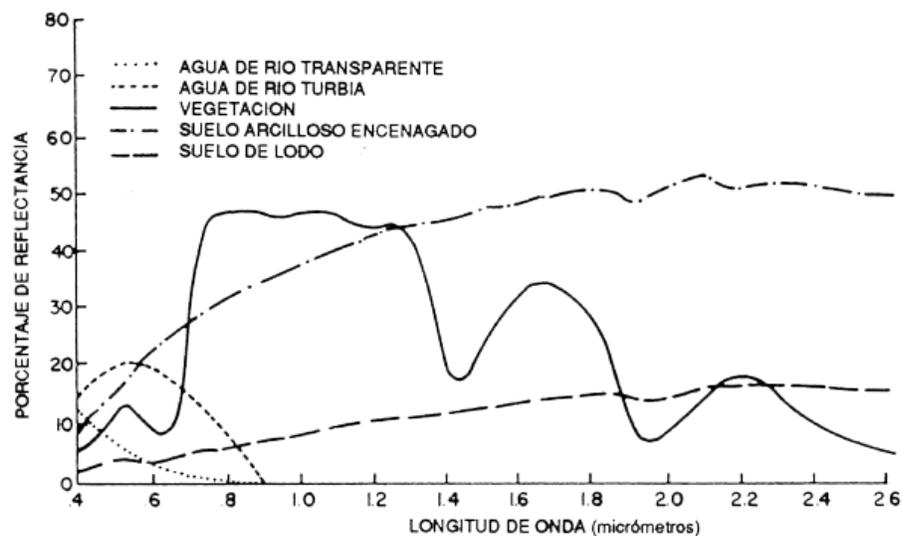


Figura 3.2. Curvas de respuesta espectral típicas de algunas coberturas terrestres

3.2.2. Fotogrametría

La Sociedad Americana de Fotogrametría y Teledetección (ASPRS) define a la fotogrametría como el arte, ciencia y tecnología de obtener información fiable de objetos físicos o del medio ambiente, a través de procesos de grabación, medida e interpretación de imágenes y patrones de energía electromagnética radiante y otros fenómenos.

Las principales ventajas de la fotogrametría sobre otros sistemas de captura información son: el registro de la información es instantáneo por tanto existe la posibilidad de trabajar con objetos en movimiento, el proceso de captura de la información y el postproceso no perturba el objeto de estudio, se utilizan materiales relativamente baratos y de fácil manipulación, etc. Una de sus principales desventajas es que se auxilian de mediciones realizadas en campo para poder georeferenciar los productos obtenidos.

La fotogrametría nació de la necesidad de extraer información métrica de las imágenes y el desarrollo de esta ha estado siempre unida a la precisión. La naturaleza de las cámaras, la regularidad o nivel de perfección de las lentes, el conocimiento preciso de los parámetros internos de la cámara y el ajuste de haces de bloques de fotografías por determinados métodos

matemáticos, han sido factores absolutamente vitales para el desarrollo de la fotogrametría garantizando la precisión (Ortiz, 2013).

Herrera (1987) clasifica la fotogramétrica dependiendo del método empleado en tres tipos diferentes: analógica, analítica y digital. La fotogrametría digital es el que más desarrollo ha tenido en los últimos años, como consecuencia del gran desarrollo de las cámaras digitales y de la informática, que permite realizar todos los procesos fotogramétricos mediante el uso de computadoras (Santos, 2014) y con ello la generación automática de modelos digitales de elevación, ortomosaico y estéreo-imágenes, generación y visualización de modelos tridimensionales, etc. La salida en la fotogrametría digital puede ser en formato raster o formato vectorial.

En el desarrollo del proceso fotogramétrico existen, dos fases bien diferenciadas aunque relacionadas entre sí. La primera es la fase de trabajo en campo que consiste en la obtención de las fotografías del área, medida de algunos elementos y levantamiento de puntos de control. En una segunda fase se obtiene la geometría de este objeto mediante cálculos a partir de medidas efectuadas sobre los fotogramas y de las efectuadas sobre el terreno en la fase anterior (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003).

Actualmente la técnica fotogramétrica es la misma, el cambio más significativo se encuentra en la plataforma aérea. Cada vez se utiliza más los VANTs por el bajo coste de mantenimiento y su funcionalidad. Este tipo de plataformas aumentará debido a su fácil manejo y por su seguridad (Santos, 2014).

3.2.3. Aplicaciones de la fotogrametría

La fotogrametría es una técnica que puede ser utilizada en multitud de ciencias, pero es en las aplicaciones topográficas y en la elaboración de mapas y planos donde se encuentra su principal interés, (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003). Hernández (2006) divide las aplicaciones fotogramétricas en cartográficas (topográficas) y no cartográficas.

a) Aplicaciones cartográficas

Las aplicaciones cartográficas de la fotogrametría tienen como objetivo principal la determinación cuantitativa de magnitudes geométricas: coordenadas, posiciones superficies, volúmenes, etc., pero fundamentalmente la producción cartográfica (Hernández, 2006). Desde este punto de vista se puede considerar a la fotogrametría como una fuente más de información espacial. Como ejemplos de aplicaciones cartográficas se pueden citar: Producción cartográfica 3D, modelos digitales de elevación y Ortomosaicos, diseño de vías y líneas ferroviarias, estudios hidrológicos, estudios de navegación y rectificación de cauces, líneas de transmisión y subtransmisión eléctrica (Zapata, 2003).

En los trabajos topográficos, el uso de esta técnica presenta ventajas considerables, como son la sustitución del trabajo de campo por trabajo de gabinete, poder levantar todo tipo de terreno, mayor cobertura en menos tiempo, etc. (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003).

b) Aplicaciones no cartográficas

En la actualidad las aplicaciones de la fotogrametría han evolucionado hacia campos ajenos a la producción cartográfica, creándose herramientas específicas para usos concretos, por ejemplo: aplicaciones geomorfológicas, estudios de evaluación de impacto ambiental, aplicaciones arquitectónicas (Figura 3.3), mediciones industriales de detalle, evolución del territorio en el tiempo, reconstrucción de objetos (Figura 3.4), realidad virtual (Figura 3.5).



Figura 3.3. Modelo Tridimensional texturizado de una iglesia de España, (Peinado, Fernández, & Agustín, 2014).

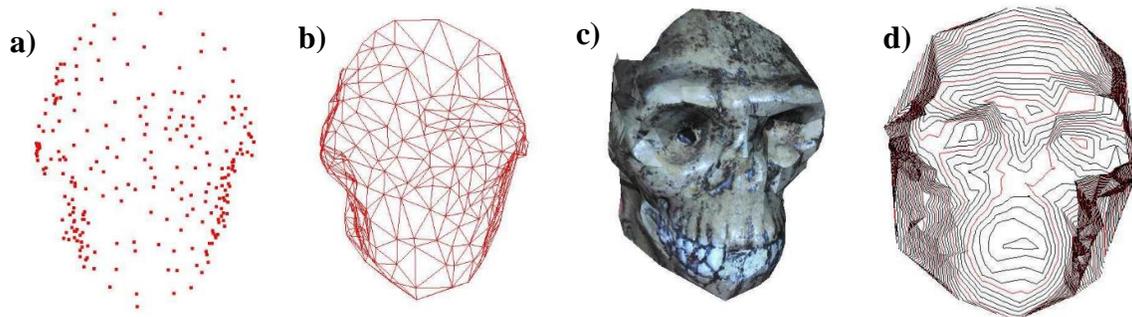


Figura 3.4. a) Modelo de puntos, b) Modelo con superficies Triangulares, c) Modelo con superficies y texturas d) Modelo con curvas de nivel cada 0.5 mm de un cráneo de escayola (Pérez, 2006).



Figura 3.5. Vista de un edificio generado por un modelo de realidad virtual (Hernández *et al.*, 2008).

3.2.4. Cámaras digitales

Los VANTs generalmente vienen equipados con cámaras fotográficas digitales no métricas que representan un menor costo en su adquisición, no obstante, otros sensores remotos tales como termovisores, LiDAR (Light Detection and Ranging) y sensores infrarrojos han comenzado a implementarse recientemente en estas plataformas, incrementando la información geoespacial captada (Martínez *et al.*, 2015).

Estas cámaras no métricas poseen buena calidad radiométrica, pero mala calidad geométrica, provocada por la distorsión del objetivo, que puede llegar a valores de hasta 500 μm . Por ello, es necesario realizar su calibración antes de utilizarlas en tareas fotogramétricas (Mihaylov, Chibunichev, & Kurkov, 2005). Existen diversos métodos y algoritmos de calibración de cámaras, algunos automáticos a partir de fotografías de patrones impresos utilizando softwares computacionales.

La calibración trata de determinar los parámetros geométricos (distancia focal y coordenadas del punto principal) y físicos (parámetros de la distorsión radial y tangencial) de la toma de las fotografías (Sánchez *et al.*, 2004). El proceso de calibración de cámaras, es necesario para poder extraer información métrica a partir de imágenes 2D del mundo 3D (Aracena, Campos, & Luis, 2005).

El proceso de calibración se efectúa para una distancia focal concreta. El enfoque o zoom hace que varíe ligeramente la distancia focal, por lo que es conveniente mantenerlo fijo. Si se trata de una cámara compacta, podemos usar el modo paisaje para ajustar el enfoque a infinito. Si disponemos de una cámara réflex, lo ideal es calibrar la cámara a una distancia óptima de enfoque denominada distancia hiperfocal, y no a infinito, puesto que maximizaremos la profundidad de campo de la escena. Si queremos profundidad de campo elegiremos un diafragma cerrado, aunque no demasiado ya que, debido a fenómenos de difracción, se consigue un nivel óptimo de detalle entre $f5.6$ y $f11$ (Cabezos & Cisneros, 2012).

La capacidad discriminante de las cámaras montadas en VANTs frente a las distintas condiciones de uso, cobertura y estado presentes en la superficie terrestre viene dada por la capacidad de relevamiento multispectral (también hiperespectral) de la energía reflejada por los distintos objetos que se hallan presentes en la escena. Cuanto más bandas espectrales posea la cámara a bordo, mayor será la cantidad y calidad de la información (Di Leo, 2015) y mayor el precio de adquisición de la misma.

3.2.5. Imágenes aéreas digitales

Las imágenes aéreas (Figura 3.6) se obtienen desde el espacio aéreo a través de cámaras montadas sobre plataformas, usualmente avionetas o VANTs, son tomadas en forma continua conformando lo que se llama línea fotogramétrica, la cual se repite en forma paralela hasta cubrir el área requerida para ser cubierta (Urrejola, 2015); su escala está definida por la altura de vuelo y la distancia focal de la cámara empleada.

Una de las aplicaciones más interesantes de estas imágenes es la obtención de datos métricos mediante levantamientos fotogramétricos, donde equiparando las imágenes con perspectivas cónicas y aplicando las leyes restitutivas del sistema cónico, obtenemos los datos necesarios para un levantamiento gráfico (Cabezos & Cisneros, 2012).



Figura 3.6. Imagen aérea de una cancha deportiva del IMTA tomada con un VANT a 40 m de altura

En una imagen digital, la resolución geométrica está directamente relacionada con el tamaño del píxel (Figura 3.7). El tamaño del píxel se expresa en micras y a través de la escala de la fotografía se traduce en magnitudes terreno, obteniéndose la resolución espacial. (Hernández, 2006).



Figura 3.7. Resolución espacial de dos imágenes obtenidas con dos vehículos a) 5 cm (con VANT) y b) 30 cm (Satelital).

La resolución radiométrica es la sensibilidad del sensor para discretizar las diferencias de radiación recibida. En cualquiera de los distintos tipos sensores esta resolución será el número

máximo de niveles de gris. La cantidad de tonos discriminables en una imagen digital está relacionada con una potencia de 2. Si la información de cada celda se almacena en 8 bits (ocho dígitos binarios 0/1) podrán manejar un total de 256 valores distintos, rango $[0; 255] = 2^8$. Si la información de cada celda se almacena en 1 bit, únicamente se podría diferenciar entre dos tonos: blanco o negro. (Hernández, 2006).

La resolución espectral de una imagen digital, indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede distinguir un sensor. Y por último la resolución temporal de una imagen digital, indica la periodicidad con la que se registran las imágenes.

Los VANTs permiten capturar imágenes aéreas con una resolución espacial más alta y una periodicidad programable, lo cual no ocurre con otras plataformas como los satélites o avionetas. Lo cual indica que los sensores o cámaras digitales que se montan en los VANTs mejoran la resolución espacial y temporal de los datos e imágenes, sin embargo, en lo que respecta a la resolución espectral aún tiene un camino largo que recorrer.

3.2.6. Puntos de apoyo o de control terrestre

La fotogrametría permite sustituir acotaciones efectuadas en el terreno por medidas contenidas en fotografías o imágenes; sin embargo, requiere de puntos de control o de apoyo terrestres identificables en las fotografías y cuyas coordenadas en un sistema terrestre sean conocidas (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003). La configuración del apoyo fotogramétrico de un trabajo se refiere al número y distribución de los puntos de apoyo.

Las coordenadas de los puntos de control materializan el marco de referencia de todo el proceso, de manera que estas coordenadas se deben obtener en el sistema de referencia geodésica al que se debe referir el trabajo (Hernández, 2006). La precisión esperada, tanto en planimetría como en altura en la restitución fotogramétrica, depende de la precisión con que se han determinado los puntos de apoyo (Lehmann, 1975).

Para la obtención de las coordenadas de estos puntos terrestres tradicionalmente se ha empleado métodos de topografía clásica (Triangulación, poligonal, radiación, nivelación, etc.) aunque cada vez más se trabaja con sistemas de posicionamiento global (GPS) (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003).

En la obtención de las coordenadas de un punto de apoyo es muy importante cerciorarse en campo de la correcta identificación y visualización del punto en las diferentes imágenes que se toman con el vehículo aéreo, evitando problemas típicos tal como que en una imagen se observe perfectamente el punto de apoyo pero en otra aparezca oculto por una sombra (Hernández, 2006). En la actualidad en la reseña de un punto de apoyo (Figura 3.8) se incluye información tal como: identificador, coordenadas, imagen con la posición aproximada, fotografías panorámicas y de detalle, posición sobre cartografía, etc.

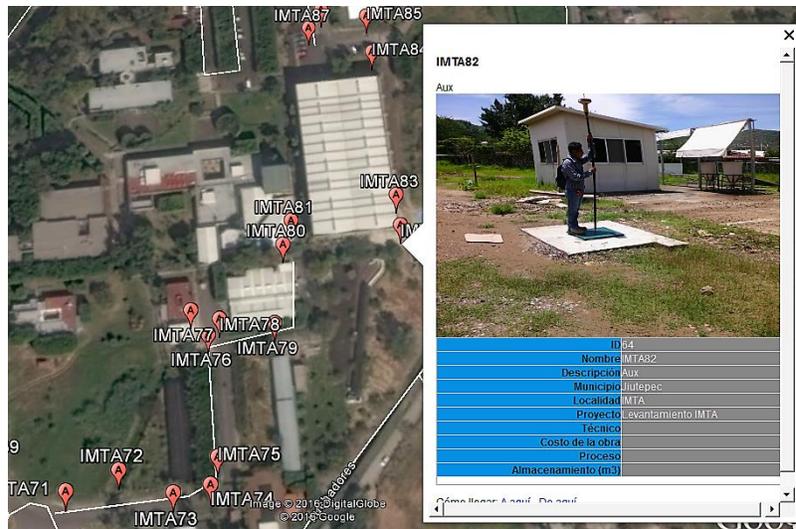


Figura 3.8. Identificación y reseña de un punto de control

3.2.7. Planeación y adquisición de imágenes con VANTs

Antes de realizar el vuelo con VANTs se debe realizar una planeación para controlar todas las variables involucradas en este y así capturar la información necesaria.

Los puntos de partida para la planeación de un vuelo fotogramétrico son el objetivo del estudio y las características del producto deseado. Los datos del problema son la resolución espacial a obtener, características y dimensiones del área de estudio y las exigencias de precisión altimétrica y planimetría. Las planeación del vuelo se realizan con software especializado (UgCS, Mission Planner, etc.) donde se programa una ruta de vuelo que se ejecutará de forma autónoma.

A continuación se establecen las condicionantes o factores a considerar para elaborar un plan de vuelo mediante VANTs.

a) Calibración de cámara

La calibración de la cámara es un proceso que se realiza para conocer con exactitud las características métricas de la cámara, se obtienen valores como: parámetros internos (distancia focal calibrada, puntos principales y función de distorsión), poder separador del objeto, planeidad del plano focal. Es recomendable efectuar el cálculo de los parámetros internos antes de usar la cámara o después de un determinado uso (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003)(Buil & Núñez, 2003).

b) Altura de vuelo

La altura del vuelo está en función de la resolución que se pretenda obtener en los productos finales y de la orografía del terreno. La altura de vuelo está en función de la resolución deseada en la imagen, con la Ecuación 1 y 2 se obtiene la altura de vuelo, se elige el valor más pequeño que resulta de ambas, (SPH Ingeniería, 2016).

$$H = \frac{f * GSD * RH}{A} \quad (1)$$

$$H = \frac{f * GSD * RV}{B} \quad (2)$$

Dónde: H= altura de vuelo, m; GSD= Resolución esperada en la imagen, m; RH=Resolución horizontal del sensor, px; RV=Resolución vertical del sensor, px; A= Ancho del sensor, mm; B=Altura del sensor, mm.

c) Recubrimientos o traslapes

El traslape entre imágenes tiene por finalidad poder aplicar el principio en la visión estereoscópica de las imágenes aéreas. En vuelos fotogramétricos convencionales es necesario un traslape frontal de 55 a 60 % para que exista recubrimiento estereoscópico y un traslape lateral de 15 a 25 % (Alcántara, 1999), pero en vuelos con VANTs Eisenbeiss *et al.*, (2005) indican que es necesario tener por lo menos un traslape frontal y lateral del 70 %, que permita hacer coincidir los puntos clave en múltiples imágenes y con ello aumentar la precisión y fiabilidad de los resultados.

d) Tiempo

El traslape frontal entre las imágenes indica el intervalo de tiempo (Ecuación 3) o distancia (Ecuación 4) en que se deben adquirir las imágenes; el traslape lateral indica la distancia entre cada línea de vuelo (Ecuación 5). El tiempo total de vuelo depende de la longitud total del recorrido y de la velocidad en que se estaría desplazando el VANT.

$$T = \frac{An(1 - TF)}{V} \quad (3)$$

$$D = An(1 - TF) \quad (4)$$

$$DL = La(1 - TL) \quad (5)$$

Dónde: T=intervalo de tiempo entre cada imágenes (s), D=Intervalo de distancia entre imágenes (m), DL= distancia entre cada línea de vuelo (m), An= Ancho que cubre una imagen sobre la superficie (m), La= Largo que cubre una imagen en la superficie (m), TF y TL es el traslape frontal y lateral, respectivamente en decimal.

e) Orientación del vuelo

La orientación de las líneas de vuelo se determina en función del tamaño y la forma del área a volar, se busca menos líneas de vuelo y mayor eficiencia en el control de su orientación ya que ello definirá el tiempo total del vuelo y por tanto el número de baterías a usar para sobrevolar todo el área.

Si el área es rectangular, lo más conveniente es que la dirección del vuelo sea paralela al lado mayor del rectángulo. Si el área a es demasiado accidentada, la orientación de las líneas de vuelo debe buscar el mayor paralelismo posible con las líneas topográficas, a fin de lograr el mínimo de cambios de altura de vuelo con respecto al terreno.

f) Software

Los softwares más usados para la planificación de vuelos fotogramétricos con VANTs son: UgCs (Figura 3.9), Mission Planner, APM Planner, eMotion.

El UgCS es un Software de control de tierra completamente funcional para las necesidades de planificación y control de misiones, permite la importación de archivos KML para personalizar el mapa y soporte del receptor ADS-B para garantizar la seguridad del vuelo (SPH Ingeniería, 2016). Cuenta con las herramientas de planificación de reconocimiento aéreo, trayectos más largos con el cambio de batería, perfil de elevación, telemetría, control manual y automático del VANT y un emulador de vuelo.

Compatible con diversas plataformas entre los que se encuentran: 3DR APM, DJI Ace One, DJI Phantom 3, Microdrone, 3DR Pixhawk, DJI Inspire 1, DJI WooKong-M, Micropilot, AR.Drone, DJI Naza-M V2, MikroKopter, DJI A2, DJI Phantom 2 Vision+, Kestrel. (UgCS, 2017).



Figura 3.9. Misión de vuelo con UgCS

3.2.8. Restitución fotogramétrica de imágenes

La restitución es el proceso mediante el cual se presentan los datos y/o elementos del paisaje capturados mediante la fotogrametría, y consiste en dibujar la planimetría y altimetría por trasferencia óptico-mecánica o digital, a partir de la aerotriangulación de imágenes. La restitución fotogramétrica de imágenes permite la creación de modelos digitales de terreno (MDT) y Ortomosaicos, usando imágenes de VANTs se pueden obtener resoluciones muy altas en un nivel de centímetros (D'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012).

Los softwares más comerciales para realizar la restitución fotogramétrica de imágenes adquiridas desde VANTs son: Agisoft PhotoScan, Pix4Dmapper, Photomodeler, PIXUAV, VISUAL SFM, EnsoMOSAIC, Autodesk ReCap.

a) Agisoft PhotoScan

Es un programa comercial ruso desarrollado por la compañía Agisoft LLC, la cual fue fundada en 2006. Este programa actúa de manera automatizada, no necesita herramientas u otros

programas adicionales para operar, ni tampoco se requiere conexión a internet (Ramírez *et al.*, 2015).

Es un avanzado sistema de modelado en 3D basada en imágenes fijas, puede operar con imágenes arbitrarias y es controlable en todos los procesos para crear el modelo digital de superficie y el Ortomosaico. (Agisoft, 2016).

El procesamiento de las imágenes y la reconstrucción del modelo en 3D se componen de cuatro etapas principales (Agisoft, 2016):

i) Alineación de las imágenes: se buscan puntos comunes en las imágenes y las ubicaciones de las imágenes, como resultado de ello se genera una nube de puntos dispersa.

ii) Construcción de nube densa: se basa en la estimación de la posición de las imágenes y se representa en una nube de puntos, dicha nube de puntos puede ser clasificado o editado.

iii) Mallado: se realiza mediante la nube de puntos dispersa o densa, existen dos algoritmos validos que pueden ser aplicados en la generación de la malla: Height field (para superficie planas) y Arbitrario (para cualquier tipo de objeto).

iv) Generación del ortomosaico: Después de la geometría se puede texturizar y luego generar el modelo digital de elevación y el Ortomosaico.

El software PhotoScan tiene una gran velocidad de cálculo, y corrige automáticamente los errores de las deformaciones fotográficas y distorsiones del objetivo. Tiene la ventaja de que la cámara fotográfica no necesita una calibración previa, por lo que brinda la posibilidad de usar cualquier cámara (Peinado, Fernández, & Agustín, 2014).

b) Pix4D mapper:

El software Pix4D Pro Mapper es una herramienta de origen suizo desarrollada por Christoph Strecha, investigador en el campo de la fotogrametría digital orientada a VANTs. Se encuentra en el mercado desde el año 2011. Dicho software es capaz de combinar todo tipo de imágenes aéreas y terrestres para la obtención final de productos 2D y 3D.

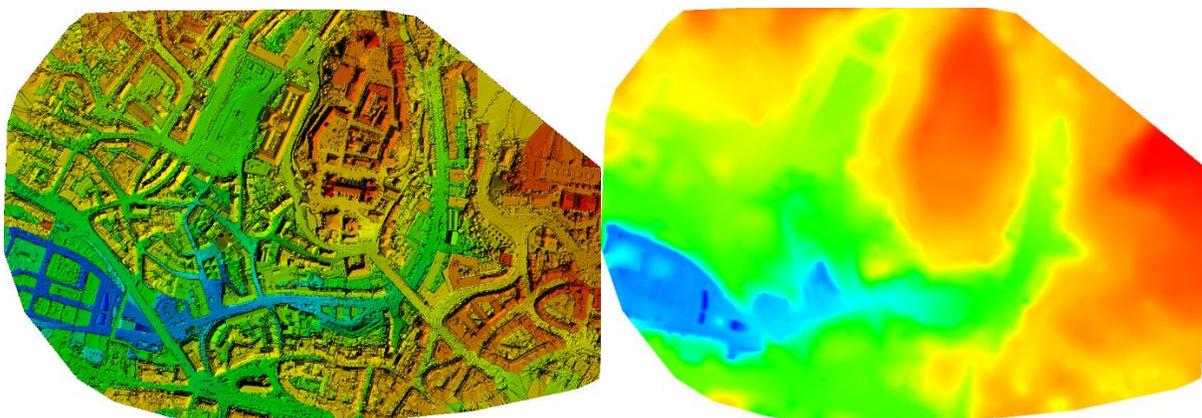


Figura 3.10. MDS y MDT del centro de la ciudad de Lausana, Suiza (Pix4D, 2017).

El software permite también la generación de nubes de puntos 3D, así como la producción de modelos digitales de superficie y de elevaciones (Figura 3.10) a partir de los cuales es capaz de generar ortomosaicos. Es capaz de tratar imágenes de vario tipos, ya sean RGB, NIR tanto multiespectrales como hiperspectrales. Posee un amplio abanico de posibilidades para la producción de productos orientado a la agricultura de precisión, los cuales no han sido objeto de estudio.

El procesamiento de las imágenes y la reconstrucción del modelo en 3D se componen de tres etapas principales (Pix4D, 2017) los cuales se realizan automáticamente, únicamente se definen algunos parámetros:

i) Procesamiento inicial: Antes de este paso se deben cargar las imágenes a procesar y las coordenadas de los puntos de apoyo. En este paso se seleccionan las opciones de procesamiento, como la calidad esperada, configuración del número de puntos clave extraídos, selección de la optimización de los puntos internos y externos de la cámara, etc. Como resultado de este paso se orientan las imágenes y se genera una nube de puntos discreta.

ii) Nube de puntos y mallado: se definen la densidad de la nube de puntos, el tipo de textura y el formato de exportación. Como producto se genera la una nube de puntos densa y una triangulación entre los puntos que representan el mallado.

ii) Modelos digitales de superficie y Ortomosaico: Se generan los modelos digitales de superficie y el Ortomosaicos con base al mallado de la nube de puntos densa, el ortomosaicos puede ser modificado manualmente.

3.2.9. Modelos digitales de elevación (MDE)

Un modelo digital de elevación (MDE) se define como una estructura numérica de datos tridimensionales que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno.

Cuadro 2. Ejemplos de métodos de captura de datos para la construcción del MDE (Felicísimo, 1994).

	Altimetría	Altímetros transportados por plataformas aéreas
Directos	GPS	<i>GPS Global positioning system</i> , sistema de localización mediante satélites
	Topografía	Mediante estaciones topográficas con salida digital
Indirectos	Restitución	Origen digital: imágenes digitales captadas por satélites (p. ej. SPOT) con diferentes ángulos de visión, Imágenes digitales captadas desde avionetas convencionales o VANTs
	Digitalización	Origen analógico: pares fotográficos convencionales (pancromático, color, infrarrojo). Digitalización Manual: mediante tableros digitalizadores Automática: mediante <i>scanners</i>

Los MDE son empleados en aplicaciones como la ingeniería civil, las ciencias de la Tierra, la gestión y planificación de recursos, la topografía y fotogrametría y, finalmente, las aplicaciones militares. Alguno de sus usos son: estimaciones de volúmenes a remover o rellenar en trabajos de ingeniería, cartografía topográfica, mapeo y estudios batimétricos e hidrológicos, mapeo geológico y geofísico, simulación y análisis del paisaje, estimar área a inundar en proyectos hidroeléctricos, estudios de intervisibilidad para definir ubicación de antenas para telecomunicaciones, análisis estadístico del terreno, determinación de pendiente, aspecto y sombreado del terreno, visualización en 3D (Fallas, 2007).

La generación de un MDE consta fundamentalmente de dos partes: a) adquisición de información sobre la superficie real (Cuadro 2) y b) la interpolación a partir de las cotas para asignar valores a cada celda de la matriz regular.

La adquisición de datos al fin y al cabo será una nube de puntos con coordenadas tridimensionales (x, y, z), que informen de la altitud del terreno, (Morillo *et al.*, 2002). La fase de adquisición de la información es la más costosa (en términos de tiempo y trabajo (Felicísimo, 1994).

La fase de interpolación tiene como objetivo estimar, a partir de una muestra, valores de Z para un set de puntos (X, Y), cada técnica de interpolación, en función del algoritmo y los parámetros de decisión que maneja, genera una réplica que intenta aproximarse a la realidad. La interpolación puede utilizarse para cumplir tres funciones: (a) estimar valores de Z para ubicaciones particulares (X, Y); (b) estimar valores de Z para una cuadrícula rectangular; (c) cambiar la resolución de la cuadrícula en un archivo raster (método conocido como remuestreo) (Fallas, 2007).

En la actualidad los modelos constituyen un medio para lograr la representación del relieve muy versátil y funcional ya que a partir del mismo se puede conocer la conformación o morfología del terreno (MDT) sino también los elementos de origen antrópico y la vegetación presente en el mismo (MDS) (INEGI, 2017). Los Modelo digital de superficie (MDS) (Figura 3.11) representan todos los elementos existentes o presentes en la superficie de la tierra (vegetación, edificaciones, infraestructura y el terreno propiamente), mientras que los modelos digital del terreno (MDT) (Figura 3.12) recrean 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 (INEGI, 2017). Al existir dos tipos, superficie y terreno, a través de los MDE es posible conocer la existencia, disposición, forma y posición de los elementos que conforman un espacio geográfico y que pueden ser de origen natural o antrópico.

Ambos tipos de modelos digitales de elevación se realizan utilizando una variedad de fuentes de datos y mediante el uso de técnicas especializadas o métodos de obtención, así como el empleo de soluciones tecnológicas y cuya elección depende de la aplicación que se le va a dar

al modelo resultante, además del objetivo que se pretende alcanzar y de la precisión que se requiere del modelo (INEGI, 2017).

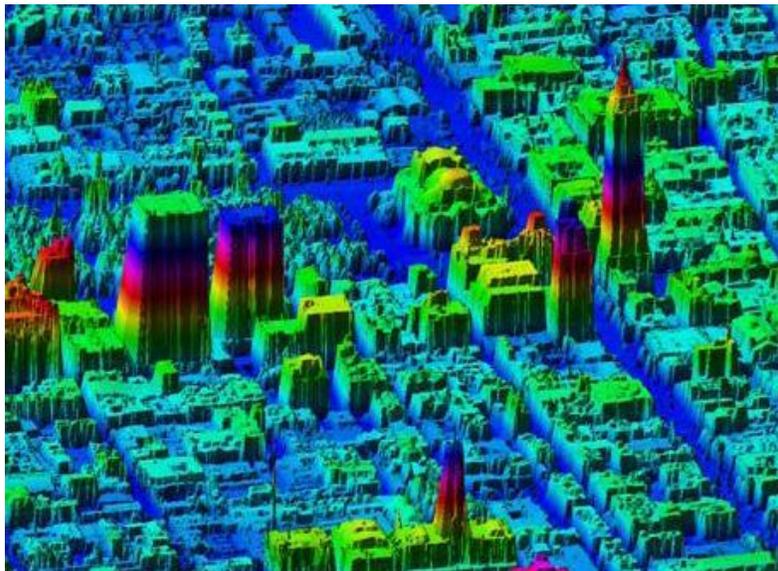


Figura 3.11. Modelo Digital de Superficie de la ciudad de México obtenido con LiDAR (INEGI, 2017).

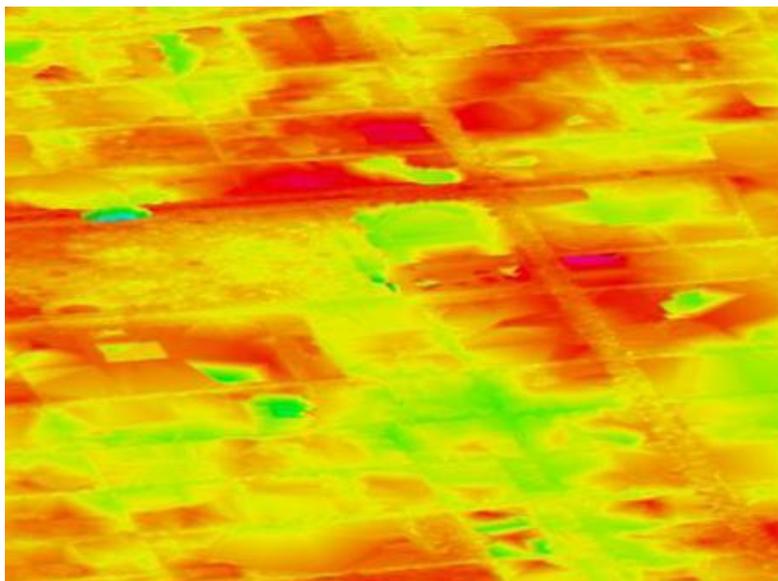


Figura 3.12. Modelo Digital de Terreno de la ciudad de México obtenido con LiDAR (INEGI, 2017).

La precisión del modelo digital generado se puede considerar dependiente de una serie de parámetros implicados en su generación, que van desde las características orográficas de la zona, los datos fuente y el método de procesamiento (Morillo *et al.*, 2002). La importancia de analizar la precisión de los MDE surge ante la evidencia de que son el punto de partida para generar otros productos cartográficos o para realizar análisis en los Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Se han propuesto varios procedimientos para el control de la precisión de un MDE. Suele realizarse un *análisis visual* para detectar, si existieran errores muy evidentes. También existe la posibilidad de emplear técnicas de *superposición* de curvas de nivel sobre el modelo estereoscópico. Otros procedimientos automáticos son las *validaciones cruzadas*, basadas en la comparación de cada uno de los valores con respecto a los valores vecinos. Los análisis de pendientes y los análisis discriminantes también emplean las relaciones de vecindad pero incluyen valores umbrales, pendientes o estadísticos respectivamente. Y finalmente tenemos los análisis estadísticos basados en realización de pruebas o test de control como los empleados en cartografía; el NMAP (National Map Accuracy Standard) y el EMAS (Engineering Map Accuracy Standard) son las pruebas más empleadas, los cuales se basan en la comparación con puntos de control con coordenadas fiables (Cuartero, Felicísimo, & Ariza, 2001).

En el análisis estadístico, los parámetros más empleados para analizar el error en la generación de un MDE son generalmente: el error medio (EM), la desviación típica o desviación estándar del error (SDE), el error medio cuadrático o cuadrado medio del error (RMSE) y el error máximo absoluto (E_{max}) (Cuartero, Felicísimo, & Ariza, 2001).

El parámetros EM (Ecuación 6) es una medida de la precisión de los datos que indica cualquier error sistemático positivo o negativo, RMSE (Ecuación 7) es una medida de dispersión de la distribución de frecuencias de los residuales que es sensible a grandes errores, SDE (Ecuación 8) proporciona información sobre la precisión y distribución de los residuos alrededor de la media, y el máximo error (Ecuación 9) absoluto describe el mayor residual presente para la comprensión de los límites de la calidad de los datos.

$$ME = \frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})}{n} \quad (6)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (C_{cal} - C_{obs})^2}{n}} \quad (7)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_i^n ((C_{cal} - C_{obs}) - ME)^2}{n - 1}} \quad (8)$$

$$E_{max} = \max |C_{cal} - C_{obs}| \quad (9)$$

Dónde: C_{cal} = Coordenadas x, y, z extraídas del MDT en los puntos de verificación, C_{obs} = Coordenadas de los puntos de verificación medidas con el GPS RTK, n= número de puntos de verificación.

Todos estos parámetros estadísticos del error que definen la precisión del modelo, lo hacen bajo una serie de condiciones que definen los parámetros que intervienen en ese cálculo. Es razonable indicar que el número de puntos de control, la calidad de los mismos (en principio libres de error), y la distribución de estos, proporcionan un nivel de seguridad en la estimación de la precisión del error, (Morillo *et al.*, 2002).

3.2.10. Ortomosaico

Un Ortomosaico es una imagen proveniente de fotografías aéreas a las cuales se les ha corregido de los efectos producidos por las irregularidades y pendientes de la superficie del terreno, y por la inclinación de la cámara que ha tomado la imagen respecto al plano de referencia. Una ortofotografía es una imagen transformada de perspectiva central a ortogonal (Hernández, 2006).

El ortomosaico constituye una imagen métrica del área de la superficie terrestre que se desea representan (Figura 3.13), requiere de procesos (apoyo terrestre, calculo, aerotriangulación, rectificación de imagen) y especificaciones, para ser llevada métricamente a un plano y posteriormente ser fotointerpretada (Urrejola, 2015).



Figura 3.13. Ortomosaico de un canal del DR075 generado con información de un VANT

En la generación del ortomosaico, las imágenes individuales son rectificadas a partir del modelo de elevaciones, eliminando la distorsión asociada al relieve. Este proceso consiste en proyectar cada pixel de la imagen sobre el modelo de elevación para determinar el valor de altura, este valor es empleado para re proyectar sobre la imagen la nueva posición del pixel. La proyección y re proyección de los pixeles de la imagen se realiza con las ecuaciones de colinealidad. Por último, todas las imágenes rectificadas son unidas formando un mosaico (Escalante, Cáceres, & Porras, 2016).

3.3. SEGMENTACIÓN DE IMÁGENES

El primer paso en cualquier proceso de análisis de una imagen es la segmentación. Mediante la segmentación se divide la imagen en las partes u objetos que la forman. El nivel con el que se realiza esta subdivisión depende de la aplicación en particular. En la mayor parte de los casos, una buena segmentación producirá a una solución correcta. Los atributos básicos de segmentación de una imagen son: la luminancia en imágenes monocromáticas, los componentes de color en imágenes en color, textura, forma, etc. A lo largo de las últimas décadas se han desarrollado diversas técnicas de segmentación, las que se pueden agrupar en tres grandes tipos: técnicas orientadas al pixel, a los bordes y a las regiones (Serna & Román, 2009). Los algoritmos

de segmentación de imagen generalmente se basan en dos propiedades básicas de los niveles de gris de la imagen: discontinuidad y similitud (Martín, 2004).

3.3.1. Detección de discontinuidades

Dentro de esta categoría se intenta clasificar la imagen basándonos en los cambios bruscos en el nivel de gris. Las áreas de interés en esta categoría son la detección de puntos, de líneas y de bordes en la imagen. El método más común de buscar discontinuidades es la correlación de la imagen con una máscara (Martín, 2004).

Un *punto aislado* de una imagen tiene un tono de gris que difiere significativamente de los tonos de gris de sus píxeles vecinos, es decir, de los ocho píxeles de su entorno 3-3. Una máscara para detectar un punto aislado es la siguiente

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

Diremos que el píxel (i, j) es un punto aislado si:

$$|R(i, j)| \geq T \quad (10)$$

Donde T es el valor umbral fijado por el decisor. Dicho valor depende de la aplicación que estemos realizando.

En el caso de detección de líneas se consideran cuatro máscaras. Si pasamos la primera de las máscaras a lo largo de la imagen, tendrá mayor respuesta para líneas de ancho un pixel orientadas horizontalmente. Siempre que el fondo sea uniforme, la respuesta será máxima cuando la línea pase a lo largo de la segunda fila de la máscara. La segunda máscara responderá mejor a líneas orientadas a 45° ; la tercera máscara a líneas verticales; y la última a líneas orientadas a -45° . Estas direcciones se pueden establecer observando que para la dirección de interés las máscaras presentan valores mayores que para otras posibles direcciones.

$$\begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}$$

Diremos que el píxel está asociado a la dirección correspondiente a la máscara i si:

$$|R_i| \geq T_j \quad i \neq j \quad (11)$$

Donde T_j es el valor umbra de la máscara i .

Los métodos basados en detección de bordes permiten encontrar los bordes en una imagen, los cuales en realidad determinan los límites de cada segmento en la imagen y así poder identificar un objeto (Alfaro & Sipirán, 2012). El algoritmo de Canny está considerado como uno de los mejores métodos de detección de contornos mediante el empleo de máscaras de convolución y

basado en la primera derivada. Los puntos de contorno son como zonas de píxel en las que existe un cambio brusco de nivel de gris (Valverde, 2007).

El algoritmo de Canny se basaba en tres criterios: i) un criterio de detección expresa el hecho de evitar la eliminación de bordes importantes y no suministrar falsos bordes; ii) el criterio de localización establece que la distancia entre la posición real y la localizada del borde se debe minimizar y iii) el criterio de una respuesta que integra las respuestas múltiples correspondientes a un único borde.

El algoritmo de Canny (Canny, 1986) consiste en tres pasos, en el primero se calcula la magnitud y orientación del vector gradiente en cada píxel; en el segundo paso con la supresión no máxima se logran el adelgazamiento del ancho de los bordes obtenidos con el gradiente, hasta lograr bordes de un píxel de ancho, en el tercer paso se aplica una función de histéresis basada en dos umbrales; con este proceso se pretende reducir la posibilidad de aparición de contornos falsos; sin embargo es muy sensible al ruido por tanto antes del primera paso se debe suavizar la imagen con un filtro.

3.3.2. Detección de similitudes

Las áreas dentro de la esta categoría están basadas en las técnicas de umbrales, crecimiento de regiones, y técnicas de división y fusión de regiones.

Los métodos basados en umbrales, se caracterizan por trabajar con umbrales para segmentar la imagen. Los umbrales actúan como separadores que permitirán decidir qué conjunto de tonos de gris pertenece a una determinada región. Estas técnicas son aplicadas sobre una imagen completa, y también pueden combinarse con otras durante el pre-procesamiento o post-procesamiento de la imagen, de manera que se obtengan mejores resultados (Alfaro & Sipirán, 2012).

Existen distintos algoritmos para segmentar la imagen en base a umbrales, usando el histograma se usa el valor medio de la imagen como valor umbral; con el algoritmo iterativo **ISODATA** (*Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm*) (Ball & Hall, 1965) se propone un valor umbral (t_0), se calcula la media de los niveles de grises (u_1 y u_2) que se encuentra a la izquierda y derecha de t_0 , y se vuelve a calcular $t_0 = (u_1 + u_2)/2$ hasta que dos t_0 consecutivos tengan una diferencia establecida; con el algoritmo de **porcentaje de píxeles negro** dado un histograma y un porcentaje de píxeles negros deseados, se determina el número de píxeles negros multiplicando el porcentaje por el número total de píxeles, el umbral será el nivel de gris del histograma en el que la cuenta llegue al número de píxeles negros deseados; con algoritmo de **dos picos** si el histograma muestra al menos dos picos, el valor umbral más apropiado suele ser (según se ve en la práctica) el menor valor entre esos dos picos del histograma; el de umbralización adaptativa subdivide la imagen y se encuentra un valor apropiado para cada subdivisión; el **de Otsu** (Otsu, 1979) utiliza técnicas estadísticas, para

encontrar el umbral, en concreto, se utiliza la varianza, que es una medida de la dispersión de valores (en este caso se trata de la dispersión de los niveles de gris).

Los métodos basados en Crecimiento de Regiones intentan segmentar una imagen partiendo desde el centro de un objeto y creciendo hacia el exterior del mismo hasta encontrar los bordes que lo limitan, esto proceso es repetitivo para cada objeto dentro de la imagen (Alfaro & Sipirán, 2012).

3.4. CLASIFICACIÓN DIGITAL DE IMÁGENES

La clasificación digital de imágenes es el proceso por el que se asigna un píxel de una imagen multi-espectral a una categoría, generalmente sobre la base de similitudes entre los valores numéricos que las definen (Chuvienco, 1995).

Los pasos principales en la clasificación de imágenes incluyen la selección de un método de clasificación adecuado, selección de muestras de aprendizaje, pre-procesado de la imagen, extracción de características, post-procesado de la clasificación y evaluación de la precisión obtenida.

Tradicionalmente, los métodos de clasificación de imágenes se han dividido en dos categorías: métodos supervisados y métodos no supervisados; según la intervención del usuario en la selección de muestras de entrenamiento necesarias para obtener las características estadísticas descriptivas de cada clase. En la clasificación supervisada se requiere un cierto conocimiento de la zona de estudio que permite delimitar sobre la imagen unas zonas o áreas representativas de las distintas categorías que se pretenden discriminar; y en la clasificación no supervisada no se requiere ningún conocimiento previo del área de estudio por lo que la intervención humana se centra en la interpretación de los resultados. (Yébenes & Giner, 2010).

Los métodos de clasificación también pueden agruparse según otros criterios, así por ejemplo, existen clasificadores paramétricos o no paramétricos, clasificadores duros o blandos y clasificadores por píxel, sub-píxel o por parcela u objeto (Lu & Weng, 2007).

3.4.1. Clasificadores por píxel

La clasificación digital de imágenes basada en píxel es en cierta medida, parecida a la fotointerpretación, consiste en categorizar una imagen multibanda. Se pasa de tener unos valores de brillo (ND) continuos medidos por los sensores a una escala nominal o categórica de manera que cada píxel pertenece a una categoría definida previamente. El ND de un píxel clasificado es, en definitiva, el identificador de la clase o categoría en la que se haya incluido, (Yébenes & Giner, 2010).

Estos métodos son adecuados para extraer información de cobertura del suelo o de parcelas agrícolas a partir de imágenes de satélite con resolución espacial gruesa, especialmente con el método de clasificación supervisada de máxima probabilidad, produce buenos resultados en las

cubiertas espectralmente homogéneas, pero proporciona resultados menos satisfactorios en las cubiertas heterogéneas. Sus principales inconvenientes son que no considera la información espacial de la imagen (Blaschke & Strobl, 2001) y la existencia de píxeles mixtos, o de borde, que representan mezclas de dos o más tipos de coberturas (Recio, 2009). Además, presentan ciertas limitaciones, como su reducida capacidad para extraer objetos de interés. Éstas resultan especialmente problemáticas al aplicarse en imágenes de moderada o alta resolución.

La aparición de las imágenes de alta resolución que se ha producido en los últimos años auguraba un aumento en la precisión de los resultados obtenidos en la realización de cartografía. Sin embargo, en muchas ocasiones los resultados no han sido tan fiables como se podría esperar, ya que el grado de detalle que proporcionan estas imágenes requiere un tratamiento distinto al empleado en las imágenes de media o baja resolución en las cuales los datos estaban suavizados por las propias características del sensor (Recio, 2009).

3.4.2. Clasificadores orientados a objetos

Una alternativa a los clasificadores basados en píxel, son los clasificadores orientados a objeto (*Object Based Image Analysis*, OBIA) los cuales permiten emplear no sólo la información espectral de las bandas de entradas sino también información contextual y pasan por un proceso previo de segmentación de la imagen. De esta forma se permite el trabajo con la imagen a nivel de objeto, lo cual amplía notablemente la cantidad de información que se puede extraer de la misma (Perea, Meroño, & Aguilera, 2009).

El análisis de imágenes basado en objetos tiene dos etapas fundamentales: la segmentación de la banda o bandas de entrada, y la posterior clasificación de los segmentos previamente definidos (Figura 3.14). La segmentación es la subdivisión de una imagen en regiones más pequeñas representadas por objetos. (González, Quintano, & Edemir, 2009). Los algoritmos de segmentación más utilizados son: de clasificación no supervisada, basados en la identificación de bordes y basados en el crecimiento de regiones (Cánovas-García, Alonso-Sarría, & Gomariz-Castillo, 2013).

Entre estos últimos destaca el algoritmo de *multiresolution segmentation*, mediante el cual los segmentos son creados en base a tres criterios: escala, color y forma (suavidad y compactibilidad) (González, Quintano, & Edemir, 2009). De todos los parámetros que controlan el comportamiento de este algoritmo, el conocido como parámetro de escala es el más importante, el cual controla el tamaño de los objetos, ya que funciona como umbral a la hora de permitir o no la fusión de dos objetos contiguos. Parámetros de escala bajos suelen producir objetos muy pequeños y con escasa variabilidad espectral; por el contrario, parámetros de escala altos producen objetos de mayor tamaño en los que la variabilidad espectral de los píxeles que los forman es mucho mayor. Lo habitual en OBIA es buscar mediante el método ensayo-error un parámetro de escala que ofrezca resultados aceptables para toda la escena (Cánovas-García, Alonso-Sarría, & Gomariz-Castillo, 2013).

Los segmentos de la red estructural a diferentes niveles de escala constituyen las unidades básicas del procesamiento de un análisis orientado a objetos; cada segmento posee atributos *intrínsecos* que definen características inherentes al objeto como su área y forma; atributos *semánticos*, que describen relaciones contextuales a otros objetos; y atributos *topológicos*, que describen relaciones geométricas y de ubicación del objeto con respecto a los demás objetos dentro de la red. Es a partir de este conjunto de atributos que se formulan las características de las clases temáticas de interés y que permiten llevar a cabo la clasificación de objetos (Ardila, Espejo, & Herrera, 2005).

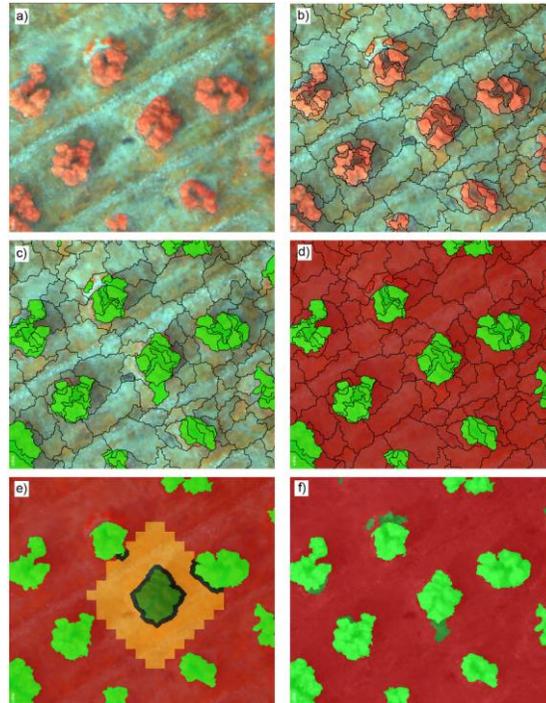


Figura 3.14. Segmentación y clasificación de una porción de una parcela agrícola cultivada, dividida en: Cultivo (verde claro), vegetación herbácea (verde oscuro) y suelo desnudo (Rojo) (Torres-Sánchez *et al.*, 2015).

La clasificación es un proceso en el que se busca uno o más atributos que permitan discriminar objetos que presentan un determinado comportamiento, no solo espectral sino también de tipo espacial o relacional con otros objetos o clases de imagen. Los objetos son asignados finalmente a las clases de interés de acuerdo a la evaluación de las reglas o restricciones basadas en atributos que se generan para cada clase de acuerdo a una lógica difusa o binaria (Bock & Lessing, 2000).

Esta técnica de clasificación ha sido empleada en distintas disciplinas y para diferentes aplicaciones de manera exitosa y brindando resultados satisfactorios, como por ejemplo: monitoreo de cultivos (Torres-Sánchez *et al.*, 2015), (Figura 3.14); cartografía de áreas afectadas por incendio (González, Quintano, & Edemir, 2009); discriminación de uso del suelo

(Perea, Meroño, & Aguilera, 2009); mapeo de zonas geomorfológicas y ecológicas en los arrecifes de coral (Phinn, Roelfsema, & Mumby, 2012), etc.

3.5. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS

La topografía es una ciencia aplicada que consiste en describir y representar gráficamente la superficie o el relieve de un terreno (geodesia) a través de mapas o planos (cartografía), lo que permite analizar la información geoespacial.

La topografía tiene aplicaciones en diversas disciplinas; en la ingeniería agrícola, tanto en levantamientos como trazos, deslindes, divisiones de tierra (agrodesia), determinaciones de área (agrimensura), nivelación de terrenos, construcción de bordos, canales y drenes. En la ingeniería eléctrica: levantamientos previos y trazos de líneas de transmisión, construcción de plantas hidroeléctricas, instalación de equipos, para plantas nucleoeeléctricas, etc. En la ingeniería mecánica e industrial: para la instalación precisas de máquinas y equipos industriales, configuración de piezas metálicas de gran precisión, etc. En la ingeniera minera: para el levantamiento y trazo de túneles, galerías y lumbreras, cuantificación de volúmenes extraídos, etc. En la ingeniería geológica: en la relación de las formaciones geológicas, determinación de configuraciones de cuencas hidrológicas, como apoyo fundamental de la fotogeología, etc. En la ingeniería civil: en los trabajos topográficos antes, durante y después de la construcción de obras, como carreteras, ferrocarriles, edificios, puentes, canales, presas, fraccionamientos, servicios municipales, etc. (Alcántara, 2014).

Existen otras ramas de aplicación, como la ingeniería hidráulica, forestal, ambiental o la arquitectura, pero la topografía, realizada ya sea por medición directa, por calculo o por restitución fotogramétrica, la representación gráfica del terreno constituye el punto de partida de diversos proyectos que requieren información de la posición, dimensiones, forma del terreno, etc., sobre el cual se va a realizar cualquier obra o un estudio determinado

Las actividades principales de la topografía se realizan en el campo y en gabinete; en campo se efectúan las mediciones y recopilación de datos, y en gabinete el postproceso de la información adquirida y su representación gráfica en un plano. A estas operaciones se les denomina levantamientos topográficos (Alcántara, 2014).

Un levantamiento topográfico consiste en realizar una serie de actividades en campo con el objeto de medir, calcular y dibujar la superficie terrestre para determinar la posición de los puntos que conforman una extensión de tierra (Torres & Villate, 2001). Este posicionamiento puede obtenerse directamente o mediante un proceso de cálculo, con las cuales se obtiene la representación gráfica del terreno levantado (Pachas, 2009).

Los métodos tradicionales para “levantar” una superficie de terreno se basan principalmente en el uso de estaciones totales, niveles, teodolitos, etc. y usualmente se acompañan con un instrumento receptor GPS para determinar una posición exacta y poder referenciar la información. Con la aparición de herramientas de gran precisión como los sensores LiDAR y el escáner laser terrestre, se han agilizado los procesos de recogida de datos en campo, maximizando la información proporcionada por estos y obteniendo resultados que aportan una representación cada vez más fiel del objeto o superficie (Mañana-Borrazás, Rodríguez & Blanco-Rotea, 2008).

En la actualidad, con el desarrollo de nuevas tecnologías como los sensores remotos montados en satélites, aviones y VANTs, y de las técnicas de procesamiento de información como la fotogrametría que ha mejorado en la última década en términos de rapidez y precisión. Se obtienen estudios topográficos en menos tiempo y de mayor calidad; sin embargo, cada vez se requieren equipos y softwares computacionales más sofisticados para el procesamiento de la información en gabinete.

La necesidad de obtener la topografía de la superficie terrestre ha existido siempre. Evidentemente, en cada época se han empleado distintas metodologías y tecnologías. Aun cuando las nuevas tecnologías han impactado en el cómo se capturan y se procesan los datos, el conjunto de las actividades que contempla el levantamiento topográfico puede discriminarse en las mismas etapas que la topografía clásica tradicionalmente ha considerado, entre las que se puede mencionar la selección de equipos, planificación, señalización y captura de datos y procesamiento de la información (Pachas, 2009).

3.5.1. Métodos convencionales

a) Sistema de posicionamiento global (GPS)

El GPS es un sistema de localización, tiene por objetivo calcular la posición de un punto cualquiera en un espacio 3D con coordenadas (x,y,z), diseñado con fines militares para proporcionar estimaciones precisas de posición, velocidad y tiempo (Pozo-Ruz *et al.*, 2000). Un beneficio colateral del Sistema ha sido su aplicación en el área civil; incluyendo recreación, control vehicular, navegación aérea y marítima y levantamientos topográficos. Aplicaciones más sofisticadas incluyen el monitoreo del movimiento de las placas de la corteza terrestre en áreas de alta sismicidad y la agricultura de precisión (Fallas, 2002).

Actualmente se conocen las constelaciones NAVSTAR (Americano) y GLONASS (GLOBAL Navigation Satellite Systems, Ruso), en conjunto suman 24 satélites que circulan la tierra y envían señales de radio a la superficie.

El GPS está conformado por tres componentes o segmentos: el espacial (*satélites*), el de control (*estaciones terrestres*) y el usuario (*receptores*) (Bennett, 1990). Las 5 estaciones de tierra están distribuidas a distancias similares alrededor del ecuador (Isla Ascensión, Diego García, Kwajalainy, Hawaii y Colorado Springs) y tienen como fin monitorear el estado de los satélites

(altitud, estado de los relojes atómicos), realizar pequeños ajustes en sus órbitas y calcular las efemérides (posición) de los satélites. Esta información es transmitida a los satélites, los cuales a su vez la retransmiten a los receptores en tierra al menos una vez al día. El tercer componente es el usuario quien recibe las señales enviadas por los satélites mediante el uso de un receptor equipado con una antena (Figura 3.15), el segmento usuario es quizá la parte que más interesa puesto que del tipo de instrumental y métodos utilizados depende la precisión alcanzada. (Fallas, 2002).



Figura 3.15. Receptor GPS RTK

Algunas de los campos civiles donde se utilizan los sistemas GPS son: en geología, para estudiar el movimiento de las placas tectónicas, para la predicción de terremotos; en topografía, para realizar levantamiento de terrenos, delimitación parcelaria; en ingeniería civil, para el monitoreo de deformaciones estructuras sometidas a cargas; otras aplicaciones se basan en localización y navegación; sistemas de alarma automática, sistemas de aviación civil (Pozo-Ruz *et al.*, 2000).

Las principales desventajas de los GPS aplicados a la topografía son: que las radioseñales emitidas por los satélites no pueden penetrar una vegetación densa, rocas, edificación o accidentes geográficos (Letham, 2001); el costo de un receptor GPS depende de su calidad y precisión, entre más preciso es un receptor GPS el costo de adquisición se eleva; con la tecnología GPS es posible capturar la información en tiempo real, pero se comenten errores significativos cuando se trabaja cerca de obstáculos como edificios, (Fook Hai, 2008).

La calidad y precisión de un levantamiento topográfico apoyado con GPS depende de las características propias del terreno y vegetación, así como del receptor utilizado. Sí se levanta un área despejada de árboles y edificios y se utiliza un receptor móvil de alta precisión, se tendrán errores pequeños. Para obtener las coordenadas de un punto el receptor móvil debe situarse sobre dicho punto por lo que el tiempo necesario para realizar el levantamiento depende del número de puntos a levantar.

b) Estación total

La estación total (Figura 3.16) es un instrumento que integra en un sólo equipo las funciones realizadas por el teodolito electrónico, un medidor electrónico de distancias y un microprocesador para realizar los cálculos que sean necesarios para determinar las coordenadas rectangulares de los puntos del terreno (Torres & Villate, 2001).



Figura 3.16. Trípode, estación total Nikon y prisma

Entre las operaciones que realiza una estación total puede mencionarse: obtención de promedios de mediciones múltiples angulares y de distancias, corrección electrónica de distancias por constantes de prisma, presión atmosférica y temperatura, correcciones por curvatura y refracción terrestre, reducción de la distancia inclinada a sus componentes horizontal y vertical así como el cálculo de coordenadas de los puntos levantados (Wolf & Brinker, 1997).

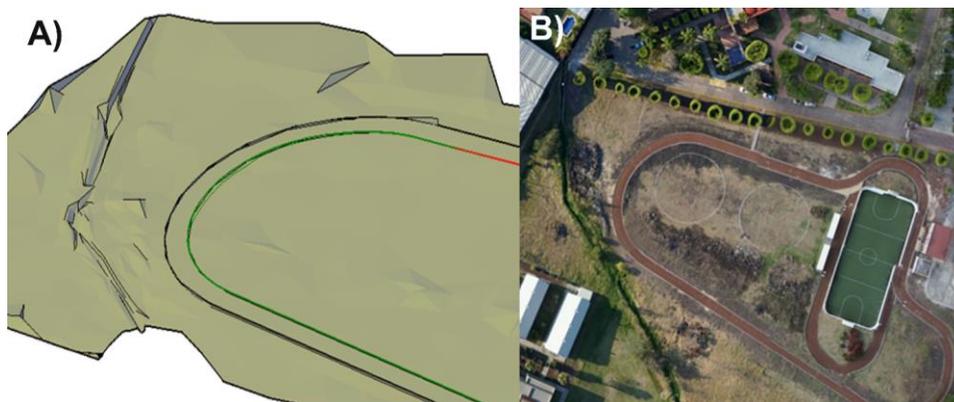


Figura 3.17. A) Modelo digital de elevación obtenida con una estación total, B) ortomosaico del área levantada con la estación total

En un levantamiento topográfico, la estación total y el GPS se utilizan juntos (McCormac, 2008), la estación para la obtención de la información topográfica de los punto de interés, y el

GPS para el posicionamiento de puntos de control, y así convertir las coordenadas arbitrarias a coordenadas geodésicas.

La calidad y precisión de un levantamiento topográfico apoyado con una estación total depende de la calidad del propio aparato, la nivelación del mismo y del prisma; mientras que la densidad de puntos levantados depende de las características propias del terreno y vegetación (Figura 3.17).

La estación total registra datos de puntos precisos y por ello sirve para la calibración de nuevos métodos, pero requiere de mayor inversión de tiempo y de personal especializado, este método consiste en la emisión de un rayo de laser en un solo punto para hacer únicamente una medición, por ello, la resolución o calidad de la información depende principalmente del número de puntos capturados (Fook Hai, 2008).

3.5.2. Métodos basados en sensores remotos

Existen otros equipos y sensores de apoyo para realizar trabajos topográficos. Los métodos por escaneo laser terrestre y LiDAR se basan en la tecnología láser; el resto (satélites, avionetas y VANTs) en la técnica fotogramétrica mediante imágenes aéreas los cuales pueden ser procesadas en nube de puntos para obtener modelos digitales de superficie (MDS) (Flener *et al.*, 2013) y Ortomosaicos (Hernández, 2006). Estos métodos trabajan en combinación con un sistema de GPS para posicionar puntos de control sobre el terreno y referenciar la información.

a) Laser Escáner terrestre

El escaneado láser describe un método mediante el cual una superficie se muestrea o escanea usando tecnología láser. Se analiza un entorno u objeto real para tomar datos sobre su forma y, posiblemente, su apariencia (por ejemplo el color). Los datos capturados pueden ser usados más tarde para realizar reconstrucciones digitales, planos bidimensionales o modelos tridimensionales (Lerma & Biosca, 2008).

En un principio, los escáneres láser eran de corto alcance y se utilizaban principalmente en el diseño automatizado e industrial para facilitar el Diseño Asistido por computadora (CAD en inglés). Los escáneres láser de medio alcance fueron desarrollados para la industria petroquímica. Debido a la complejidad de sus plantas, que sólo estaban documentadas como planos en dos dimensiones, los escáneres láser permitieron la gestión completa en tres dimensiones. Otras disciplinas como la topografía, el patrimonio cultural, la arquitectura, el desarrollo urbanístico, la medicina forense y la industria del entretenimiento han adoptado esta tecnología gracias a las ventajas obvias del escáner láser: la inexistencia de contacto en las mediciones, la alta precisión, el largo alcance, la rápida adquisición, etc. (Lerma & Biosca, 2008).

El Láser Escáner realiza un barrido de una superficie captando miles de puntos por segundo con un haz de láser en abanico. Como resultado final se obtiene una nube de puntos 3D compuesta por cientos de miles de mediciones individuales en un sistema de coordenadas (x, y, z), que en

sí mismas componen un modelo tridimensional de los objetos registrados (Figura 3.18). Además, la visualización puede llegar a alcanzar gran realismo ya que estos puntos pueden reflejar el color de la superficie registrada (Mañana-Borrazás, Rodríguez, & Blanco-Rotea, 2008).



Figura 3.18. Hokkaido, Japón, levantamientos láser de una carretera después de un temblor, y los resultados obtenidos (Soubra & Lorenzo, 2004).

El láser escáner es un instrumento habitual en proyectos de ingeniería y ha sido empleado en diversos campos, como la topografía, construcción de barcos o coches, diseños de infraestructuras industriales y civiles, etc.

Las dimensiones y el peso de los equipos comienzan a reducirse sustancialmente; el coste de los equipos va paulatinamente descendiendo, si bien es verdad que son caros. No obstante, la rentabilidad de un equipo depende del uso. En segmentos como mediciones industriales, tuberías, túneles, canteras, etc., su rentabilidad está más que garantizada, sobre todo si se desea extraer máxima información 3D en intervalos reducidos de tiempo (Lerma & Biosca, 2008).

Entre sus principales ventajas son: Alta precisión y la relativa alta densidad de puntos, capturan mucha información en poco tiempo (1000-500.000 puntos/s); no requieren luz ambiental, porque ellos generan su propia radiación al ser sensores activos; proporcionan gran cantidad de mediciones de manera automática; se alcanza un detalle muy fino en el modelo 3D; se puede utilizar para validar toda la geometría de un sitio y verificar las dimensiones y posiciones (Lerma & Biosca, 2008).

Sus principales desventajas son: requiere realizar varias posiciones combinadas del escáner, buscando una situación en la que sea visible la zona anteriormente oculta. La presencia de elementos que ocultan otras superficies o el hecho de estar limitados por unas perspectivas muy restringidas de las áreas que se quieren documentar, implica una mayor intensidad en el trabajo de campo, ya que son necesarias más posiciones para abarcar la totalidad del elemento a registrar (Mañana-Borrazás, Rodríguez, & Blanco-Rotea, 2008); problemas administrativos y de gestión: ya que son varios los casos donde no es posible realizar el levantamiento en los horarios que más conviene, así como de las mejores posiciones por problemas con vecinos, tráfico, etc. Condiciones climáticas: frío o calor extremo, lluvia, etc. demandan que las jornadas sean imposibles de cumplir, (Marambio & García, 2006); es necesario gran capacidad de almacenamiento antes de empezar a escanear, por ejemplo, utilizando un escáner laser de la marca Leica HDS4500, un escaneado ocupa 140Mb aproximadamente, con una media de 20-30 escaneados al día, se genera un total de 7GB aproximadamente (Lerma & Biosca, 2008).

b) Tecnología LiDAR

El LiDAR aerotransportado en un vehículo aéreo es un sensor activo, que consta de un distanciómetro láser y de un espejo que desvía el haz perpendicularmente a la trayectoria del avión. El LiDAR consiste en un transmisor y en un receptor, el transmisor envía pulsos de luz con longitudes de unos pocos a varios cientos de nanosegundos y son generados propiedades espectrales específicas por el láser. En el extremo del receptor, un telescopio recoge los fotones retrodispersados de la atmósfera (Weitkamp, 2005). El sistema mide la distancia del sensor al terreno a partir del tiempo que tarda el rayo de luz en alcanzar el suelo y regresar al sensor. Si conocemos las coordenadas y ángulos de actitud del avión y el ángulo del espejo, podemos calcular a partir de estos datos y de las distancias medidas las coordenadas de los puntos (Ruiz & Kornus, 2003).

Las ventajas de esta tecnología son: una técnica LiDAR es superior en comparación con las imágenes de sensores remotos para extraer áreas y límites de las masas de agua en 3D, (Canaz *et al.*, 2015); es menos sensible a la cobertura de nubes y la iluminación de sol; las elevaciones de la superficie se determinan directamente, incluso bajo la vegetación (Höfle *et al.*, 2009).

Sus desventajas son que en cuerpos de agua la longitud de onda del infrarrojo cercano del láser apenas penetra en la columna de agua y limita la adquisición de datos de la superficie del agua (Höfle *et al.*, 2009). El rayo láser emitido por el sensor en cuerpo de agua es absorbido y no vuelve.

Estos sensores LiDAR, se montan generalmente en aviones (tripulado o no) integrados con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) y el Sistema de Navegación Inercial (INS), (Canaz *et al.*, 2015).

El sensor LiDAR permite medir una gran cantidad de coordenadas de puntos de objetos con precisión de hasta unos centímetros en poco tiempo. El resultado de un vuelo LiDAR es una colección de puntos con coordenadas conocidas (Figura 3.19). La conversión de estos datos en un Modelo Digital de Terreno (DTM) altamente preciso requiere un manejo cuidadoso de los pasos en el procesamiento, desde la planificación del vuelo hasta la revisión manual del DTM generado, considerando las diferentes fuentes de error. Además, debe asegurarse que el sistema LiDAR se mantenga correctamente calibrado durante todas las sesiones de vuelo (Kornus & Ruiz, 2003).

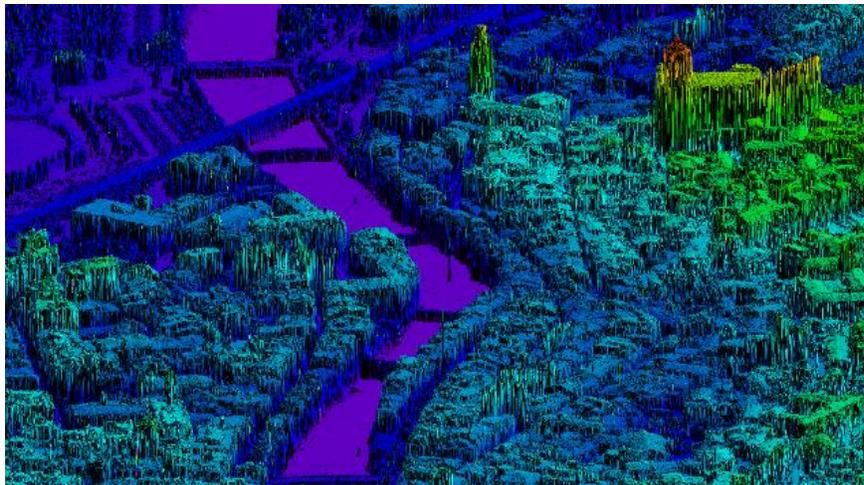


Figura 3.19. Modelo digital de superficie (MDS) con tintas hipsométricas generado por un sensor LiDAR (Ruiz & Kornus, 2003).

c) Imágenes tomadas desde VANTs

Unas de las recientes aplicaciones de los VANTs es la adquisición de información de la superficie terrestres a través de cámaras digitales. (Flener *et al.*, 2013), estas imágenes y técnicas de procesamiento fotogramétrico permiten obtener la topografía de un sitio; en estos trabajos topográficos, el uso de los VANTs se evidencia en el proceso de captura, almacenamiento y transmisión de datos de campo, además de que permite levantar todo tipo de terreno, mayor cobertura en menos tiempo, etc. (Pozuelo, Andrés, & Jordana, 2013); sin embargo, el uso de estos aparatos está limitado al levantamiento de unos cientos de ha comparados con otras tecnologías de percepción remota.

El procedimiento para realizar un levantamiento topográfico apoyado por drones consiste básicamente en planificar y ejecutar una misión de vuelo, adquirir puntos de apoyo terrestres, adquisición y procesamiento de imágenes, y finalmente la generación de productos topográficos (Jiménez *et al.*, 2017). Los puntos de control terrestres son requeridos para la corrección geométrica en el procesamiento de las imágenes. La etapa de generación de los productos

consiste en generar un modelo digital de elevaciones o de superficie (MDS) y un ortomosaico de la escena registrada (Figura 3.20). Para la generación de estos modelos la nube de puntos debe pasar por una triangulación y rasterización (Escalante, Cáceres, & Porras, 2016).

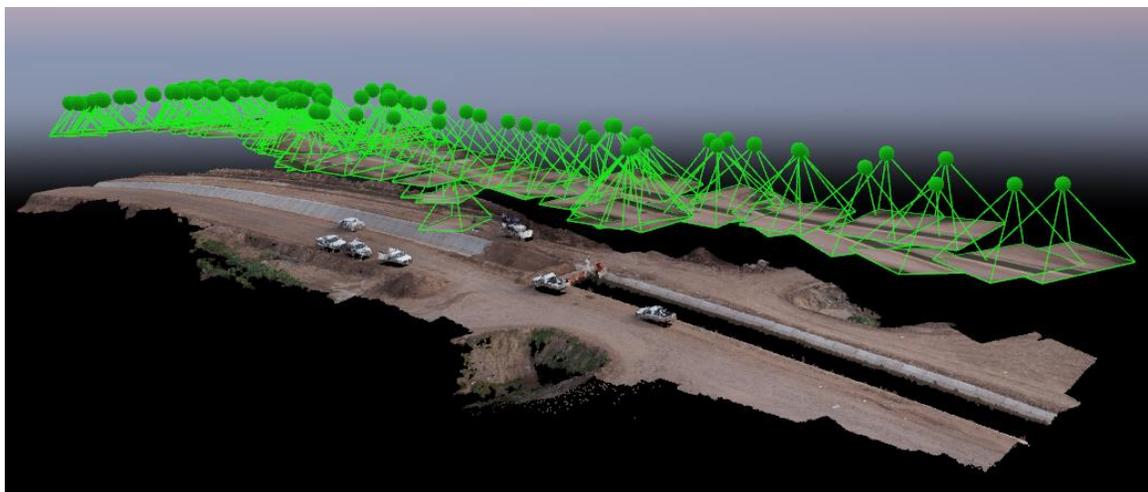


Figura 3.20. Modelo en 3D de un canal obtenido con imágenes traslapadas de un VANT

En diversos estudios con VANTs se reportan que se pueden obtener modelos digitales de terreno con alta resolución espacial y precisión de pocos centímetros, estas resoluciones y precisiones son superiores a los obtenidos con otras tecnologías de percepción remota. La precisión de estos modelos depende del número de puntos de control terrestres, traslapes entre imágenes, altura de adquisición de las imágenes y tipo de vehículo usado (multirotor o ala fija). Con el apoyo de un VANTs tipo multirotor, Tamminga *et al.* (2014) generaron un modelo digital de 791 km² apoyado de 45 puntos de apoyo y encontraron una RMSE en Z de 8 cm; Hugenholtz *et al.* (2013) utilizaron uno de ala fija y encontraron un RMSE en eje Z de 29 cm.

En cambio con imágenes satelitales la precisión que se puede obtener son de unos cuantos metros; Fuentes, Bolaños & Rozo (2012) encontraron que un modelo digital generado con imágenes del satélite IKONOS puede llegar a tener una precisión de 1.49 m, 3.5 m y 3.89 m en los ejes X, Y y Z, respectivamente; Zhang, Pateraki, & Baltsavias (2002), obtuvieron cinco modelos digitales de elevación con cinco diferentes algoritmos de interpolación usando imágenes IKONOS y encontraron precisiones desde 3.1 m hasta 5.4 m.

Otra gran ventaja de los VANTs en que no solamente se puede obtener topografía con precisión de centímetro a partir de imágenes, sino, también con videos captados desde estas plataformas, estos videos se descomponen en fotogramas y cada fotograma corresponde a una imagen por procesar, estos se pueden extraer manualmente o automáticamente a cada intervalo de tiempo; una metodología de obtención de modelos digitales usando la técnica de videogrametría lo reporta Mejía (2016).

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. MATERIALES

4.1.1. Equipo utilizado

Los equipos que se utilizaron para llevar a cabo el presente trabajo son:

Un VANT hexacóptero DJI A2 que realiza un despegue y aterrizaje vertical, posee una autonomía de vuelo de 15 minutos y una capacidad de carga de 2.5 kg; está dotado de un sistema GPS que le permite volar sobre una ruta previamente programada y acciona automáticamente la toma de las imágenes según la configuración de vuelo. En el momento de la captura de cada imagen, el VANT registra su posición GPS, su altura y la hora.

Cámara SONY α 5100 de 16 mm de distancia focal (Figura 4.1). Esta cámara toma las imágenes con un sensor de 24 megapíxeles (6,000 x 4,000 píxeles) en color verdadero (RGB por las siglas en inglés *Red-Green-Blue*).



Figura 4.1. Dron hexacóptero DJI y cámara SONY NEX-7.



Figura 4.2. GPS RTK (izquierda), Cámara Multiespectral Tetracam (derecha).

GPS RTK (Global Positioning System-Real Time Kinematic) marca TopCon (Figura 4.2) de precisión menor de 1 cm en la horizontal y vertical; utiliza dos antenas uno se posiciona en modo estático en un punto fijo, mientras que el receptor móvil se ubica en cada punto que se desea obtener sus coordenadas. Además, se usó una estación total marca Nikon.

4.1.2. Imágenes satelitales

Se usó una imagen WordView en falso color de 30 cm/píxel de resolución espacial que cubre el área de los poblados de Tlaola y Chicahuaxtla, ubicados en la sierra norte del estado de Puebla,

4.1.3. Software

Las misiones de vuelo del VANT se programaron y ejecutaron con UgCS (Universal [Ground] Control Software) (SPH Ingeniería, Riga, Letonia); el programa utilizado para la restitución fotogramétrica de las imágenes fue “PhotoScan” (Agisoft, 2016). La computadora utilizada fue una Laptop marca HP de 8 GB de Memoria RAM con procesador Core i7 2.0 GHz.

El manejo de los modelos digitales de terreno (MDT) y su representación gráfica en curvas de nivel y secciones longitudinales se llevó a cabo con el software AutoCAD Civil 3D.

El procesamiento digital de imágenes basado en objetos se llevó a cabo con el software eCognition y el manejo de la información en formato vector y raster con ArcGIS (ESRI); mientras que el procesamiento digital de imágenes basado en píxel mediante algoritmos de segmentación se llevó a cabo con Matlab.

4.2. MÉTODOS

Se emplearon las técnicas fotogramétricas para la adquisición y procesamiento de las imágenes del VANT, la corrección geométrica de las imágenes se realizó con puntos de control terrestres; se determinaron las precisiones en los modelos digitales y ortomosaico mediante parámetros estadísticos.

En el análisis de las imágenes se usaron los métodos de clasificación basados en píxel y en objetos, así como algoritmos de segmentación basados en detección de discontinuidades y similitudes; estos métodos se explican a detalle en los tres capítulos siguientes.

V. LEVANTAMIENTOS TOPOGRÁFICOS APOYADOS CON VANTs

5.1. INTRODUCCIÓN

La topografía es la ciencia que estudia el conjunto de procedimientos para determinar las posiciones de los puntos sobre la superficie de la tierra, por medio de medidas según los 3 elementos del espacio. Estos elementos pueden ser: dos distancias y una elevación, o una distancia, una dirección y una elevación (Montes, 1996). El conjunto de mediciones se representan en cartas topográficas.

La posibilidad de obtener la topografía de un sitio con alta resolución espacial y temporal es cada vez más importante para diversas disciplinas. Y actualmente tiene diversas aplicaciones, como en levantamientos de trazos, deslindes, divisiones de tierra (agrodesia), determinaciones de área (agrimensura), nivelación de terrenos, construcción de bordos, canales y drenes, cuantificación de volúmenes extraídos, en los trabajos topográficos antes, durante y después de la construcción de obras, como carreteras, ferrocarriles, edificios, puentes, canales, presas, fraccionamientos, servicios municipales, etc. (Alcántara, 2014).

La elaboración de las cartas topográficas se apoya en los métodos tradicionales como levantamientos geodésicos, astronómicos topográficos y de toponimias con instrumentos como estaciones totales, teodolitos, niveles; así como en la restitución fotogramétrica (Gómez, 2004) con imágenes obtenidas desde satélites artificiales, avionetas o VANTs.

Los métodos tradicionales exigen una inversión de días o semanas y brindan resoluciones gruesas; los basados en imágenes satelitales además de que su precisión es superior al metro pueden presentar dificultad por baja calidad espacial de los datos, cobertura de nubes o efectos atmosféricos agregado a ello la resolución temporal; los basados en VANTs vienen a solucionar algunos de los problemas anteriores, ya que se pueden adquirir datos de manera rápida y muy precisa que pueden ser procesados comúnmente con la técnica fotogramétrica en nubes de puntos, modelos digitales de superficie (Flener *et al.*, 2013) y ortomosaicos (Hernández, 2006). Esto permite tener estudios topográficos de mayor calidad; la mayor ventaja de los VANTs se evidencia en el proceso de captura, almacenamiento y transmisión de datos de campo.

Si bien los levantamientos topográficos apoyados con VANTs se realizan en tiempos relativamente más cortos y se dispone de mayor información que en los trabajos de topografía clásica, resulta necesario validar en campo y en gabinete la precisión, los tiempos, los alcances y eficiencias que pueden llegar a brindar los productos generados para que puedan ser considerados confiables.

Es por ello que en esta sección se describe una metodología general para realizar levantamientos topográficos apoyados con VANTs; se hacen recomendaciones sobre en qué superficies se puede obtener la topografía con esta tecnología y en donde no es posible; se analizan la precisiones de los productos generados (modelos digitales de terreno y ortomosaicos) con

respecto al número de puntos de control terrestres; y se determinan los factores que definen la resolución espacial de los modelos digitales y ortomosaicos.

5.2. OBJETIVOS

- ❖ Obtener la topografía (representada mediante curvas de nivel) de dos sitios de estudio a partir de fotogrametría con VANTs.
- ❖ Determinar el número óptimo de puntos de control terrestres, para obtener modelos digitales con precisión de centímetros.
- ❖ Generar una metodología para obtener topografía de alta resolución y precisión usando imágenes adquiridas desde un VANT.

5.3. HIPÓTESIS

- ❖ Con imágenes adquiridas desde un VANT es posible obtener la topografía de un sitio con alta resolución espacial y precisión de centímetros.
- ❖ El número de puntos de control terrestres afecta la precisión de los modelos digitales de elevación.

5.4. METODOLOGÍA.

La metodología empleada en este trabajo para obtener la topografía de los sitios de estudio a partir de la fotogrametría con VANTs se presenta en la Figura 5.1, se dividió el flujo de trabajo en tres fases principales: i) planeación y adquisición de la información, ii) procesamiento de la información, y iii) análisis y presentación de resultados.

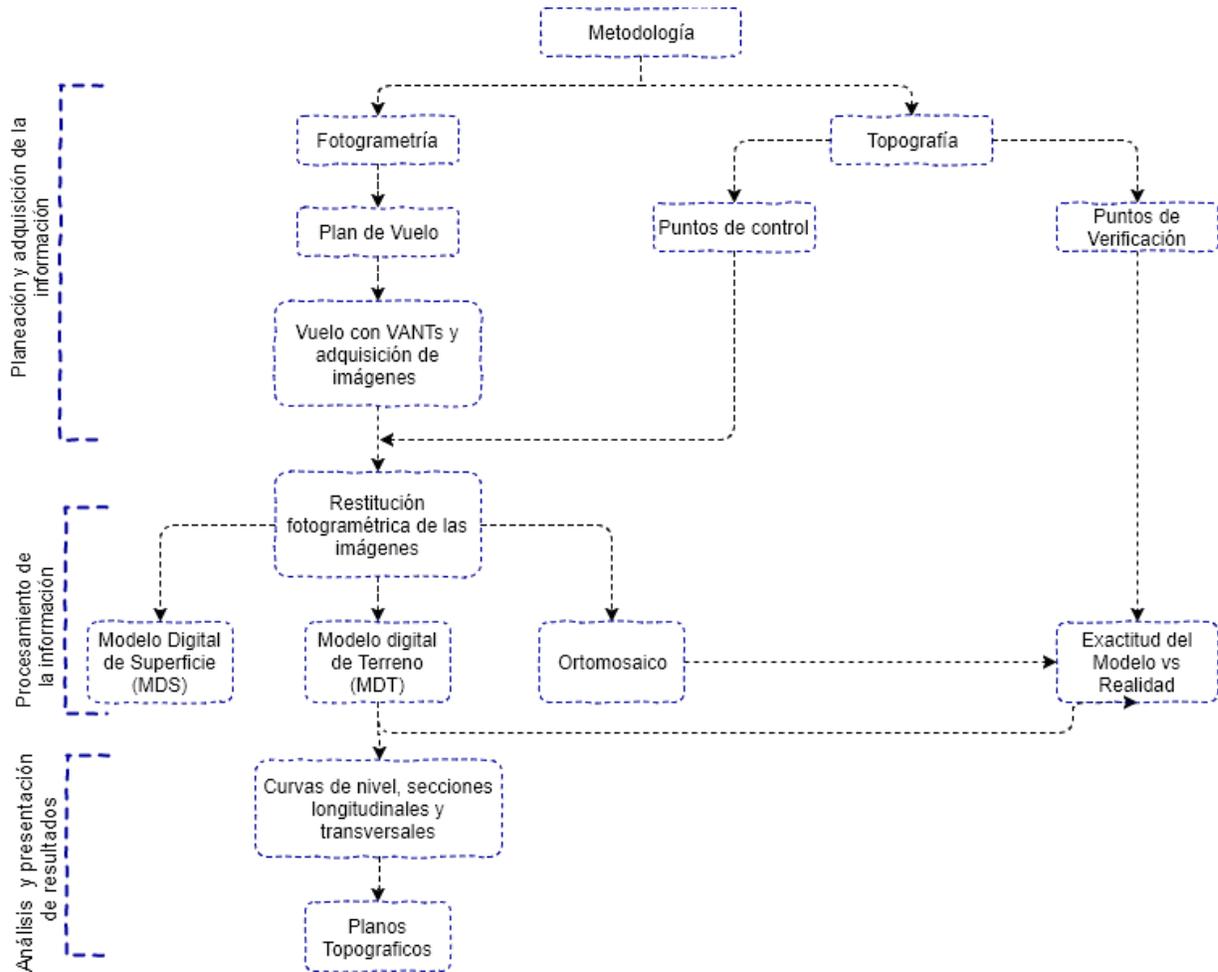


Figura 5.1. Metodología general para levantamientos topográficos

En los puntos siguientes se describe con más detalle las fases de trabajo.

5.4.1. Zona de estudio

En el presente trabajo se ha considerado como estudio de caso dos poblados: Tlaola y Chichahuaxtla, ambos pertenecen al municipio de Tlaola, ubicado en la sierra norte del estado de Puebla, México.

El municipio de Tlaola se localiza en la parte noroeste del Estado de Puebla, México, (Figura 5.2) a 1,180 msnm. Sus coordenadas geográficas son los paralelos 20° 05' 18" y 20° 14' 42" de

latitud norte y los meridianos 97° 50' 00" y 97° 58' 36" de longitud occidental. Sus colindancias son al Norte con el municipio de Zihuateutla y Juan Galindo, al Sur con Chiconcuautla y Tlapacoya, al Oeste con Jopala y Tlapacoya y al Poniente con Juan Galindo y Huauchinango, (INAFED, 2016).

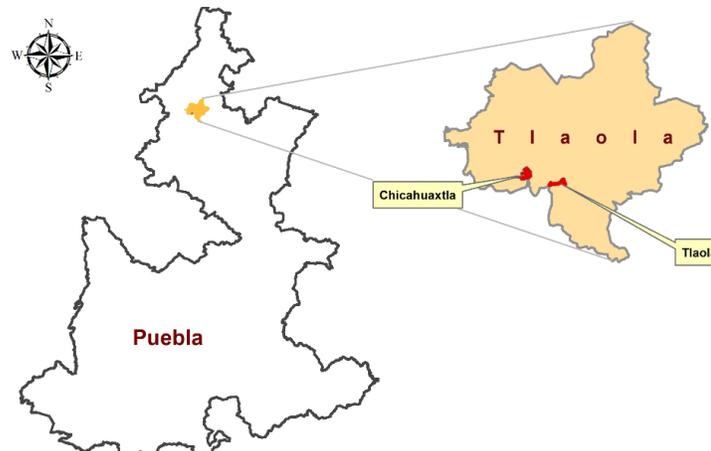


Figura 5.2. Macro y microlocalización del municipio de Tlaola

Los ríos que escurren en el municipio se originan en la sierra norte del estado, en su mayoría lo recorren de suroeste a noreste, y desembocan en el río Tecolutla, que descarga en el Golfo. Los principales ríos son: El Tepexi que recorre la porción septentrional y sirve de límite con Zihuateutla para posteriormente unirse al Necaxa uno de los principales formadores del Tecolutla; Salto de Quamila, Zempoltongo e Ixtacatla recorren la porción central y se unen formando el río Cuanacasco, afluente del Necaxa; Por último el Tlapacatitla y el Zempoala recorren la porción meridional y salen del municipio para formar el Ajajalpan, afluente del Tecolutla, (INAFED, 2016).

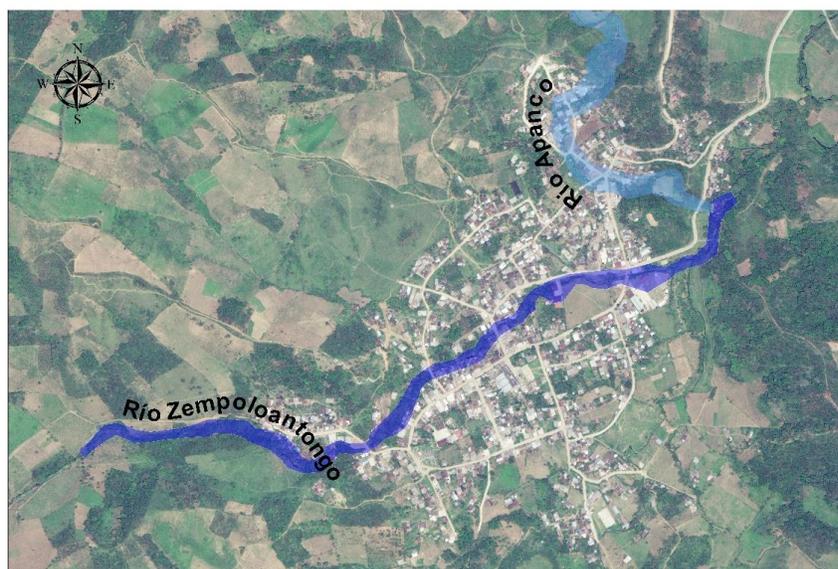


Figura 5.3. Ríos que atraviesan el poblado de Chicahuaxtla

Los ríos que atraviesan el poblado de Chichahuaxtla son: Zempoloantongo que lo atraviesa de oeste a este y el río Apanco que pasa sobre los márgenes del poblado es su extremo este, mientras que al poblado de Tlaola lo atraviesa únicamente el río Ixcatlaca.

Los poblados de Tlaola y Chichahuaxtla son semiurbanos y presentan distintas pendientes, Tlaola presenta pendientes ligeras en toda el área urbana, mientras que Chichahuaxtla en el extremo oeste presenta pendiente más pronunciadas por su proximidad a las faldas del cerro, y pendiente ligeras en el lado este.

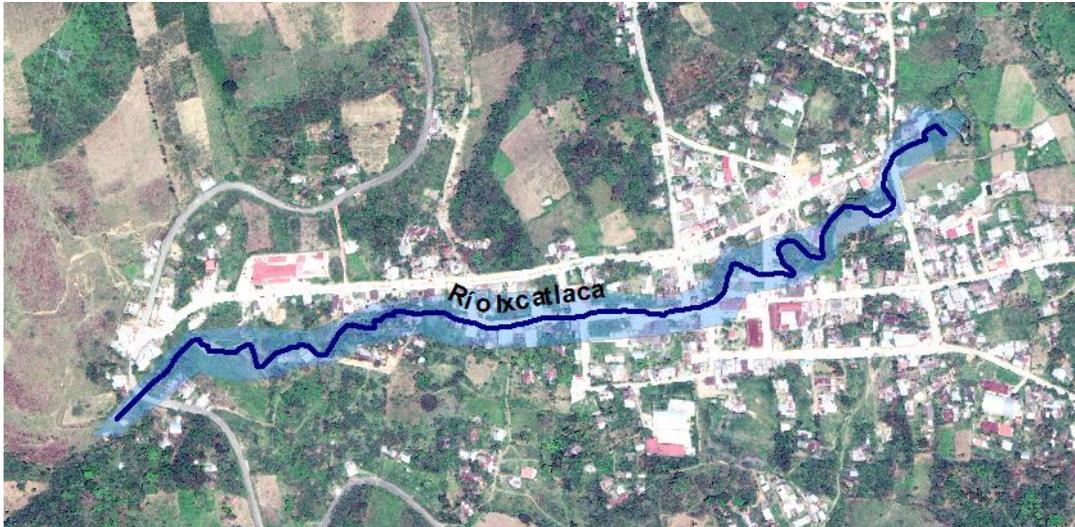


Figura 5.4. Ríos que atraviesan el poblado de Tlaola

5.4.2. Planeación y adquisición de información: Tlaola

En los siguientes puntos se presentan los pasos que se siguieron para la adquisición de puntos de control terrestres, la planeación de vuelo y la adquisición de las imágenes con el VANT para el poblado de Tlaola.

a) Apoyo topográfico

Los puntos de control y verificación se marcaron sobre el terreno antes del vuelo para que estas aparezcan claramente identificables en las fotos; se ubicaron 11 puntos de control y 12 de verificación, los puntos de control sirven para transformar el modelo fotogramétrico en modelo del terreno (Garriga & Morón, 2015), los puntos de verificación sirven para determinar la precisión de los modelos digitales obtenidos.

Los puntos de control se marcaron con pintura blanca, los puntos de verificación se levantaron sobre estructuras. Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron el mismo día del vuelo con un GPS RTK, para ello se estableció un punto base en donde se posicionó un GPS en modo estático sobre una construcción, mientras que el GPS receptor móvil se movió a los puntos de control y verificación establecidos. Las coordenadas se obtuvieron en UTM para la zona 14N; las coordenadas de los puntos de control y verificación se muestran en el Cuadro 3 y Cuadro 4, respectivamente.

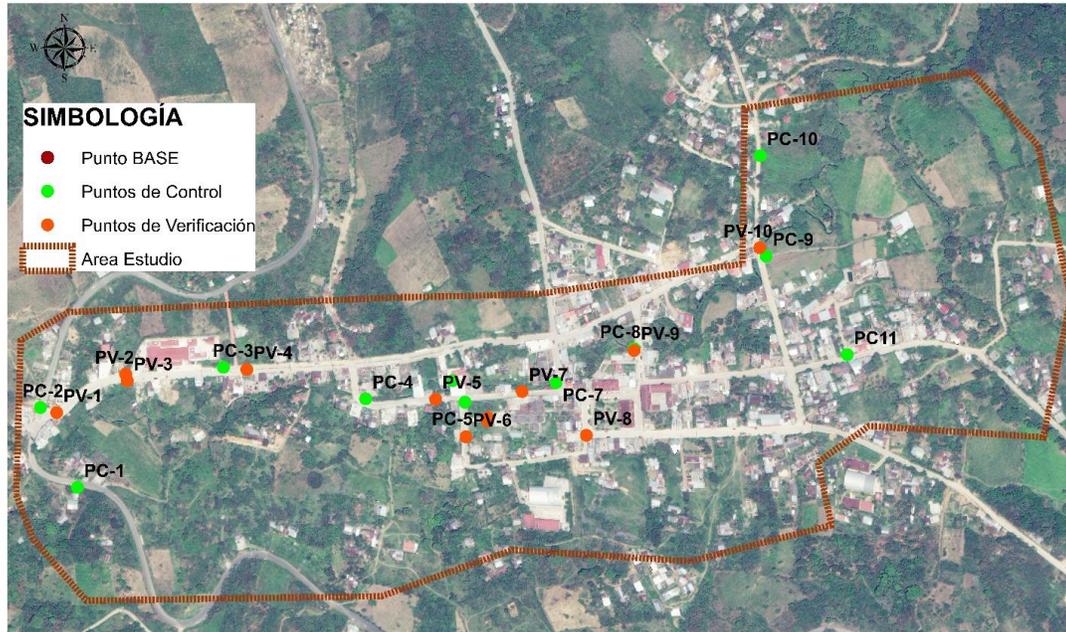


Figura 5.5. Distribución de los puntos de control y verificación en Tlaola.



Figura 5.6. GPS Base y marcas de puntos de control sobre la superficie

Cuadro 3. Coordenadas de los puntos de control para Tlaola

Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Elevación, Z (m)	Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Elevación, Z (m)
Base	611,996.013	2,227,049.720	1,197.120	PC-6	612,272.456	2,227,024.132	1,178.517
PC-1	611,866.510	2,226,908.509	1,202.392	PC-7	612,384.334	2,227,021.994	1,175.671
PC-2	611,826.458	2,226,994.973	1,203.539	PC-8	612,468.992	2,227,058.769	1,172.739
PC-3	612,024.454	2,227,038.528	1,187.739	PC-9	612,611.583	2,227,158.903	1,168.581
PC-4	612,178.376	2,227,004.353	1,180.674	PC-10	612,605.470	2,227,267.740	1,170.009
PC-5	612,285.786	2,227,000.765	1,177.719	PC-11	612,699.458	2,227,052.243	1,177.954

Cuadro 4. Coordenadas de los puntos de verificación para Tlaola

Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Elevación, Z (m)	Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Elevación, Z (m)
PV-1	611844.045	2226989.398	1202.290	PV-7	612347.811	2227012.339	1176.405

PV-2	611918.734	2227031.228	1192.501	PV-8	612417.181	2226964.908	1177.371
PV-3	611920.304	2227024.050	1192.369	PV-9	612468.935	2227056.833	1172.862
PV-4	612049.787	2227036.211	1186.371	PV-10	612604.858	2227167.892	1168.770
PV-5	612254.143	2227003.956	1178.233	PV-11	612310.340	2226980.207	1179.820
PV-6	612286.950	2226963.180	1180.843	PV-12	612310.285	2226984.161	1179.817

b) Plan de vuelo y adquisición de las imágenes

Se realizaron tres vuelos para cubrir una superficie aproximada de 37.4 ha sobre el poblado (Figura 5.7), en un tiempo efectivo de 26 minutos, a una altura media de 92 m sobre la superficie (resolución espacial de la imagen de 2.0 cm/píxel). Los vuelos se realizaron en un mismo día: el jueves 1 de septiembre del 2016. La altura de vuelo se seleccionó en base a dos condiciones, la primera fue la resolución espacial óptima para detectar los detalles de la superficie terrestre y la segunda fue el número de imágenes individuales necesarias para incluir toda la zona, ya que un gran número de imágenes individuales hacen más tardados los procesos de restitución fotogramétrica (Gómez-Candón, De Castro, & López-Granados, 2014).



Figura 5.7. Misiones de vuelo para el poblado de Tlaola

Las imágenes se adquirieron automáticamente cada 3.5 s (21 m entre cada fotos) a una distancia entre línea de vuelo de 31.5 m, para obtener un traslape lateral y frontal del 75 % a una velocidad media de 6 m/s del VANT. Finalizado el vuelo se descargaron las imágenes de la cámara. Se obtuvieron 443 imágenes de las cuales solamente 317 fueron usadas para su procesamiento, ya que las otras corresponden a cuando el VANT gira para incorporarse a la siguiente línea de vuelo.

5.4.3. Planeación y adquisición de información: Chicahuaxtla

En los siguientes puntos se presentan los pasos que se siguieron para la adquisición de puntos de control terrestres, la planeación de vuelo y la adquisición de las imágenes con el VANT para el poblado de Chicahuaxtla.

a) Apoyo topográfico

Los puntos de control y verificación se repartieron estratégicamente sobre la superficie de la población, en total se ubicaron 14 puntos de control y 22 de verificación (Figura 5.8).

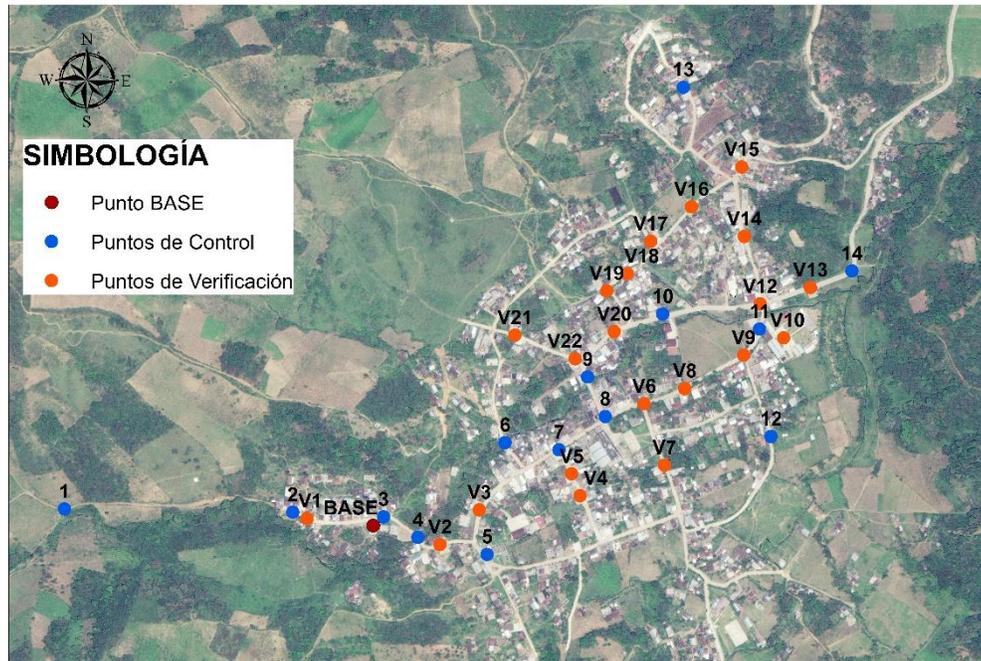


Figura 5.8. Puntos de control y de verificación en Chicahuaxtla.

Los puntos de control se marcaron con pintura blanca (Figura 5.9), los puntos de verificación se levantaron sobre estructuras que son visibles en las fotos tomadas desde el VANT. Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron 5 días antes del vuelo con un GPS RTK, para ello se estableció un punto base sobre una edificación dentro del poblado en donde se posicionó un GPS en modo estático, mientras que el GPS receptor móvil se movió a los puntos de control y verificación establecidos. Las coordenadas de los puntos de control se muestran en el Cuadro 5, los puntos de verificación en el Cuadro 6.



Figura 5.9. Marcas de puntos de control (izquierda) y verificación (derecha)

Cuadro 5. Coordenadas de los puntos de control

Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Altitud, Z (m)	Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Altitud, Z (m)
BASE	609,923.051	2,227,489.358	1,224.102	8	610,235.847	2,227,636.629	1,192.930
1	609,506.529	2,227,511.875	1,260.010	9	610,212.080	2,227,690.153	1,190.243
2	609,814.306	2,227,507.338	1,231.145	10	610,313.354	2,227,775.076	1,181.204
3	609,936.751	2,227,501.151	1,220.431	11	610,444.029	2,227,754.744	1,176.298
4	609,983.165	2,227,473.532	1,213.639	12	610,459.483	2,227,609.720	1,186.773
5	610,076.422	2,227,450.525	1,211.415	13	610,341.301	2,228,081.300	1,178.653
6	610,100.660	2,227,601.461	1,200.778	14	610,568.524	2,227,833.287	1,171.381
7	610,173.507	2,227,591.649	1,196.022				

Cuadro 6. Coordenadas de los puntos de verificación

Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Altitud, Z (m)	Nombre	Este, X (m)	Norte, Y (m)	Altitud, Z (m)
V1	609,833.64	2,227,498.92	1,230.58	V12	610,444.80	2,227,788.77	1,175.54
V2	610,012.94	2,227,463.79	1,213.00	V13	610,512.56	2,227,810.84	1,172.85
V3	610,065.96	2,227,510.50	1,207.59	V14	610,423.44	2,227,879.93	1,176.28
V4	610,201.86	2,227,529.84	1,200.77	V15	610,419.93	2,227,973.56	1,174.81
V5	610,190.53	2,227,559.26	1,200.00	V16	610,352.11	2,227,919.98	1,178.78
V6	610,288.37	2,227,653.76	1,190.70	V17	610,297.30	2,227,873.43	1,193.60
V7	610,315.77	2,227,571.03	1,194.89	V18	610,265.86	2,227,829.44	1,183.47
V8	610,343.09	2,227,674.48	1,184.16	V19	610,238.03	2,227,806.43	1,184.59
V9	610,422.58	2,227,719.57	1,177.23	V20	610,247.99	2,227,751.36	1,186.18
V10	610,476.36	2,227,742.87	1,176.00	V21	610,113.92	2,227,746.43	1,192.00
V11	610,444.80	2,227,788.76	1,175.54	V22	610,195.32	2,227,714.70	1,189.71

b) Plan de vuelo y adquisición de las imágenes

En el poblado de Chicahuaxtla se realizaron cuatro vuelos para cubrir una superficie aproximada de 61 ha (Figura 5.10) en un tiempo efectivo de 42 minutos. Las misiones se ejecutaron en un mismo día (miércoles 14 de septiembre del 2016) a una altura media de 118 m sobre la superficie (resolución espacial de la imagen de 2.9 cm/píxel) a una velocidad media del VANT de 6 m/s

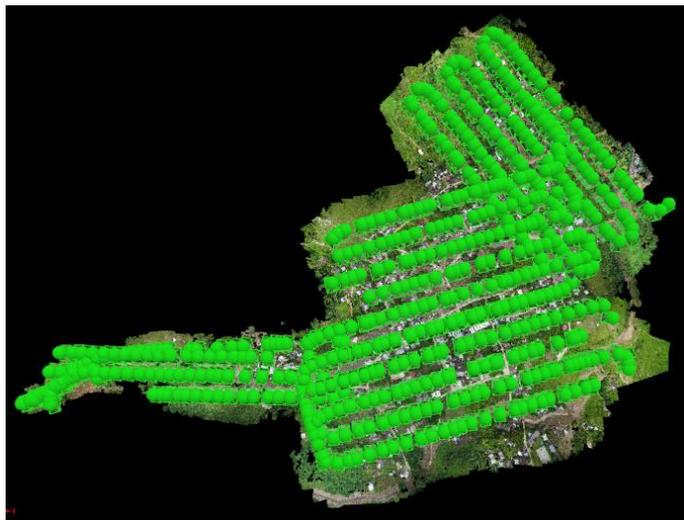


Figura 5.10. Misiones de vuelo para el poblado de Chicahuaxtla

Las imágenes se adquirieron automáticamente cada 4 s (24 m entre fotos) a una distancia entre línea de vuelo de 43.5 m, para obtener un traslape lateral y frontal del 75 %. Finalizado el vuelo se descargaron las imágenes de la cámara. Se obtuvieron 796 imágenes de las cuales solamente 626 fueron usadas para su procesamiento.

5.4.4. Procesamiento de la información

Se realizaron ocho restituciones fotogramétricas para cada sitio de estudio, variando la cantidad de puntos de control terrestre, tal como se muestra en la Figura 5.12 y Figura 5.13. Lo anterior se realizó para determinar la influencia del número de puntos de control terrestres en la precisión de los modelos digitales generados mediante imágenes adquiridas desde el VANT, ya que según Fuentes, Bolaños, & Rozo, 2012, la calidad y cantidad de puntos de control es uno de los factores que definen la precisión de los modelos digitales generados mediante la técnica fotogramétrica.

El flujo de trabajo seguido en PhotoScan para generar los modelos digitales de elevación (de superficie y de terreno), así como los ortomosaico se presenta en la Figura 5.11, este flujo de trabajo se aplicó para cada restitución fotogramétrica de cada sitio de estudio.

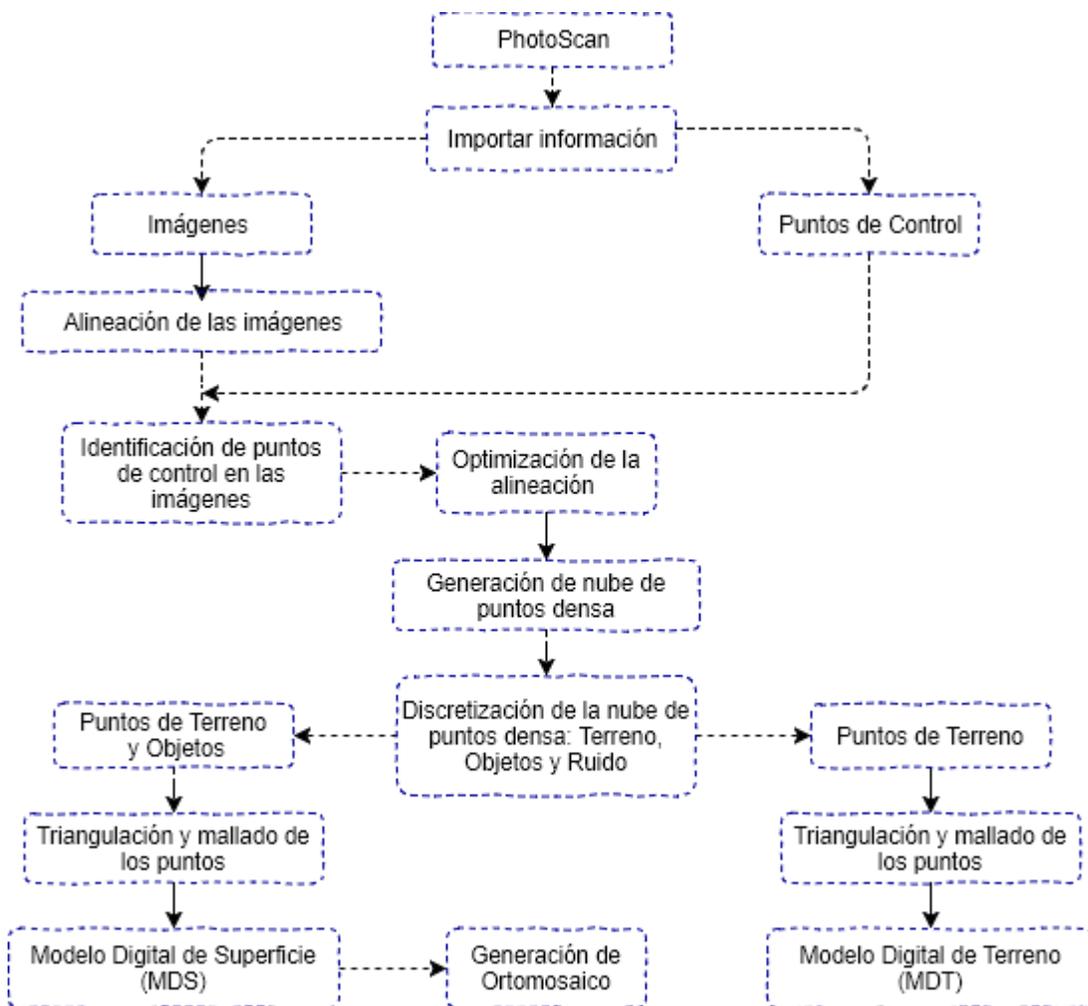


Figura 5.11. Flujo de trabajo usado, apoyado con el software PhotoScan

La alineación de las imágenes se realizó con un procesamiento de calidad media para ambos sitios y la generación de la nube de puntos densa fue en calidad media para Tlaola y Calidad Baja para Chichahuaxtla. La corrección geométrica se realizó en base a los puntos de control terrestres y se definió el sistema de referencia WGS 84/UTM zona 14N, la identificación de los puntos de control se realizó en el entorno del programa. En el Cuadro 7 y Cuadro 8 se observa el número de imágenes en donde se identificaron los puntos de control.

Cuadro 7. Número de imágenes identificadas por puntos de control para Tlaola

Punto de control	Número de imágenes	Punto de control	Número de imágenes	Punto de control	Número de imágenes
1	7	5	16	9	6
2	3	6	15	10	4
3	9	7	13	11	14
4	22	8	12	Total	121

Cuadro 8. Número de imágenes identificadas por puntos de control para Chichahuaxtla.

Punto de control	Número de imágenes	Punto de control	Número de imágenes	Punto de control	Número de imágenes
1	12	6	23	11	41
2	10	7	31	12	9
3	31	8	9	13	26
4	45	9	12	14	11
5	35	10	28	Total	323

Posteriormente, a partir de métodos de discretización automática, cada nube de puntos fue clasificada en tres clases: terreno, objetos y ruido; en la clase “objetos” se ubicaron los puntos que representan las construcciones, arboles, vehículos y demás elementos que no forman parte del terreno, en la clase “terreno” se ubicaron los puntos que representan el terreno; y en la clase ruido los puntos con errores de reproyección producidos en el proceso de aerotriangulación, comúnmente estos puntos se presentan sobre los cuerpos de agua y otras características móviles, tales como vehículos o personas en movimiento.

Los modelos digitales de superficie (MDS) se generaron en base a la triangulación de los puntos de la clase terreno y objetos; y el modelo digital de terreno (MDS) en base a los puntos de terreno. Finalmente, se exportaron las nubes de puntos en formato LAS; el MDS, MDT y ortomosaico en formato TIFF.

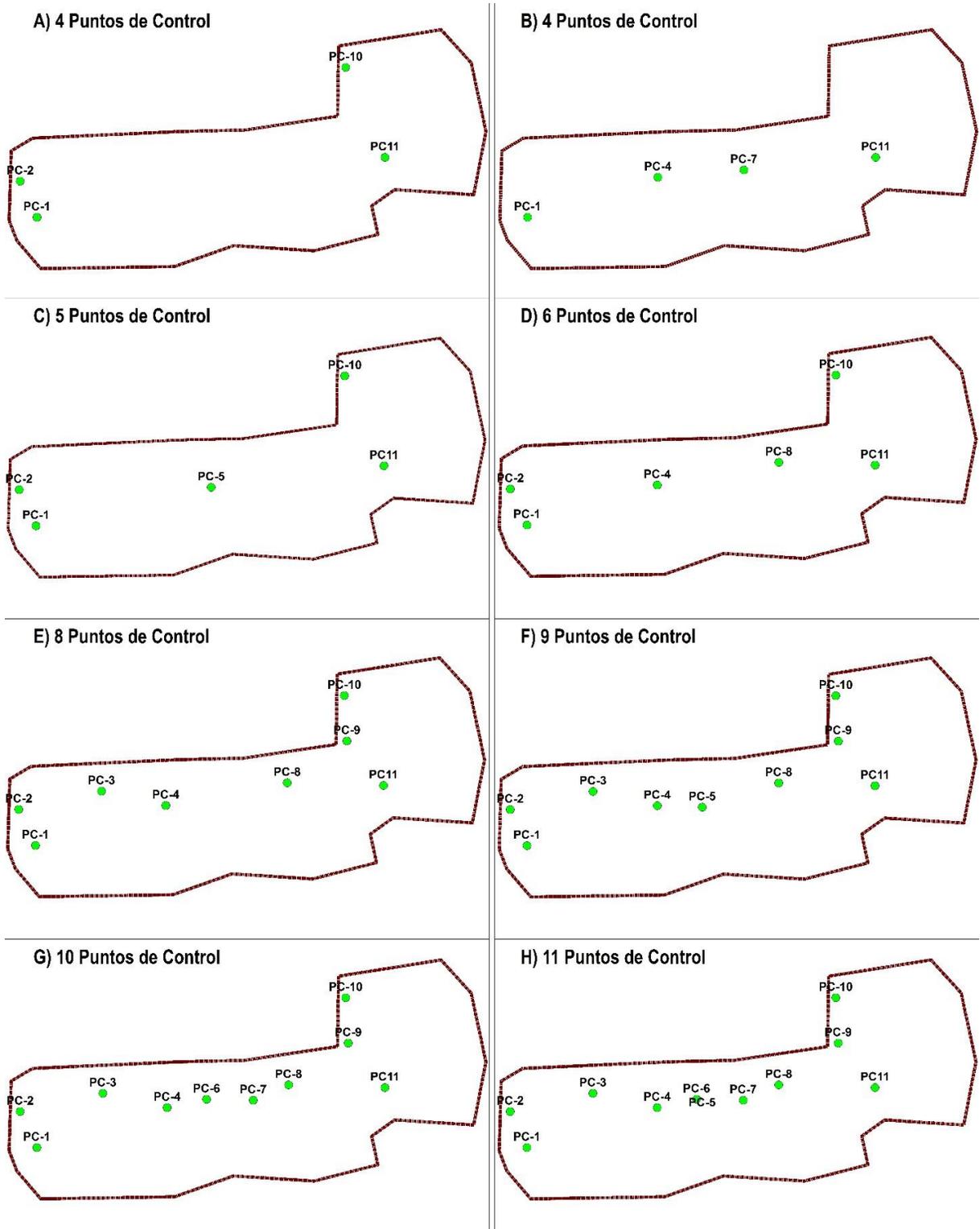


Figura 5.12. Ubicación de puntos de control por procesamiento para Tlaola.

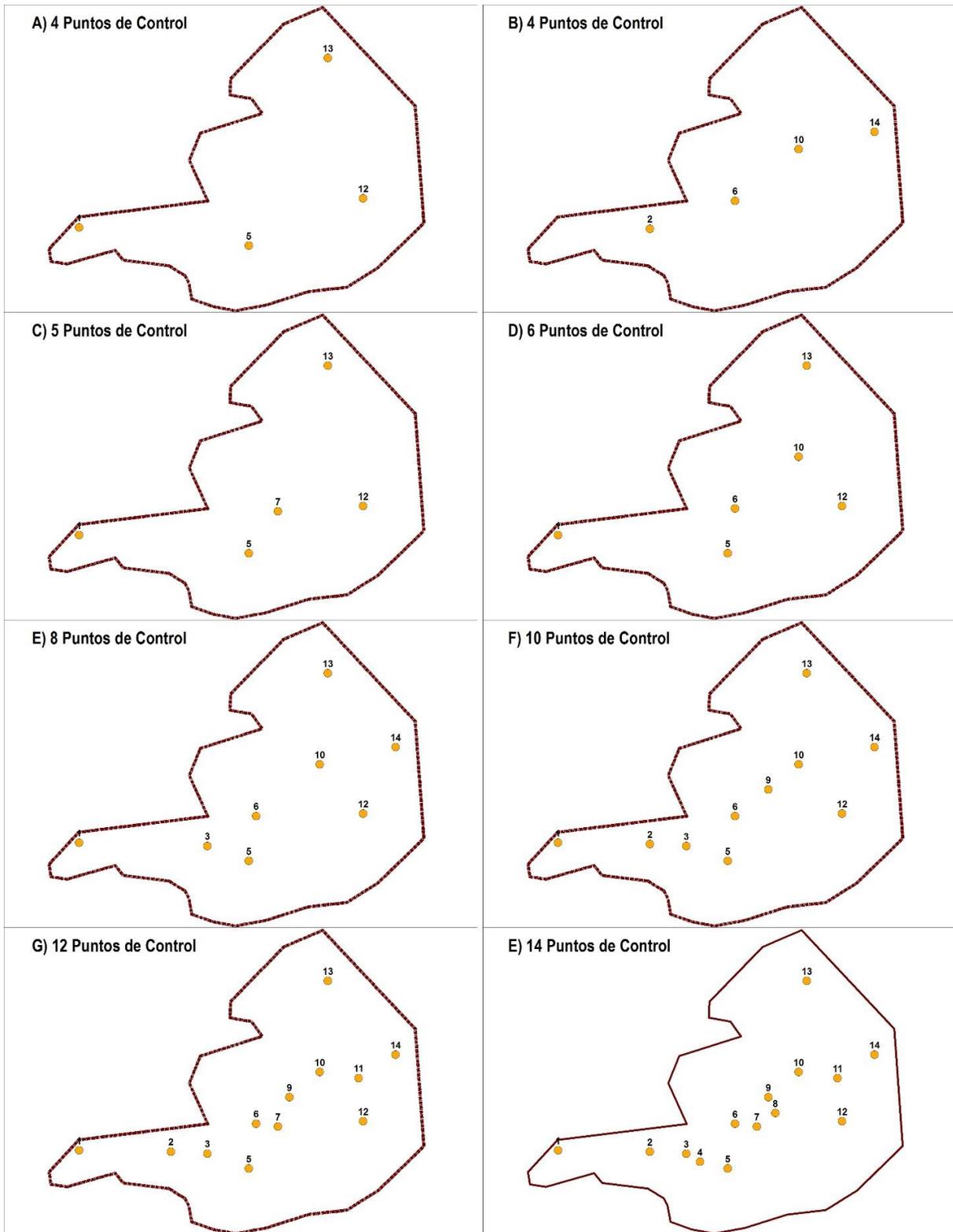


Figura 5.13. Ubicación de puntos de control por procesamiento para Chicahuaxtla.

5.4.5. Curvas de nivel y secciones

Las curvas de nivel se generaron en el software AutoCAD Civil 3D en base al MDT (Figura 5.14), se consideró trabajar directamente con el modelo digital en el software para no perder la resolución espacial. En el caso de Tlaola se usó el MDT referenciado con 11 puntos de control, y para Chichahuaxtla el de 14 puntos.

El flujo de trabajo seguido en AutoCAD Civil 3D para generar las curvas de nivel y secciones transversales así como los planos topográficos se presenta en la Figura 5.14, este flujo se aplicó para los MDT de los dos poblados.

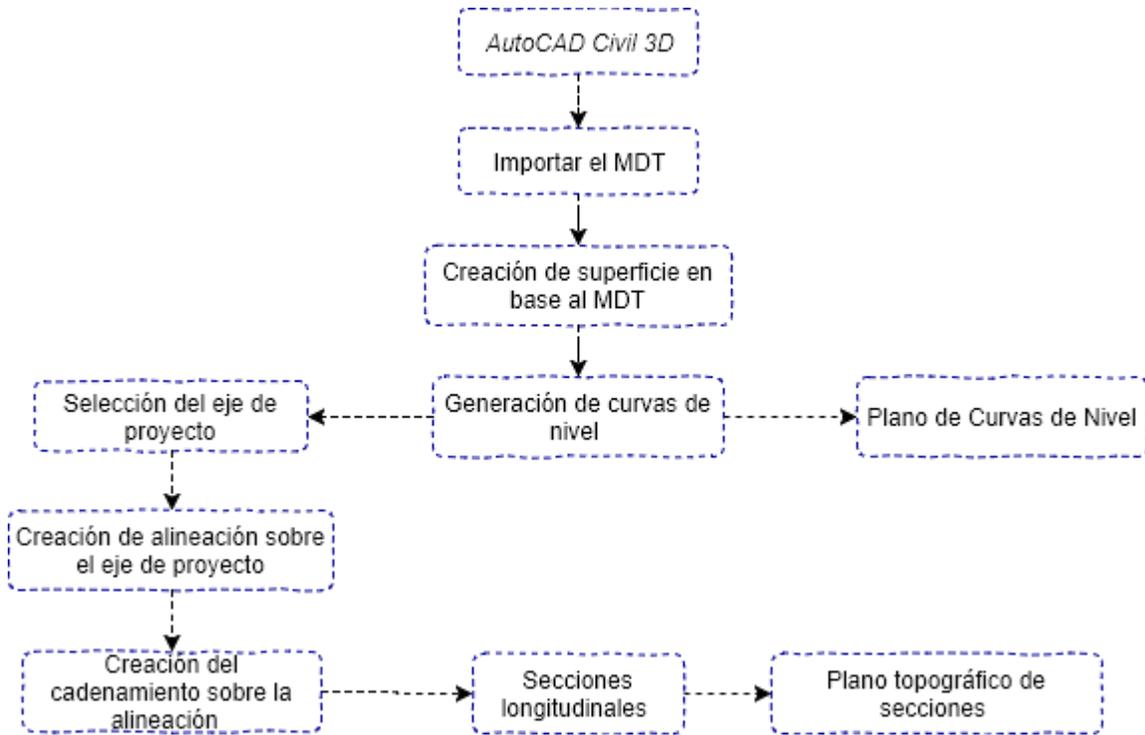


Figura 5.14. Flujo de trabajo para generar curvas de nivel

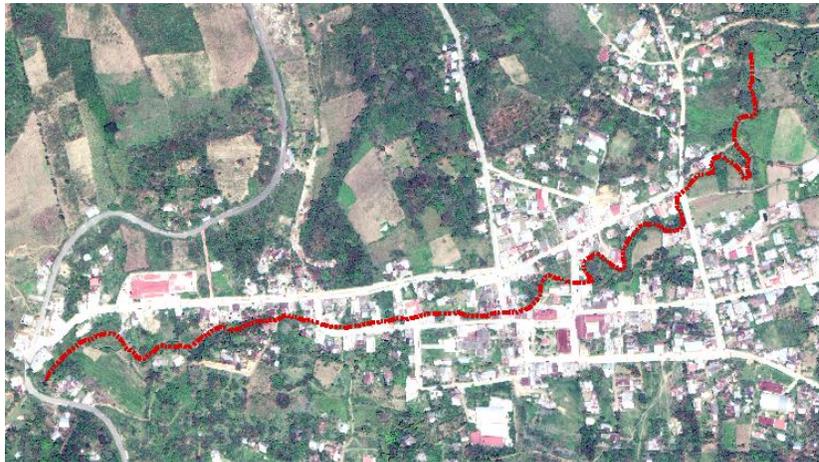


Figura 5.15. Eje de proyecto para el poblado de Tlaola

Las curvas de nivel se generaron con intervalo de 1 m, se seleccionó un eje de 1,300 m sobre los cauces del río Ixcatlaca para Tlaola (Figura 5.15) y Zempoloantongo para Chichahuaxtla (Figura 5.16). Finalmente, sobre esos ejes se obtuvieron los perfiles longitudinales.



Figura 5.16. Eje de proyecto para el poblado de Chichahuaxtla.

5.4.6. Estimación de la precisión

Una parte crucial de todo trabajo topográfico es la estimación del error de un modelo digital. Para lo cual se evaluó la precisión de los MDT comparando el error estadístico entre las coordenadas de los puntos de verificación y las coordenadas de puntos homólogos en los MDT (Figura 5.17). Se calcularon cuatro parámetros de precisión para dichas mediciones: el error medio (ME), el cuadrado medio del error (RMSE), la desviación estándar de los errores (SDE) y el error absoluto máximo (E_{max}).

Primeramente, se ubicaron manualmente los puntos de verificación sobre el ortomosaico, de cada punto se extrajeron sus coordenadas X y Y en base al ortomosaico, y la coordenada Z en base al MDT. Las coordenadas se extrajeron en el sistema de referencia UTM zona 14N.

En el segundo paso se calcularon los residuales de los puntos, estimados como la diferencias entre las mediciones del modelo menos las tomadas con el GPS. Para el caso de los residuales (R) en cada eje se calcularon con la ecuación 12, los valores positivos en el eje Z indican sobreestimación de parte del MDT, los valores negativos en Z indican subestimación por parte del MDT; los residuales en el plano (X, Y, Z) se calcularon con la ecuación 13.

$$R_X = X_{mod} - X_{GPS}; R_Y = Y_{mod} - Y_{GPS}; R_Z = Z_{mod} - Z_{GPS} \quad (12)$$

$$.R_{(X,Y,Z)} = Coord_{.mod} - Coord_{.GPS} = \sqrt{(X_{mod} - X_{GPS})^2 + (Y_{mod} - Y_{GPS})^2 + (Z_{mod} - Z_{GPS})^2} \quad (13)$$

En el último paso se calcularon los cuatro parámetros de error: El error medio (Ecuación 14), cuadrado medio del error (Ecuación 15), desviación estándar de los errores (Ecuación 16) y el error absoluto (Ecuación 17):

$$ME = \frac{\sum_i^n (R)}{n} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i^n (R)^2}{n}} \quad (15)$$

$$SDE = \sqrt{\frac{\sum_i^n ((R) - ME)^2}{n - 1}} \quad (16)$$

$$E_{max} = \max|C_{mod} - C_{obs}| \quad (17)$$

Dónde: R: Residual; X_{mod} , Y_{mod} coordenadas X y Y extraídas del ortomosaico en los puntos de verificación; Z_{modelo} , alturas extraídas del MDT en los puntos de verificación; X_{GPS} , Y_{GPS} y Z_{GPS} : coordenadas de cada puntos de verificación medidas con el GPS RTK

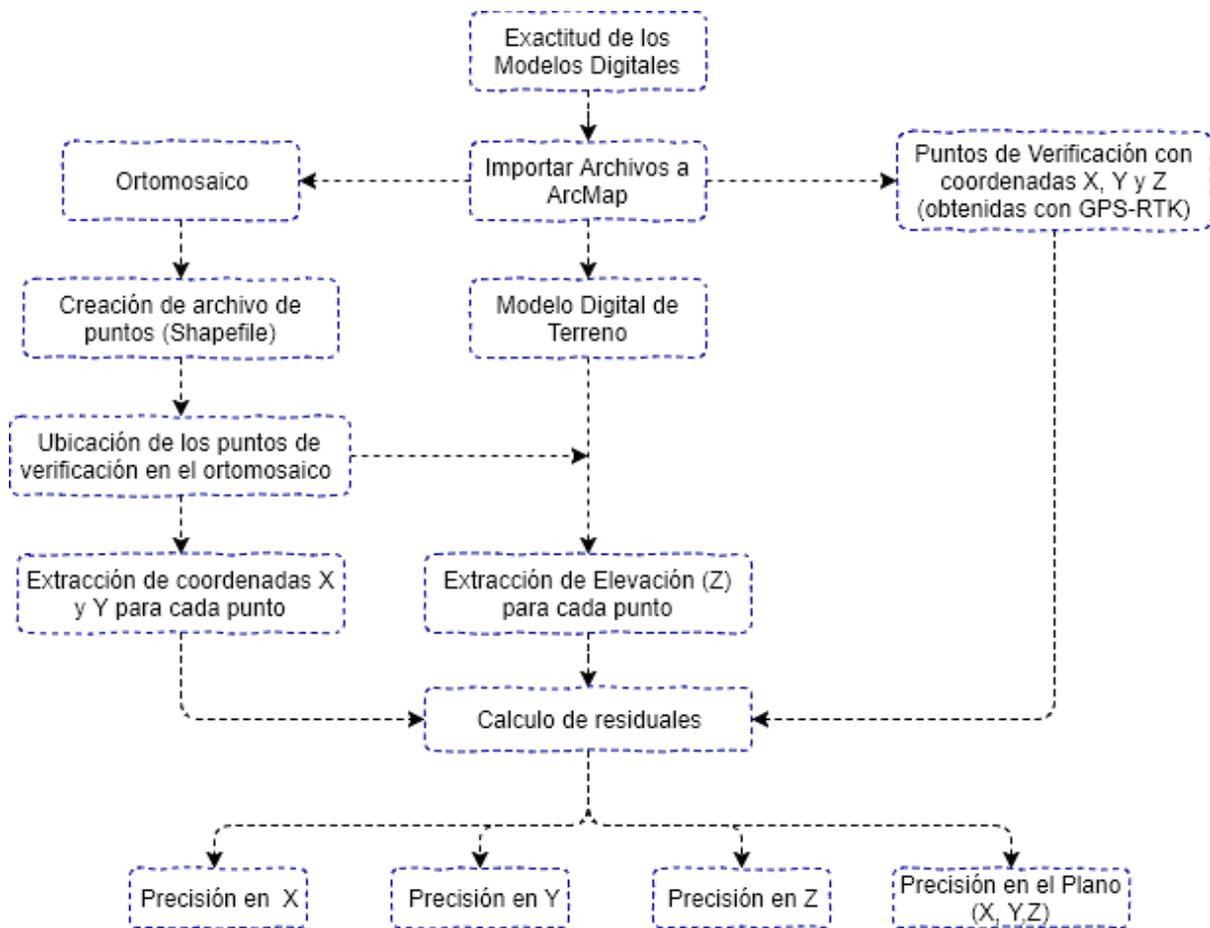


Figura 5.17. Flujo de trabajo para determinar la precisión de los modelos digitales

Una vez calculado el SDE para cada eje, este valor no debe ser entendido como el error máximo del MDT en ese eje, sino como un indicador del error global: asumiendo una distribución normal de los errores, el 68.27% de los errores se encuentran por debajo del SDE indicado, un 95.45% por debajo de 2 veces el SDE y un 99.76% por debajo de 3 veces el SDE.

5.5. RESULTADOS Y DISCUSIONES.

5.5.1. Procesamiento de las imágenes

El flujo de trabajo fotogramétrico con el VANT que incluyó las etapas de campo y gabinete se llevó a cabo en 21.5 h para Tlaola y 21.8 h para Chichahuaxtla (Figura 5.18). Del tiempo total requerido en el flujo de trabajo, la etapa del procesamiento de las imágenes demandó el 72.5 % en Tlaola y 47.2 % en Chichahuaxtla, lo cual equivale a 15.6 h y 10.3 h, respectivamente; el tiempo que demandó esta etapa estuvo en función de la calidad con que se generó la nube de puntos densa, por tanto, si la nube de puntos densa de Chichahuaxtla se hubiera generado en calidad media, esta etapa hubiera demandado un tiempo superior a 15.6 h, ya que se tienen más imágenes en Chichahuaxtla que en Tlaola. Nex & Remondino (2014) mencionan que el procesamiento de las imágenes es la etapa que mayor tiempo demanda de todo el flujo de trabajo fotogramétrico con VANTs, aproximadamente el 60 %.

En lo que respecta a las otras etapas, el levantamiento de los puntos de control (PC) y verificación (PV) demandó 14.0 % en Tlaola y 22.9 % en Chichahuaxtla; la adquisición de las imágenes que incluyen los tiempos de vuelo, de armado del dron, cambio de baterías y los tiempos de traslado hacia los puntos de despegue demandó el 11.2 % y 26.6 % para Tlaola y Chichahuaxtla, respectivamente; y la programación de las misiones de vuelo el 2.3 % y 3.3 %, respectivamente; no se contemplan los tiempos que se requirieron para trasladarse al sitio de estudio.

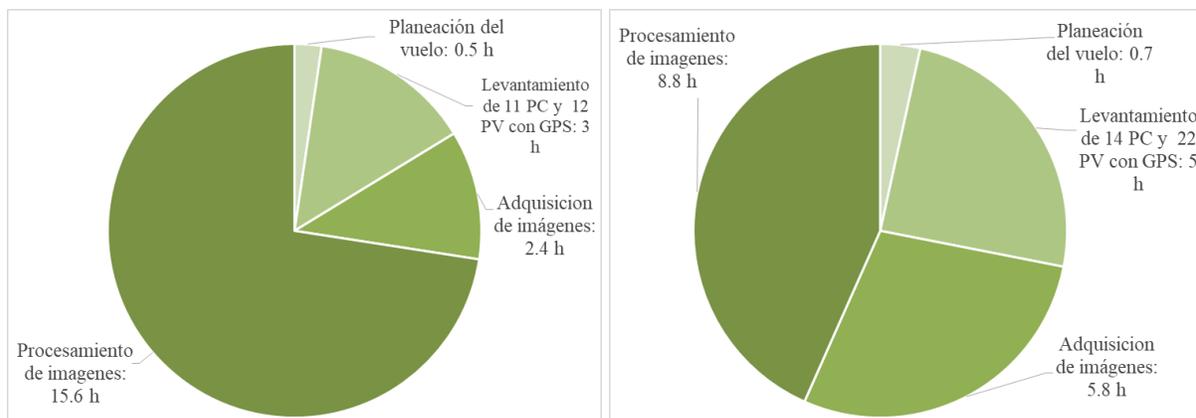


Figura 5.18. Tiempos empleados en el flujo de trabajo fotogramétrico con un VANT para 37.4 ha (Izquierda, Tlaola) y 64 ha (derecha, Chichahuaxtla)

De acuerdo a los resultados de la alineación de las imágenes, el número de imágenes traslapadas en toda el área de estudio no fue constante (Figura 5.19), en los límites de las zonas de estudio el número de imágenes traslapadas (<9 imágenes) fue menor que en las zonas centrales; lo anterior ocasionó que en estas zonas de límite exista distorsión de los objetos en el ortomosaico y errores en las elevaciones en los modelos digitales (Figura 5.20), provocando así que las

mediciones realizadas (en los tres ejes) en estas zonas fueran menos precisas que las realizadas en las zonas centrales.

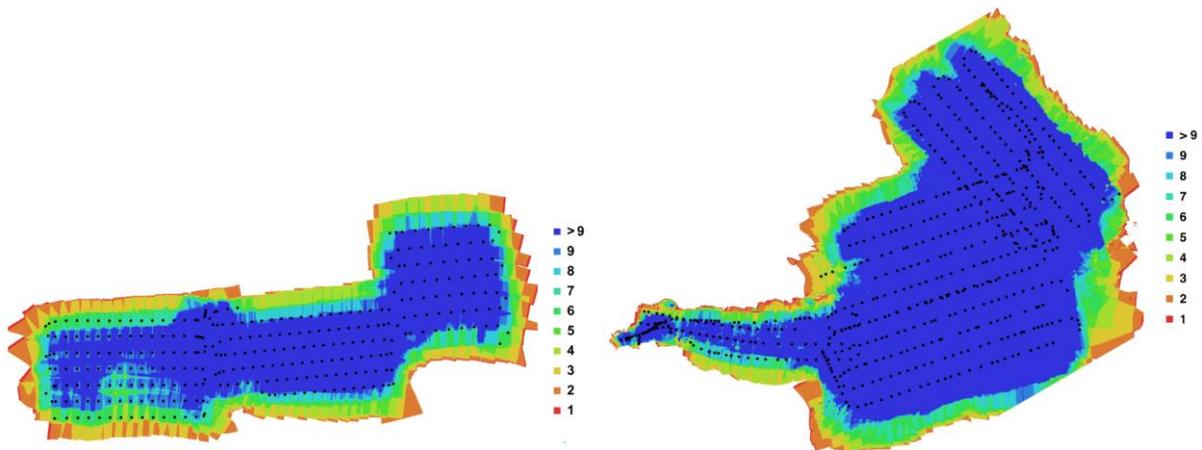


Figura 5.19. Ubicación y superposición de imágenes para Tlaola (Izquierda) y Chichahuaxtla (derecha)



Figura 5.20. Diferentes niveles de distorsión en un ortomosaico debido al grado de traslape entre imágenes, Zona central del ortomosaico con alto grado de traslape y distorsión ligera (izquierda), Zona periférica del ortomosaico con bajo traslape y alta distorsión (derecha).

Dentro de la etapa de procesamiento de las imágenes la discretización de cada nube de puntos densa en tres clases fue un paso fundamental para obtener los modelos que representan la topografía de los sitios de estudio. La discretización automática con PhotoScan presentó muchos errores de clasificación, sin embargo, se corrigieron manualmente, los errores se debieron principalmente a que la discretización automática funciona correctamente en terrenos planos. Esta discretización permitió triangular únicamente los puntos de terreno para generar los MDT, además de separar los puntos ruido, los cuales si llegan a triangularse pueden generar errores en las elevaciones de los modelos (Peinado, Fernández, & Agustín, 2014). Estos puntos ruido se encontraron principalmente sobre la superficie de los ríos que atraviesa los poblados. En la Figura 5.21 se muestra la discretización de una nube de puntos, se observa que la clase con mayor número de puntos es el de objetos ya que los vuelos se realizaron sobre poblaciones semiurbanas.

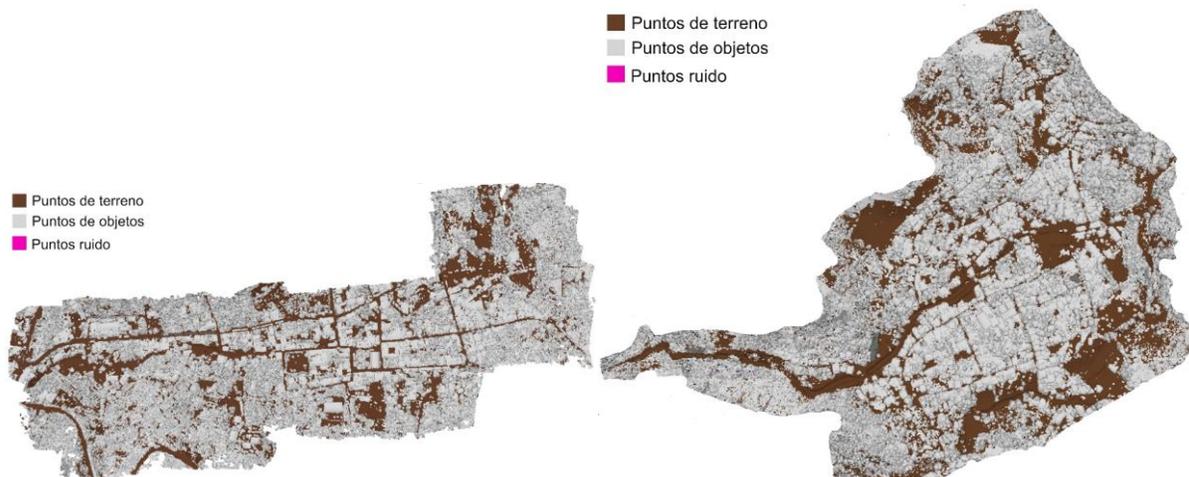


Figura 5.21. Discretización de nube de puntos del terreno para Tlaola (izquierda) y Chicahuaxtla (derecha)

De las 8 restituciones fotogramétricas para cada poblado se obtuvieron los resultados mostrados en el Cuadro 9. La resolución espacial de los ortomosaicos de Tlaola fueron de 2 cm/píxel (Figura 5.22), y 2.9 cm/píxel de los de Chicahuaxtla (Figura 5.23); en el caso de los modelos digitales se obtuvo una resolución de 8.39 cm/píxel en Tlaola (Figura 5.24) y 21 cm/píxel en Chicahuaxtla (Figura 5.25); se observa que las resoluciones de los modelos digitales son diferentes a los de los ortomosaicos ya que la resolución de los modelos digitales dependió de la altura a la que se adquirieron las imágenes y de la calidad con que se generó la alineación de las imágenes y la nube de puntos densa, mientras que la resolución del ortomosaico dependió únicamente de la altura a la que se adquirieron las imágenes.

Cuadro 9. Características de los procesamientos fotogramétricos de las imágenes.

Características		Tlaola	Chicahuaxtla
Superficie (ha)		37.4	61
Número de imágenes procesadas.		317	626
Número de MDT, MDS y Ortomosaicos		8	8
Puntos en la nube densa	Total:	64, 820,000	21, 240, 256
	De terreno	27, 702,639	8, 569, 852
	De objetos:	37, 039,889	12, 601, 006
	Ruido:	77, 472	69, 398
Resolución espacial de los MDS y MDT		8.39 cm/píxel (142 puntos/m ²)	21 cm/píxel (21 puntos/m ²)
Resolución espacial de los ortomosaicos		2 cm/píxel	2.9 cm/píxel



Figura 5.22. Ortomosaico de Tlaola



Figura 5.23. Ortomosaico de Chichahuxtla

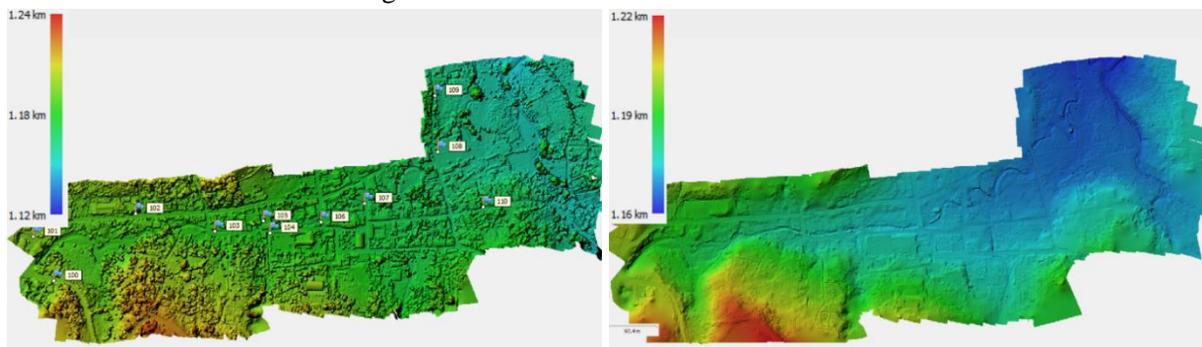


Figura 5.24. Modelo digital de superficie y de terreno de Tlaola

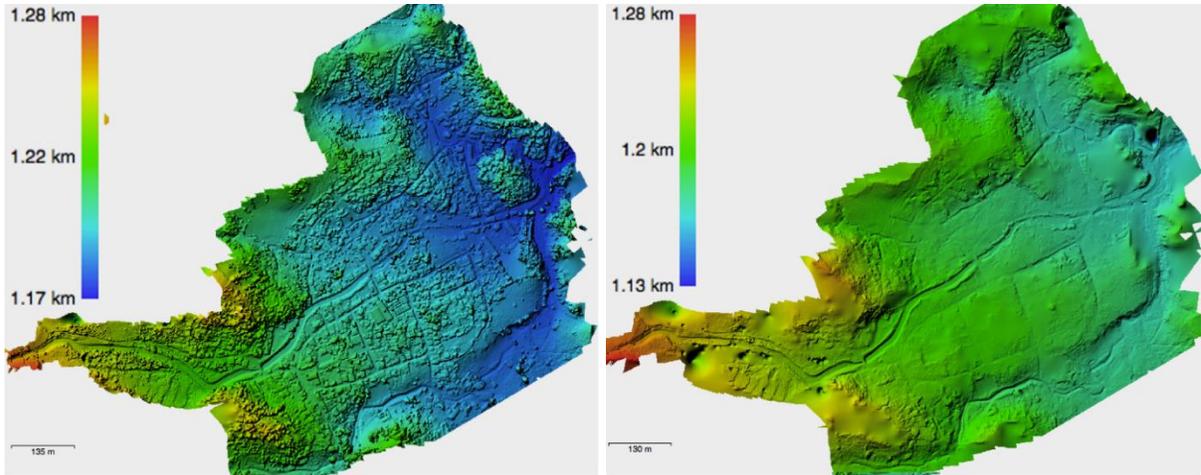


Figura 5.25. Modelo digital de superficie y de terreno de Chicahuaxtla

5.5.2. Precisión de los modelos

a) Tlaola

El error medio (EM) del MDT generado con cuatro puntos de control fue inferior a 11 cm en los ejes X y Y, en tanto que en el eje Z fue superior a 2 m; este MDT sobreestimó en gran medida las elevaciones del terreno lo que indica que el número de puntos de control utilizados para su georeferenciación no fueron suficientes, sin embargo, los errores en X y Y no logran ser tan grandes debido a que en estos ejes influye más el porcentaje de traslape entre imágenes que el número de puntos de control. Para el resto de los MDT los valores de EM en los tres ejes fueron inferiores a 2 cm, lo cual muestra que el número de puntos y su distribución son importantes para determinar la precisión de los modelos, ya que aparte de usar puntos de control en las esquinas se usaron también cerca del centro de la zona de estudio.

En los análisis con el estimador cuadrado medio del error (RMSE) se encontró que los MDT presentan un error mayor en la vertical que en la horizontal. Los MDT con cuatro puntos de control presentan un RMSE mayor de un metro en el eje Z; los procesados con cinco o más puntos de control presentan errores menores de 5, 4 y 12 cm en los ejes X, Y y Z respectivamente. Esto resalta la importancia de contar con puntos de control en la zona central del área de estudio. El estimador RMSE a comparación del ME amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud.

Al ser mayores los errores en la vertical que en la horizontal de estos modelos digitales, diversos autores han cuantificado el error únicamente en este eje, con el apoyo de un dron multirrotor, Tamminga *et al.* (2014) encontraron un RMSE de 8.8 cm; Uysal, Toprak, & Polat (2015) de 6.6 cm, Hugenholtz *et al.* (2013) al utilizar un dron de ala fija encontraron un RMSE de 29 cm. Lo cual muestra que la precisión en los tres ejes de los modelos digitales generados de fotogrametría con drones puede llegar a ser menor de 10 cm, Nex & Remondino, (2014) mencionan que el RMSE de estos modelos generalmente es de 2 a 3 veces el tamaño del pixel de las imágenes adquiridas (o de la resolución espacial del ortomosaico); en este caso, los modelos georeferenciados con 9, 10 y 11 puntos de control tienen RMSE menores a 10 cm en los tres ejes, sin embargo, únicamente el georeferenciado con 11 puntos de control tiene un RMSE (5.9 cm) menor de 3 veces la resolución del ortomosaico (2 cm/pixel), por tanto, este último podría representar con alta precisión la topografía del sitio.

Ya que el MDT referenciado con 11 puntos de control es el de mejor precisión y el que mejor representa la topografía del sitio, de acuerdo a la desviación estándar de los errores, cerca de 25.53 ha (68.27% de la superficie total) de este MDT tienen una precisión en el eje Z menor a 5.8 cm, 35.70 ha (95.45%) tienen una precisión menor a 11.6 cm y 37.31 ha tienen una precisión menor a 17.6 cm.

El E_{max} al igual que los demás estimadores fue mayor en el eje Z (Cuadro 10), el máximo error absoluto que se encontró en todos los MDT en el plano (X, Y, Z) fue en el punto de verificación PV-10, debido a que se ubica en una zona (cerca del borde) con menos de seis imágenes

traslapadas, mientras que los demás puntos presentan al menos 9 imágenes para la restitución fotogramétrica. En los levantamientos fotogramétricos cerca del borde del área levantada el número de imágenes traslapadas es menor con respecto a la zona central, por tanto es conveniente que la misión de vuelo se programe para una superficie mayor de la zona de interés, de tal manera que se garantice una cantidad mínima (9 imágenes) de imágenes traslapadas; por otro lado se debe evitar ubicar puntos terrestres cercanos a los límites de la zona de interés.

Los valores de los cuatro estimadores del error disminuyen cuando se incrementa la cantidad de puntos de control (Figura 5.26), además la precisión en todo el modelo va siéndose más uniforme, esto se puede observar en el estimador de la desviación estándar del error (SDE) que llega a ser de 3 cm en el plano (X, Y, Z) en el MDT procesado con 11 puntos de control.

Cuadro 10. Precisión en cm de los Modelos digitales por procesamiento para Tlaola

Eje	Parámetros	Número de puntos de control							
		4a	4b	5	6	8	9	10	11
X	ME	6.5	1.1	-0.4	1.7	0.5	0.0	-0.1	0.3
	RMSE	9.4	3.1	4.3	5.2	3.0	3.7	3.7	2.1
	SDE	7.1	3.1	4.5	5.1	3.0	3.8	3.8	2.2
	E _{max}	16.2	7.6	9.4	10.9	5.3	7.4	10.2	4.1
Y	ME	10.5	-0.7	0.0	0.9	0.6	-0.1	0.0	1.3
	RMSE	11.6	7.4	3.2	3.0	2.7	3.3	3.8	3.0
	SDE	6.8	7.4	3.4	3.0	2.7	3.4	3.9	2.8
	E _{max}	17.8	15.7	6.0	6.4	5.8	6.2	7.4	6.9
Z	ME	275.5	-38.4	0.0	1.5	1.2	0.3	-0.6	2.1
	RMSE	304.1	111.1	12.2	11.2	10.5	7.7	6.6	5.9
	SDE	134.5	108.8	12.8	11.6	10.9	8.0	6.9	5.8
	E _{max}	400.7	231.0	30.0	29.0	27.0	18.0	12.2	10.9
X, Y, Z	ME	276.0	94.0	10.9	10.0	9.0	7.6	7.5	6.2
	RMSE	304.5	111.3	13.4	12.7	11.2	9.1	8.5	7.0
	SDE	134.2	62.3	8.2	8.1	7.1	5.2	4.2	3.2
	E _{max}	401.2	231.6	32.0	31.3	27.7	20.3	14.4	11.7

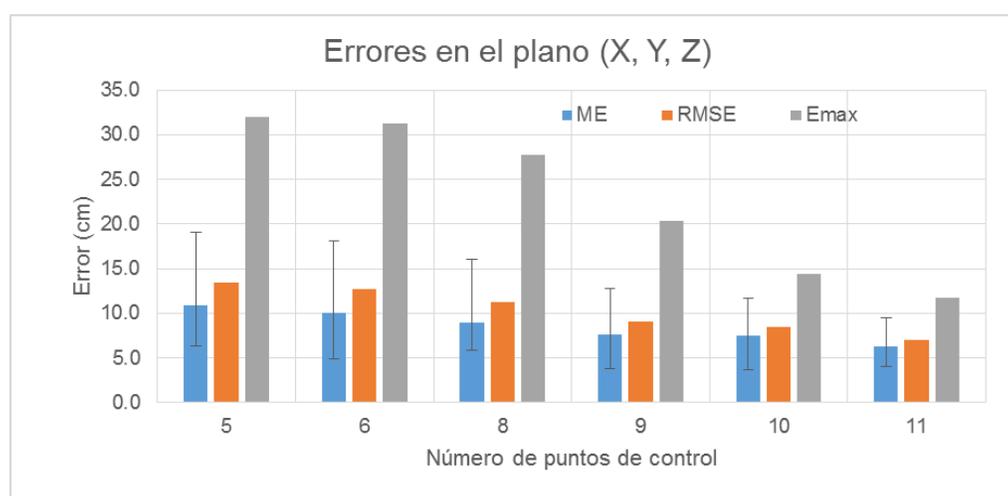


Figura 5.26. Precisión en el plano (X, Y, Z) de los modelos para Tlaola por punto de control

b) Chicahuaxtla

El error medio (ME) de los MDT generados con cuatro puntos de control fue inferior a 16 cm en los eje X y Y; en el eje Z fue inferior a 11 centímetros. Por otro lado, en el resto de los MDT el error medio en los tres ejes es inferior de doce centímetros.

En los análisis con el estimador RMSE se encontró que el MDT *4a* posee errores superiores a los 50 cm en los eje X y Y, y de 18 cm en el eje Z; los mayores errores se encuentran en la horizontal; sin embargo, el MDT procesado de igual manera con cuatro puntos de control (*4b*) pero con diferente distribución sobre el terreno, presenta errores menores de 7 cm en los ejes X y Y, y de 16 cm en la horizontal, lo cual indica un error mayor en la vertical que en la horizontal contrario a lo que sucede con el otro modelo procesado con la misma cantidad de puntos de control.

Los modelos procesados con cinco o más puntos de control presentan errores (RMSE) que van desde los 48 cm hasta los 9 cm en el eje X, de 71 cm hasta 4 cm en el eje Y, y de 14 cm hasta 11 cm en el eje Z. Lo anterior muestra que no siempre los errores son menores en la horizontal (como sucede para el poblado de Tlaola) excepto en los modelos procesados con 10, 12 y 14 puntos de control. Lo cual indica que la distribución de los puntos de control sobre el terreno definen la precisión en la horizontal y el número de puntos de control definen la precisión en el eje Z.

De todos los MDT ninguno tiene un RMSE en Z menor a 3 veces la resolución espacial del ortomosaico, es decir, menor a 8.7 cm, por lo cual se puede concluir que hicieron falta más puntos de control para georeferenciar el modelo digital.

El máximo error (RMSE) que se encontró en todos los MDT fue en el punto de verificación V1 el cual llego a ser hasta de 5.7 m en X, 12.7 en Y y 23 cm en Z en el modelo 4a, esto ocurre porque se tiene un único punto de control cercano a este en los MDT con 4b, 10, 12 y 14 puntos de control.

Los valores de los cuatro estimadores de error en el plano (X, Y, Z) disminuyen cuando se incrementa la cantidad de puntos de control (Figura 5.27) exceptuando el modelo 4b.

Cuadro 11. Precisión en cm de los Modelos digitales por procesamiento para Chicahuaxtla

Eje	Parámetros	Número de puntos de control							
		4a	4b	5	6	8	10	12	14
X	ME	15.6	-1.2	12.4	11.2	5.9	-2.7	-1.3	-1.0
	RMSE	52.6	5.6	47.9	46.6	28.4	8.8	9.4	9.3
	SDE	51.5	5.6	47.4	46.4	28.4	8.6	9.5	9.4
	E _{max}	238.4	14.0	218.5	212.5	128.0	38.1	37.0	36.5
Y	ME	-3.3	-4.6	10.8	11.1	5.8	-4.3	-1.6	-1.7
	RMSE	81.6	6.5	71.6	69.4	48.2	5.8	4.6	4.1
	SDE	120.7	6.4	97.8	94.7	66.2	5.3	5.9	5.2
	E _{max}	355.9	13.5	325.6	316.1	219.3	10.9	10.7	7.8
Z	ME	5.8	-11.3	-1.5	-6.2	-7.5	-6.5	-6.1	-8.3

	RMSE	18.3	16.6	13.6	15.4	13.3	12.7	11.9	11.8
	SDE	17.7	12.5	13.8	14.4	11.3	11.2	10.5	8.6
	E _{max}	48.2	32.6	32.2	43.2	27.2	28.0	27.0	20.3
X, Y, Z	ME	48.5	16.6	31.5	30.7	25.1	14.8	13.6	13.8
	RMSE	98.8	18.7	87.2	85.0	57.5	16.5	15.8	15.5
	SDE	119.0	11.9	112.4	109.4	71.5	10.3	11.3	9.9
	E _{max}	431.1	32.7	393.4	383.3	255.4	38.3	37.6	37.2

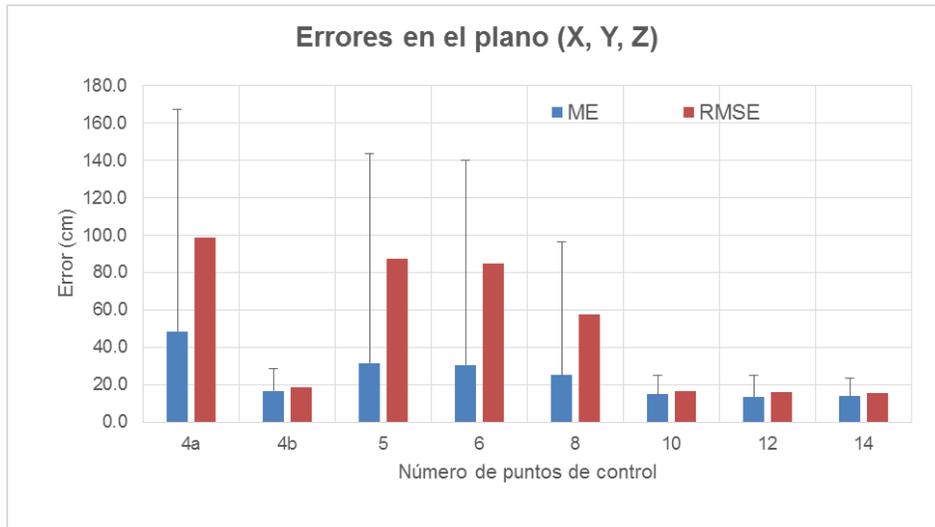


Figura 5.27. Precisión en el plano (X,Y,Z) de los modelos para Chicahuaxtla por punto de control

5.5.3. Topografía

La topografía de las dos localidades se obtuvieron con precisión en la mayor parte del área de estudio; sin embargo, existieron zonas en las que no fue posible. En tipos de superficies despejadas (Figura 5.28), vegetación aislada (Figura 5.29) y zonas urbanas, (Figura 5.30) sí fue posible obtener la topografía con precisión; en superficies cubiertas de vegetación densa no fue posible ya que la cubierta vegetal no permitió que se obtuvieran puntos sobre el terreno (Figura 5.31), por tanto en estas zonas el MDT no representa correctamente el terreno, por lo que el levantamiento topográfico debió apoyarse de puntos tomados con estaciones totales u otro tipo de tecnología; en los cuerpos de agua no fue posible obtener directamente la topografía (Batimetría), la elevación que se obtuvo en estos cuerpos no fue del fondo ni de la superficie sino una elevación intermedia que dependió de la cantidad de sedimentos que contenía el cuerpo de agua; una alternativa para obtener la batimetría en ríos de grava y arena mediante la técnica fotogramétrica lo proponen Westaway, Lane, & Hicks (2001).

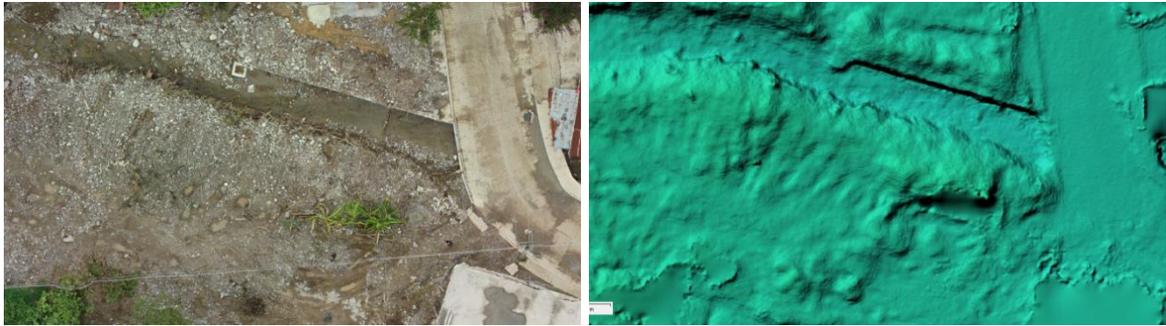


Figura 5.28. Topografía en zonas despejadas

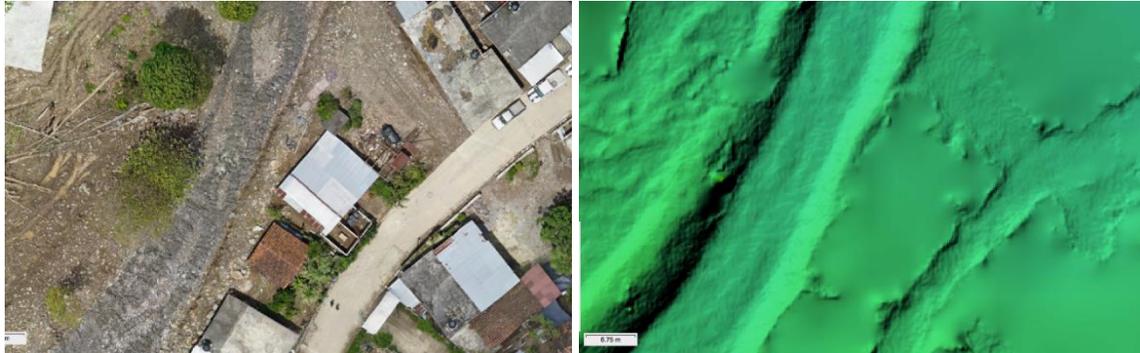


Figura 5.29. Topografía en vegetación aislada



Figura 5.30. Topografía en zonas urbanas

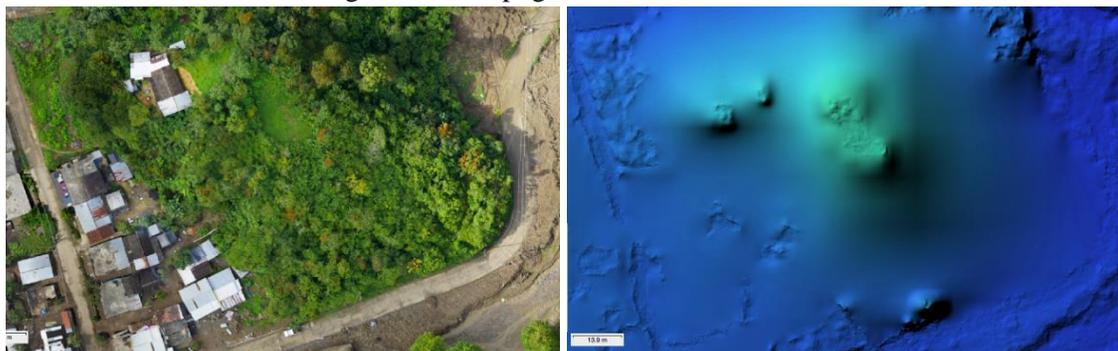


Figura 5.31. Topografía en vegetación densa

El número de puntos de control, la ubicación de estos, el porcentaje de traslape entre imágenes y la discretización de la nube de puntos densa fueron los aspectos más importantes de todo el flujo de trabajo fotogramétrico con el VANT, ya que definieron en gran medida la calidad y

precisión de la topografía de los sitios de estudio. Se encontró que se deben ubicar al menos 5 puntos de control repartidos estratégicamente en toda la zona de estudio, tanto en la zona central como en las esquinas. Las marcas de los puntos de apoyo deben aparecer claramente identificados en las imágenes. La gestión y discretización de la nube de puntos se debe hacer en tres clases: terreno, objetos y ruido, se deben eliminar los puntos ruido y realizar el mallado únicamente con puntos de terreno para generar el MDT. Los puntos de verificación jugaron un papel importante, ya que permitieron conocer la precisión de los modelos digitales.

En lo que se refiere al manejo de los modelos digitales en el software CAD, se observó que fue mejor cuando se manejó en formato raster ya que no se perdió la resolución espacial; esto ayudó a que en los perfiles se observaran hasta los detalles más pequeños de la superficie. Los planos de vista en planta y perfil longitudinal se presentan en el **Anexo 9.3**.

5.6. CONCLUSIONES

El flujo de trabajo fotogramétrico con el VANT que incluyó las etapas de campo y gabinete se llevó a cabo en 21.5 h para Tlaola y 21 para Chicahuaxtla; el procesamiento de las imágenes fue la etapa que mayor tiempo demandó, aproximadamente el 73 % en Tlaola y 48 % en Chicahuaxtla, el tiempo que demandó esta etapa estuvo en función de la calidad con que se generó la nube de puntos densa. La etapa que menor tiempo demandó fue la programación de las misiones de vuelo, 2.3 % en Tlaola y 3.3 % en Chicahuaxtla.

Dentro de la etapa de procesamiento de las imágenes, la discretización de la nube de puntos densa en tres clases (objetos, terreno y ruido) fue el paso más importante para obtener los Modelos Digitales de Terreno (MDT). La discretización automática con PhotoScan presenta muchos errores de clasificación que deben corregirse manualmente, la discretización automática funciona correctamente en terrenos o superficies planas.

Los MDT derivados de la fotogrametría con el VANT resultaron con resoluciones espaciales de 8.4 cm/píxel (Tlaola) y 21 cm/píxel (Chicahuaxtla), lo cual equivale a 142 y 21 puntos/m², respectivamente, estos MDT brindan un nivel de detalle que no es posible obtener con equipos topográficos tradicionales en el mismo tiempo. La resolución espacial de estos modelos digitales dependió de la altura de vuelo y de la calidad con que se generó la alineación de las imágenes y la nube de puntos densa, y la resolución espacial de los ortomosaicos (2.0 cm/ píxel en Tlaola y 2.9 cm/píxel en Chicahuaxtla) dependió únicamente de la altura de vuelo a la que se adquirieron las imágenes.

En 12 de los 16 MDT los RMSE más grandes se presentaron en el eje Z, 7 MDT sobreestimaron elevaciones. El número de puntos de control y la ubicación de estos influyeron en la precisión de los MDT; la precisión en el eje Z dependió del número de puntos de control que se utilizó para georeferenciar los MDT, el RMSE en este eje disminuyó cuando se aumentó el número de

puntos de control; los MDT georeferenciados con cuatro puntos de control presentaron RMSE desde 3 m hasta 16.6 cm, los georeferenciados con cinco hasta 14 puntos presentaron RMSE desde 15.4 cm hasta 5.9 cm, solamente un MDT presento un RMSE en el eje Z menor de 3 veces el tamaño del pixel del ortomosaico, fue el de Tlaola referenciado con 11 PC que tuvo un RMSE de 5.9 cm, por lo cual este MDT se consideró como el único que tuvo valores aceptables de precisión.

Lo anterior indica, que la fotogrametría con VANTs permite obtener modelos digitales de alta precisión en el eje Z, alrededor de centímetros, pero se debe cuidar el número de puntos de control necesarios para obtener MDT con precisiones aceptables (<3 veces el tamaño de pixel del ortomosaico), por lo cual se deben ubicar para 15 ha o menos 5 puntos de control repartidos estratégicamente, tanto en la zona central como en las esquinas, y agregar un punto de control por cada 3 ha extras.

En lo que se refiere a las precisiones en X y Y, también se encontraron precisiones de centímetros, estas precisiones dependieron de la ubicación de los puntos de control en el terreno, cuando se usaron puntos de control cuya distancia a otro punto más cercano era superior de 500 m se encontraron precisiones desde 81 cm hasta 9.4 cm, en caso contrario las precisiones fluctuaron desde 11.3 cm hasta 2.1 cm; de los 16 MDT, 11 tienen precisiones menores de 10 cm en los ejes X y Y, en Chichahuaxtla 2 tienen precisiones menores de 8.4 cm y en Tlaola 6 tienen precisiones menores a 6 cm, por lo cual se consideró que solamente 8 MDT de 16 tienen precisiones aceptables en los ejes X y Y, ya que sus precisiones son 3 veces menores al tamaño del pixel de los ortomosaico. Lo anterior indica que se puede obtener con gran precisión la planimetría de un terreno mediante fotogrametría con VANTs, sin embargo, se debe cuidar que la distancia entre un punto de control y el más cercano a este no sea superior a 500 m, además de mantener el porcentaje de traslape entre imágenes del 75 %.

La topografía (MDT) obtenida mediante fotogrametría con VANTs es de alta resolución espacial, alta precisión y se obtiene en tiempos más cortos que con las tecnologías convencionales como las estaciones totales, GPS o niveles, sin embargo, el uso de esta nueva tecnología en el campo de la topografía se restringe a ciertas superficies, de acuerdo a este trabajo, esta tecnología se puede emplear para obtener la topografía de superficies despejadas, con vegetación aislada o zonas urbanas, en superficies cubiertas de vegetación densa no es posible, ya que la cubierta vegetal no permite obtener puntos sobre el terreno, en los cuerpos de agua no es posible obtener directamente la batimetría. Por tanto, los VANTs no reemplazan el uso de los GPS, las Estaciones Totales, los niveles, etc., sino que son un complemento a las tecnologías existentes.

VI. CUANTIFICACIÓN DE DAÑOS CAUSADOS POR UNA INUNDACIÓN, USANDO INFORMACIÓN OBTENIDA DESDE UN VANT

6.1. INTRODUCCIÓN

La cartografía es el conjunto de estudios y operaciones científicas, artísticas y técnicas que intervienen, a partir de los resultados de las observaciones directas o indirectas, en el establecimiento de mapas, planos y otras formas de expresión, así como en su utilización (Joly, 1979). La cartografía, como muchas otras disciplinas; ha venido experimentando transformaciones desde la llegada de la computadora, y los modernos equipos para realizar levantamientos topográficos junto a otras técnicas y herramientas de procesamiento de la información.

Este desarrollo tecnológico ha impulsado su transformación y lo ha convertido en una fuente de información para el ordenamiento territorial, extracción de estadísticas poblacionales, detección de problemas, y otros datos (Lerma, 2013) que sirven en la toma de decisiones. Sin embargo, los métodos topográficos que se implementan actualmente (estación total, nivel, teodolito) para adquirir la información son bastante costosos en términos de tiempo, precisión y dinero o brindan resoluciones gruesas en el caso de las imágenes de satélite o es la falta de información en todo el espectro visible en el caso del LiDAR (Quirós, 2014); para enfrentar estos problemas deben implementarse soluciones donde la información catastral se levante mediante GPS, y vehículos aéreos no tripulados (VANTs) y se integre en sistemas de información geográfica.

El uso de los VANTs presentan ventajas considerables en la adquisición de la información sobre las tecnologías convencionales, se reduce el trabajo de campo, se tiene mayor cobertura en menos tiempo y aumenta la capacidad para levantar superficies inaccesibles, (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003); en comparación con imágenes de satélites la resolución espacial es de unos cuantos centímetros, debido principalmente a la altura en que se adquieren las imágenes y no se tienen problemas por nubosidad; además es posible obtener en un mismo procesamiento modelos digitales de elevación y ortomosaico de alta precisión, ya sean visibles, infrarrojas o térmicas. Estas ventajas hacen que estas tecnologías estén siendo utilizadas con éxito en la minería, monitoreo de cultivos, bosques, inspección de obra civil e investigaciones medioambientales (Martínez *et al.*, 2015) y en el análisis de datos de variabilidad espacio-temporal, como sucede en desastres naturales.

En este sentido, en este trabajo se analizó los daños causados por la inundación ocurrida en el mes de agosto del 2016 en el poblado de Chicahuaxtla a partir del análisis multitemporal de imágenes satelitales y un ortomosaico (generado con imágenes tomadas desde un VANT), dicha inundación se provocó debido al desbordamiento del río Zempoloantongo lo cual afecto estructuras y construcciones que se ubican cerca de las márgenes de dicho río.

6.2. OBJETIVOS

- ❖ Desarrollar y validar una metodología para cuantificar los daños causados por inundaciones en poblaciones semiurbanas a partir de imágenes obtenidas desde un VANT.
- ❖ Cuantificar los daños y cambios causados por la inundación ocurrida en la localidad de Chicahuaxtla mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite y ortomosaicos generados con imágenes obtenidas desde un VANT

6.3. METODOLOGÍA

En la Figura 6.1 se presenta un diagrama de flujo que muestra la metodología que se siguió para clasificar las imágenes del área de estudio en cinco clases de uso de suelo: vegetación, construcciones, carreteras, cauce y otros, el método utilizado fue el de análisis digital de imágenes orientado a objetos (OBIA, *Object Based Image Analysis*). Se usó una imagen satelital para cartografiar el poblado antes de la inundación y un ortomosaico (VANTs) que refleja el estado actual después del evento. La metodología se divide en tres fases: i) adquisición y procesamiento de la información, ii) segmentación y clasificación de las imágenes (antes y después del evento) y iii) análisis de cambios.

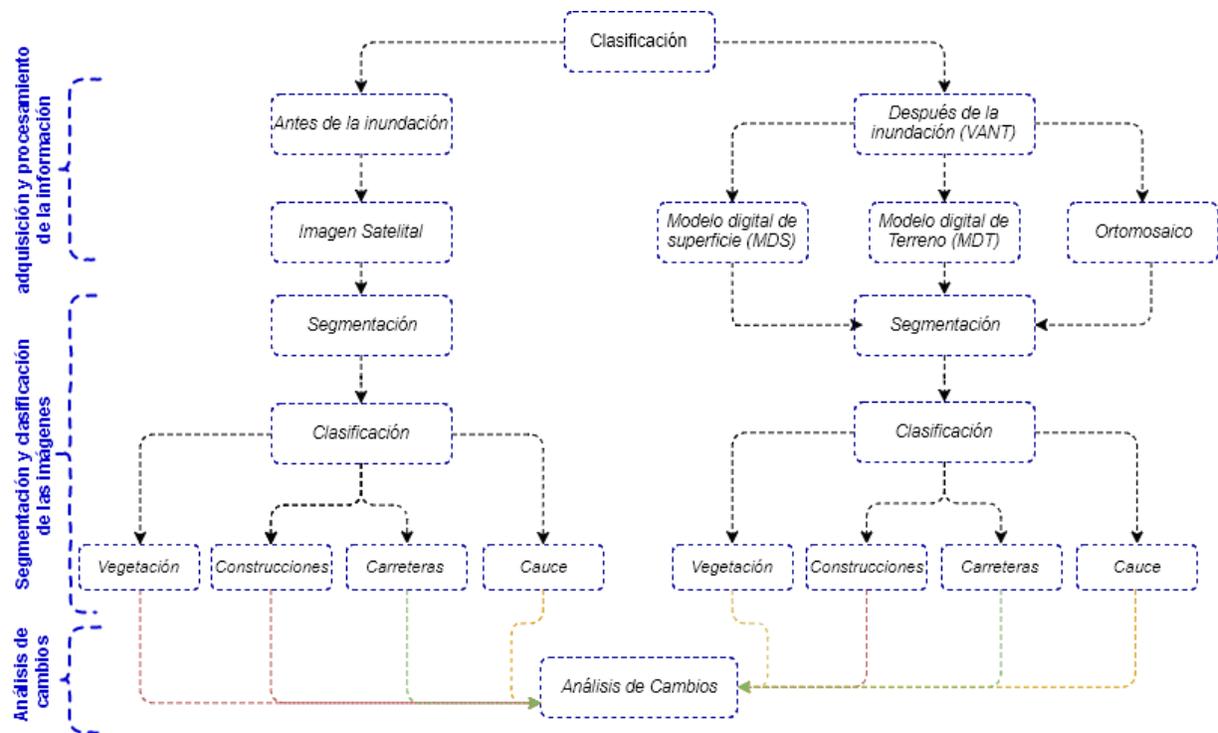


Figura 6.1. Metodología general para la cartografía.

El análisis orientado a objetos, OBIA, permite estudiar las imágenes remotas atendiendo a criterios espaciales y espectrales (Peña *et al.*, 2013). A diferencia de los métodos basados en píxeles, mediante OBIA, se segmentan las imágenes agrupando píxeles en objetos, otorgándoles atributos y estadísticas que faciliten la clasificación de las mismas (Caballero-Novella *et al.*, 2015). Este método de análisis orientado a objetos ha sido empleado en distintas disciplinas y para diferentes aplicaciones de manera exitosa, por ejemplo: en monitoreo de cultivos (Torres-Sánchez *et al.*, 2015); cartografía de áreas afectadas por incendio (González, Quintano, & Edemir, 2009); discriminación de uso del suelo (Perea, Meroño, & Aguilera, 2009); mapeo de zonas geomorfológicas y ecológicas en los arrecifes de coral (Phinn, Roelfsema, & Mumby, 2012), entre otros.

El análisis de imágenes orientado a objetos presenta dos etapas fundamentales: la segmentación de la banda o bandas de entrada, y la posterior clasificación de los segmentos previamente definidos. Se usó el algoritmo de segmentación *Multiresolution Segmentation* (Liu & Yang, 1994), con la cual los segmentos son creados en base a tres criterios: escala, color y forma (suavidad y compactibilidad) (González, Quintano, & Edemir, 2009). La clasificación de los segmentos en distintas clases se describe con más detalle en los siguientes puntos. El algoritmo de segmentación y los de clasificación utilizados en el análisis de las imágenes se generaron en el programa eCognition Developer 9 (Trimble GeoSpatial, Munich, Alemania).

6.3.1. Área de estudio

En el presente trabajo se ha considerado como estudio de caso el poblado de Chichahuaxtla del cual se seleccionó un área que cubre 75 m sobre ambas márgenes del río Zempoloantongo (Figura 6.2), esta zona es donde mayor afectación hubo por la inundación.

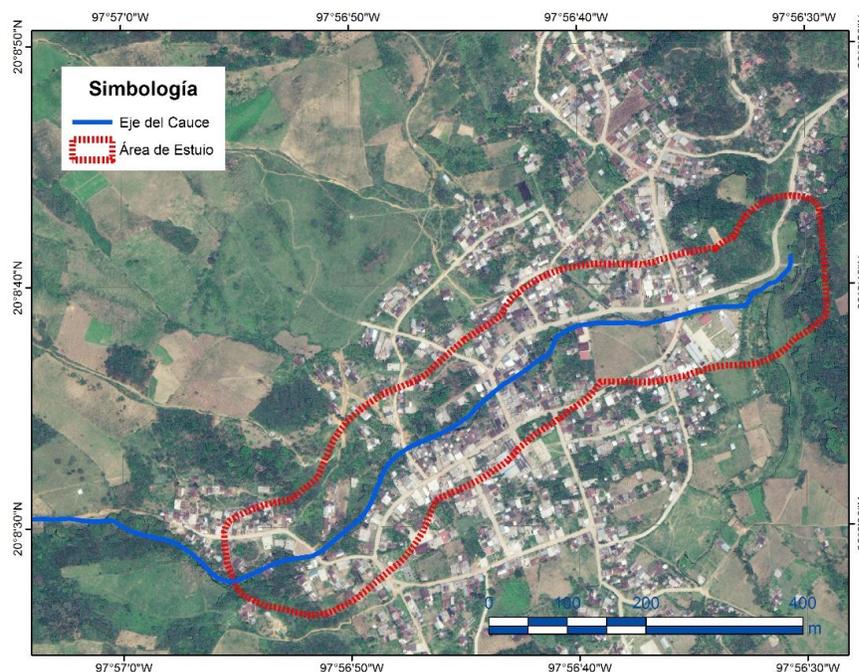


Figura 6.2. Área de estudio superpuesta sobre una imagen satelital WorldView-3

6.3.2. Imágenes satelitales y ortomosaicos

Se usaron dos imágenes con el fin de comparar los cambios que ocurrieron en la población después de la inundación: una Imagen satelital WorldView-3 en falso color de 30 cm/píxel de resolución espacial del mes de abril del 2016 (Figura 6.2), y un ortomosaico generado con imágenes adquiridas desde un VANT, del mes de septiembre del 2016 con resolución espacial de 2.9 cm/píxel (Figura 5.23).

Ambas imágenes están en el espacio de color RGB, donde cada píxel está formado por tres valores, los correspondientes a los canales rojo (R), verde (G) y azul (B), dichos valores se sitúan en tonos de grises que oscilan en el rango de 0 a 255, donde 0 se corresponde al negro, y 255 al blanco.

Además, en el caso del mes de septiembre se cuenta con un modelo digital de superficie y uno de terreno (Figura 5.25) con resolución espacial de 8 cm/píxel los cuales fueron generados mediante las imágenes obtenidas desde un VANTs. Las imágenes y los modelos digitales fueron recortados en base al polígono del área de estudio.

6.3.3. Clasificación de imagen satelital (antes de la inundación)

Primeramente, se importó la imagen satelital al programa eCognition; la clasificación de esta imagen se dividió en cinco clases de uso de suelo: vegetación, construcciones, carreteras, cauce y otros.

a) Vegetación

Se segmentó la imagen usando el algoritmo *Multiresolution Segmentation*, se asignó un peso de uno a las tres bandas, los valores asignado a los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 0.25, 0.1 y 0.5, respectivamente.

Para diferenciar entre objetos de vegetación y otros tipos de cobertura de suelo en imágenes RGB, se han usado diversos índices de vegetación, como el índice de exceso de verde (ExG, excess green index) (Woebbecke *et al.*, 1995), índice de vegetación verde (VIg, vegetation index green) (Gitelson *et al.*, 2002), índice de extracción de color de la vegetación (CIVE, color index of vegetation extraction) (Kataoka *et al.*, 2003), entre otros. En este caso, se usó el ExG ya que con este índice se han obtenido los mejores resultados en trabajos de discriminación de la vegetación (Ponti, 2013; Torres-Sánchez *et al.*, 2014).

$$ExG = 2g - r - b \quad (18)$$

$$VIg = \frac{g - r}{g + r} \quad (19)$$

$$CIVE = 0.441r - 0.811g + 0.385b + 18.78745 \quad (20)$$

$$r = \frac{R}{R+G+B} \quad g = \frac{G}{R+G+B} \quad b = \frac{B}{R+G+B} \quad (21)$$

$$R = \frac{R}{R_{max}}; G = \frac{G}{G_{max}}; B = \frac{B}{B_{max}} \quad (22)$$

Dónde: R , G y B son las bandas roja, verde y azul de la imagen visible, respectivamente.

Al aplicar la ecuación 18 sobre la imagen RGB, se generó una imagen en escala de grises donde cada segmento de la imagen tiene un valor del índice ExG; el umbral óptimo del índice para discriminar entre ambas clases (vegetación y otros) se obtuvo mediante el algoritmo de umbralización de Otsu (Otsu, 1979). Los segmentos cuyos valores de ExG estaban por encima del umbral se consideraron como vegetación (Figura 6.3), mientras que los que tenían una respuesta por debajo del umbral no se clasificaron.

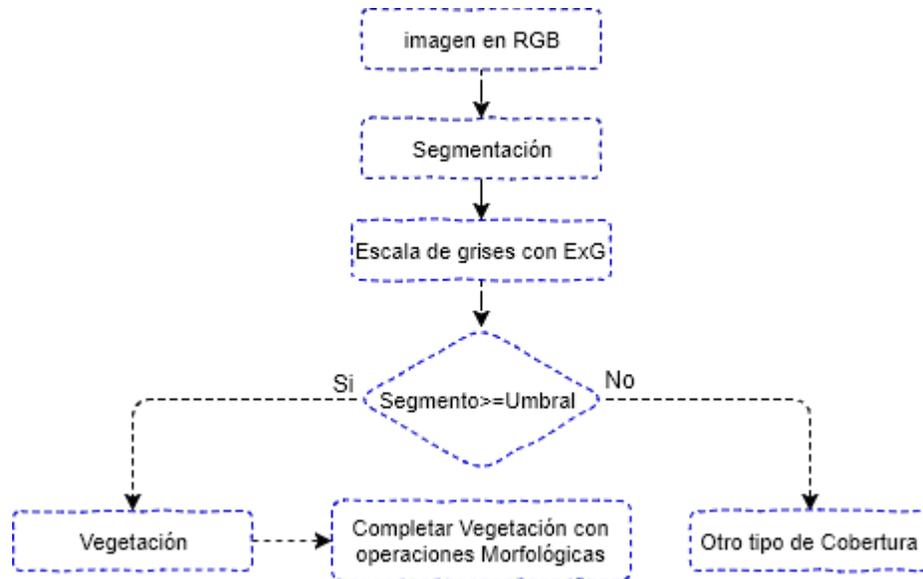


Figura 6.3. Flujo de Trabajo en la clasificación de la vegetación

Por último, se aplicó la operación morfológica de relleno de huecos con la condición de que el área del hueco fuera menor de 80 píxeles y se unieron los segmentos.

b) Cauce

Se dividió la imagen en cuatro zonas para tener un mejor control en la clase y así mismo facilitar la clasificación (Figura 6.4). Se encontró que los segmentos que tenían valores bajos (<100) en la banda verde pertenecen al cauce, sin embargo, los segmentos que tienen valores cercanos a cero en esta banda pertenecen a sombras. Por lo cual, por cada zona se buscó un valor umbral máximo (U_{max}) y un mínimo (U_{min}) de la banda verde que permita discriminar los segmentos que pertenecen al cauce. Los valores umbrales por cada zona se seleccionaron manualmente. Los segmentos sin clasificar que tenían valores en la banda verde por debajo del umbral U_{max} y por encima de U_{min} se consideraron como cauce, mientras que los que tenían una respuesta diferente no se clasificaron.

Posteriormente, se aplicaron dos operaciones morfológicas: una operación de llenado de huecos y una de unión de segmentos. Por último, se eliminaron los objetos pequeños que tenían un área menor de: 30 px en la zona 1, 35 px en la zona 2, 60 px en la zona 3 y 350 px para la 4.



Figura 6.4. Zonas de clasificación del cauce.

c) Carreteras de concreto

Se volvió a segmentar la imagen con el mismo algoritmo, aplicado únicamente sobre las áreas sin clasificar, los valores asignados a los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 50, 0.5 y 0.5, respectivamente. Se usó un parámetro de escala de 50 para tener segmentos de área grande, ya que las carreteras por lo general son más grandes que los otros objetos (casas, vehículos, arboles, etc.) de la imagen. En el caso del parámetro de forma se utilizó el valor de 0.5 para usar el parámetro densidad (density, en eCognition) y separar los segmentos que pertenecían a carretera y losas de concreto.

La clasificación de las carreteras de concreto se llevó a cabo en dos grandes etapas; en la primera, se clasificaron todos los segmentos que correspondían al concreto; en la segunda, se eliminaron los segmentos de construcciones que habían sido clasificadas por poseer losas de concreto.

La clasificación de la cobertura de concreto se llevó a cabo con la imagen en escala de grises de la banda azul, el valor umbral óptimo (X) de esta banda para discriminar el concreto se obtuvo manualmente. Los segmentos sin clasificar cuyos valores en la banda azul estaban por encima del umbral X se consideraron como concreto (Figura 6.5), mientras que los que tenían una respuesta por debajo el umbral no se clasificaron.

Para eliminar los segmentos de construcciones que se clasificaron se usó la función densidad. Esta función describe la distribución en el espacio de los píxeles de un objeto de imagen (Trimble, 2017). En eCognition Developer 9.0 la forma más "densa" es un cuadrado; cuanto más alargado sea un segmento, menor es su densidad. La densidad se calcula por el número de píxeles que forman el objeto dividido por su radio aproximado, basado en la matriz de

covarianza. En este caso, se calculó el parámetro densidad para cada segmento y manualmente se buscó un valor umbral (D). Los segmentos clasificados como concretos cuyos valores de densidad estaban por encima del umbral D se eliminaron de la clase (Figura 6.5), mientras que los que tenían una respuesta por debajo se mantuvieron. Posteriormente, se eliminaron de esta clase los segmentos que tenían un área (AT) menor 1,075 píxeles.

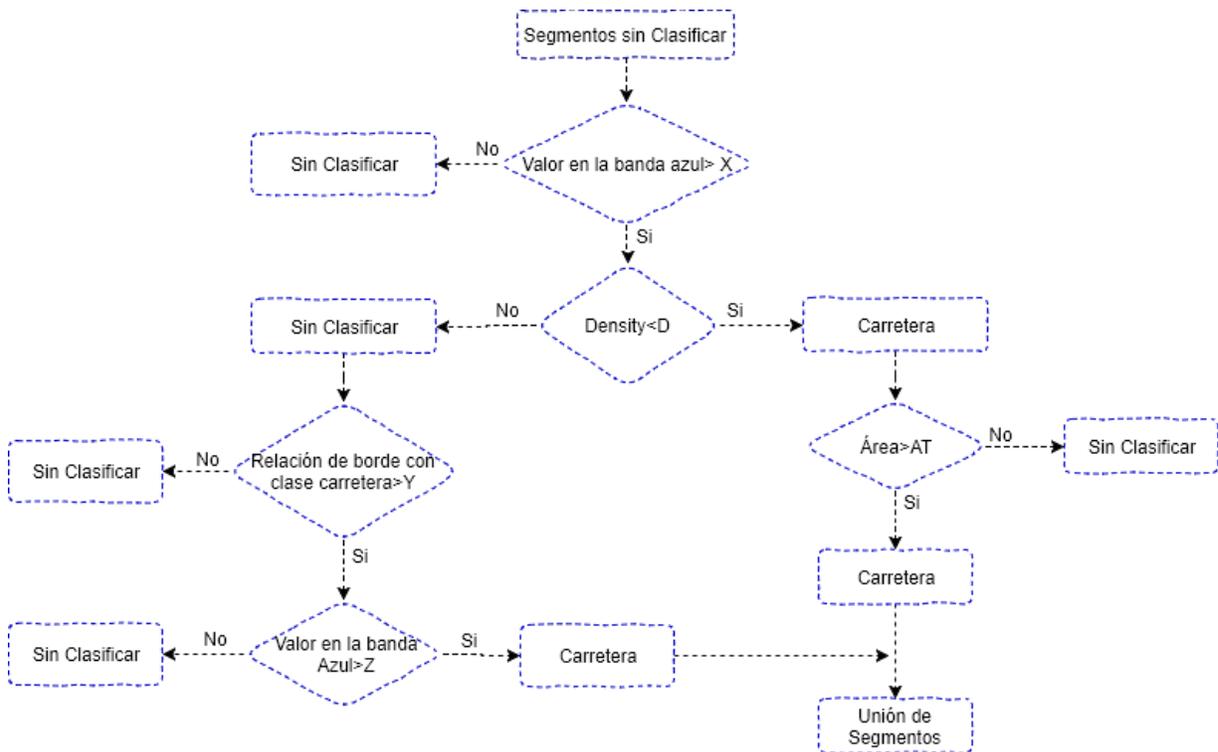


Figura 6.5. Flujo de Trabajo para clasificar las carreteras en la imagen satelital

Con el fin de completar la clasificación de las carreteras, se aplicó la operación morfológica de relación de borde con respecto al vecino más cercano, se ubicó (en esta clase) a los segmentos sin clasificar cuyo perímetro estaba unido a los segmentos de la clase carretera en al menos una proporción (Y) de 0.2 y cuyo valor en la banda azul (Z) fuera mayor de 169.

d) Construcciones

La clasificación de construcciones a partir de imágenes RGB ha sido estudiada por diferentes autores, Khoshelham & Zhilin, (2004) extrajeron de manera automática construcciones de imágenes aéreas usando el algoritmo de extracción de borde de Canny (Canny, 1986); Ok (2009) clasificó automáticamente edificios en una zona residencial de Turquía a partir de imágenes aéreas, aplicó el algoritmo de segmentación mean-shift para suavizar la imagen y el método de Canny para detectar los bordes. En este caso, se segmentó la imagen con el algoritmo Multiresolution Segmentation, aplicado únicamente sobre las áreas sin clasificar, se asignó un peso de uno a las tres bandas de la imagen RGB, el factor de escala usado fue 11, el de forma y

compacidad de 0.1 y 0.5 respectivamente. Las construcciones se clasificaron en base a índices espectrales y valores umbrales.

En la imagen, se encontraron básicamente dos tipos de colores de losas: *el gris del concreto* y *el rojo oscuro*. La clasificación se realizó en cuatro zonas (Figura 6.6) y se buscó que por cada zona la variabilidad del color de los techos fuera mínima para poder realizar la clasificación en el menor número de pasos posibles.

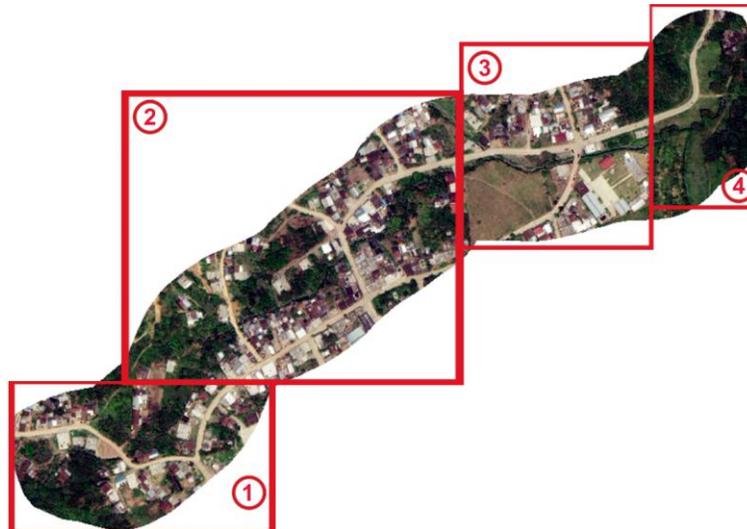


Figura 6.6. Zonas de clasificación de las construcciones (imagen satelital).

Para clasificar las losas de color rojo se usó el índice de exceso de verde (Ecuación 18), en este índice los valores bajos indican presencia del color rojo, por cada zona se buscó un valor umbral de este índice para discriminar los techos rojos. Los segmentos sin clasificar cuyos valores de Exg estaban por debajo del umbral se consideraron como losas de techos rojos, mientras que los que tenían una respuesta por encima del umbral no se clasificaron.

Posteriormente, se unieron los segmentos y se eliminaron objetos pequeños; en la zona uno se eliminaron los objetos que tenían una Densidad <1.5 y un área menor de 150 px; en la dos los que tenían un área menor de 520 px, en la tres los que tenían una densidad <1.7 y área menor de 150, y en la cuatro los que tenían una densidad <1.9 y área menor de 130. Por último, a todas las zonas se aplicó la operación morfológica de relación de borde con respecto al vecino más cercano cuyo valor umbral mínimo fue de 0.35, 0.62, 0.39 y 0.38, respectivamente.

En lo que respectan a las losas de concreto, se buscó el valor umbral mínimo de la banda azul que permitiera discriminar estos techos. Los segmentos clasificados se ubicaron temporalmente en la clase “*Techos de concreto*” y se unieron los segmentos de la clase.

Posteriormente, se pasaron los objetos a la clase *construcciones*; de la zona uno se pasaron los objetos que tenían una densidad >1.7 y un área mayor de 120 px; en la zona dos, los que tenían

una densidad >1.5 y área >210 px, y en la zona 3 los que tenían un densidad >1.8 y área >300 px. Se aplicaron tres operaciones morfológicas, la primera de llenado de huecos, la segunda de relación de borde con respecto al vecino más cercano cuyo valor umbral mínimo fue de 0.5, 0.55 y 0.63 respectivamente; y la tercera de unión de segmentos.

e) Otros

Los segmentos que quedaron sin clasificar se ubicaron dentro de esta clase.

6.3.4. Clasificación del ortomosaico (después de la inundación)

Primeramente, se importaron el ortomosaico, el MDT y MDS al programa eCognition; la clasificación de esta imagen se dividió en cinco clases de uso de suelo: vegetación, construcciones, carreteras, cauce y otros.

a) Vegetación

Se segmentó la imagen usando el algoritmo *Multiresolution Segmentation*, se asignó un peso de uno a las bandas del ortomosaico (RGB) y al MDS y cero al MDT; los valores asignados a los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 10, 0.1 y 0.5, respectivamente.

Con la imagen en RGB se generó una en escala de grises aplicando la ecuación del ExG (Ecuación 18); el valor umbral de este índice se calculó con el algoritmo de umbralización de Otsu. Los segmentos cuyos valores de Exg estaban por encima del umbral se consideraron como vegetación (Figura 6.3), mientras que los que tenían una respuesta por debajo del umbral no se clasificaron.

Posteriormente, se aplicaron tres operaciones morfológicas; el primero de llenado de huecos con la condición de que los segmentos dentro del hueco tuvieran una diferencia de alturas (MDS-MDT) mayor o igual a 4.5 m; el segundo una operación de relación de borde de 0.1 con respecto al vecino más cercano con la condición de que los segmentos tuvieran una diferencia de altura mayor a 10 m; y el tercero de unión de segmentos.

b) Construcciones

Se calculó la diferencia de elevación entre el MDS y MDT en los segmentos sin clasificar; esto generó una imagen en escala de grises en donde cada segmento tiene información de la diferencia de elevación entre los modelos. El valor umbral para clasificar las construcciones fue de 2 m. Los segmentos cuyos valores de diferencia de elevación estaban por encima del umbral se consideraron como construcciones (Figura 6.7), mientras que los que tenían una respuesta por debajo del umbral no se clasificaron.

Se unieron los segmentos de la clase, se suavizaron los bordes de los polígonos de las construcciones, y se eliminaron los objetos de la clase que tenían un área menor a 19,000 píxeles, este valor corresponde al área de una casa de 16 m² o de 4 x 4 m (Área de Tolerancia = $16/0.029^2 = 19,000$ px).

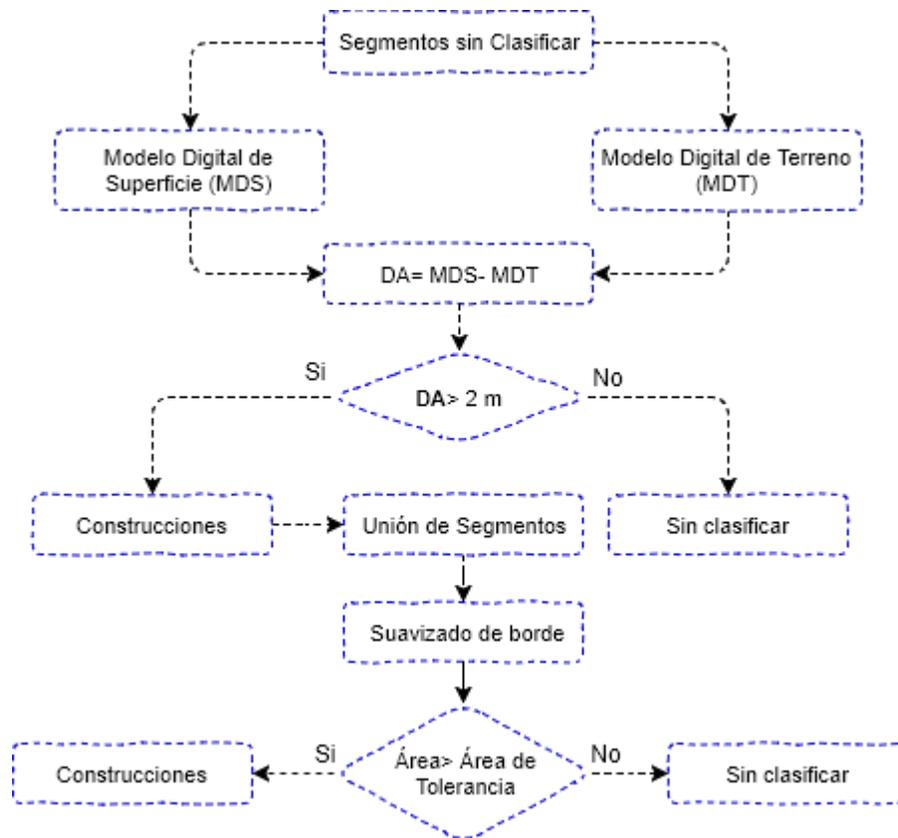


Figura 6.7. Flujo de Trabajo clasificación construcciones (ortomosaico)

c) Carreteras de concreto

Se volvió a segmentar la imagen con el mismo algoritmo, aplicado únicamente sobre las áreas sin clasificar; se asignó un peso de uno al MDS y a la banda azul, y cero al resto. Los valores asignados a los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 150, 0.1 y 0.5, respectivamente.

La clasificación se llevó a cabo con la imagen en escala de grises que representa la banda azul del ortomosaico; el valor umbral óptimo (X) de esta banda para discriminar el concreto se obtuvo manualmente. Los segmentos cuyos valores en la banda azul estaban por encima del umbral X se consideraron como carreteras (Figura 6.8), mientras que los que tenían una respuesta por debajo el umbral no se clasificaron.

Posteriormente, se aplicó la operación de relación de borde con respecto al vecino más cercano el cual permitió ubicar en esta clase a los segmentos sin clasificar cuyo perímetro estaba unido a los segmentos de la clase carretera en al menos una proporción (Y) de 0.23 y cuyo valor en la banda azul (Z) fuera mayor de 135. El siguiente paso consistió en rellenar los huecos, y en el último se eliminaron los objetos de la clase que tenían un área menor de 900 píxeles.

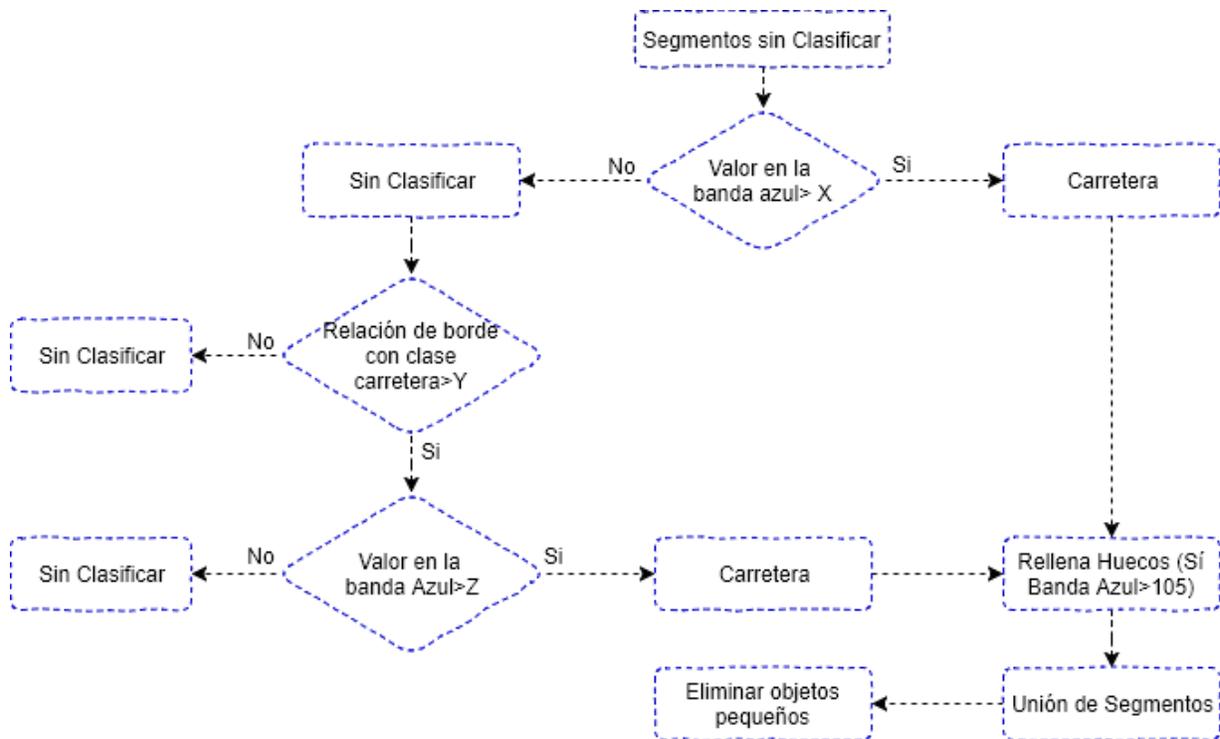


Figura 6.8. Flujo de Trabajo para la clasificación de carretera en el ortomosaico

d) Cauce:

Se volvió a segmentar la imagen con el mismo algoritmo, aplicado únicamente sobre las áreas sin clasificar; se asignó un peso de uno a las tres bandas de la imagen visible y al MDS, mientras que al MDT cero. Los valores asignados a los parámetros de escala, forma y compacidad fueron de 1, 0.1 y 0.5, respectivamente.

La clasificación del cauce se llevó a cabo en base al talud que forman sus paredes, para ello en cada segmento se calculó la desviación estándar de las elevaciones del MDT con respecto a los vecino más cercano (4x4); con lo anterior se logró que se identificaran los cambios de pendientes en el terreno, dichos cambios de pendiente ayudaron a identificar en donde se encontraba el borde del cauce. En la se muestra el flujo de trabajo usado para la clasificación del cauce. Lo anterior genero una imagen en escala de grises en donde cada segmento posee información de la desviación estándar de las elevaciones del MDT con respecto a sus cuatro vecinos cercanos. Se buscó manualmente un valor umbral (DE) para discriminar el borde del cauce. Los segmentos sin clasificar cuyos valores de desviación estándar estaban por encima del umbral DE se consideraron como parte del borde del cauce (Figura 6.9), mientras que los que tenían una respuesta por debajo del umbral no se clasificaron.

En el segundo paso se aplicó la operación morfológica de relleno de huecos ya que en el primer paso únicamente se delimito el borde del cauce. Como paso final se eliminaron de la clase los objetos cuya área era menor a 9,000 píxeles

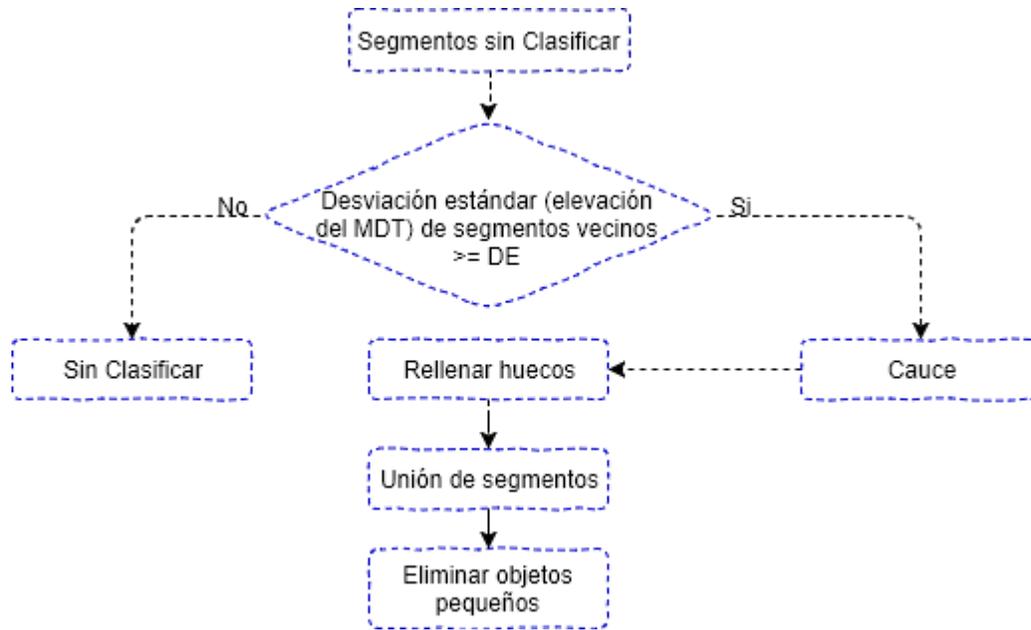


Figura 6.9. Flujo de Trabajo de la clasificación del cauce (ortomosaico)

e) Otros:

Los segmentos que quedaron sin clasificar se ubicaron dentro de esta clase.

6.3.5. Análisis de la precisión de las clasificaciones

Para estimar la precisión de las clasificaciones se calculó la matriz de confusión. A partir de esta matriz, se calcularon parámetros, como: i) la precisión global (Ecuación 23), que cuantifica el número de píxeles correctamente clasificados, ii) la precisión del productor (Ecuación 24), que indica la probabilidad de que un píxel de la clase i está correctamente clasificado, iii) la precisión del usuario (Ecuación 25), que indica la probabilidad de que un píxel clasificado como clase i corresponda realmente a dicha clase y iv) el coeficiente Kappa (Ecuación 26) (Cohen, 1960). Las precisiones de productor y usuario están relacionadas con los errores de “omisión” y “comisión”.

$$P = \frac{\sum_{i=1}^m X_{ii}}{N} \quad (23)$$

$$P_P = \frac{X_{ii}}{X_{\Sigma i}} \quad (24)$$

$$P_U = \frac{X_{ii}}{X_{i\Sigma}} \quad (25)$$

$$\kappa = \frac{N \sum_{i=1}^m X_{ii} - \sum_{i=1}^m X_{i\Sigma} X_{\Sigma i}}{N^2 - \sum_{i=1}^m X_{i\Sigma} X_{\Sigma i}} \quad (26)$$

Donde; m es el número total de clases; N, es el número total de segmentos en las m clases de referencia; X_{ii} , elementos de la diagonal de la matriz de confusión, $X_{\Sigma i}$, suma de los segmentos de la clase i de referencia; $X_{i\Sigma}$, suma de los segmentos clasificados como la clase i.

Landis & Koch, (1977) propusieron, la escala de valoración del coeficiente Kappa (κ) que se muestra en el Cuadro 12.

Cuadro 12. Escala de valoración del coeficiente Kappa

Kappa	Fuerza de concordancia	Kappa	Fuerza de concordancia
0	Sin concordancia	0.4 – 0.6	Moderada
< 0.20	Pobre	0.6 – 0.8	Buena
0.2 – 0.4	Débil	0.8 – 1.0	Muy buena

6.3.6. Análisis multitemporal de cambios

Se realizó la comparación de ambas clasificaciones superponiendo los objetos de construcciones sobre un mismo plano con la finalidad de identificar el número de casas que fueron arrastradas durante la inundación y las que se construyeron entre abril e inicios de septiembre del 2016.

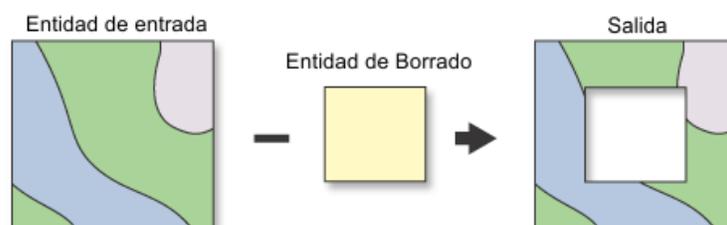


Figura 6.10. Algoritmo herramienta Borrado de ArcMap (ESRI, 2017).

Para la cuantificación se utilizó la herramienta *Borrar* del programa *ArcMap*. En la cuantificación de casas arrastradas se asignó como entidades de *entrada* la clasificación de las construcciones del mes de abril, y las entidades de borrado las del mes de septiembre; en la cuantificación de casas construidas se invirtieron los datos de entrada y borrado. Posteriormente, se supervisaron los archivos de salida y se corrigieron manualmente. Por último, se contabilizaron el número de casas arrastradas y construidas dentro de ese lapso de tiempo.

El análisis de cambios de cobertura se realizó comparando las superficies de cada clase de ambas clasificaciones.

6.3.7. Aplicación de la metodología de clasificación en un caso de estudio usando VANTs

Se aplicó la metodología de clasificación sobre el poblado de Tlaola, la información que se importó al software eCognition fue un Ortomosaico de 37.4 ha con resolución espacial de 2 cm/pixel, Figura 5.22. Y un MDS y MDT (Figura 5.24) con resolución espacial de 8.3 cm/pixel.

Los parámetros que se modificaron para clasificar las distintas clases son: en vegetación, el valor umbral del índice exceso de verde, en construcciones el área de tolerancia que fue de 40,000 px; en carreteras de concreto, el valor de X (136), Y (0.34) y Z (105) del diagrama mostrado en la Figura 6.8, y, se eliminaron los objetos que tenían un área menor de 3,000 px; en el cauce, el valor umbral ($D=0.18$) y se eliminaron los objetos que tenían un área menor de 9,000 px. Para

estimar la precisión de la clasificación se calculó la matriz de confusión y los cuatro parámetros de precisión mostrados en la sección 6.3.5.

6.4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

6.4.1. Clasificación de la imagen satelital (antes de la inundación)

a) Vegetación.

El valor umbral del índice de exceso (Exg) de verde fue de 0.075 (Figura 6.11), el algoritmo de Otsu para el cálculo del valor umbral permitió que parte de la clasificación de la vegetación se realizara de manera automática.

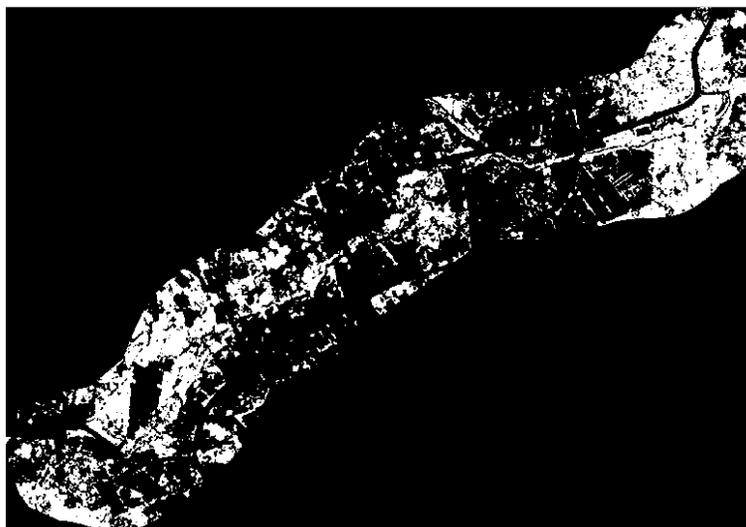


Figura 6.11. Imagen binarizada con ExG de la zona de estudio (Blanco=vegetación)

En la Figura 6.12 se muestran los resultados obtenidos en las cuatro etapas de clasificación de la vegetación y en la Figura 6.16 la clasificación completa en el área de estudio. Los errores en la clasificación se debieron al índice ExG ya que se confundían los objetos de colores similares a la vegetación, dichos errores fueron corregidos mediante la operación morfológica de relleno de huecos.

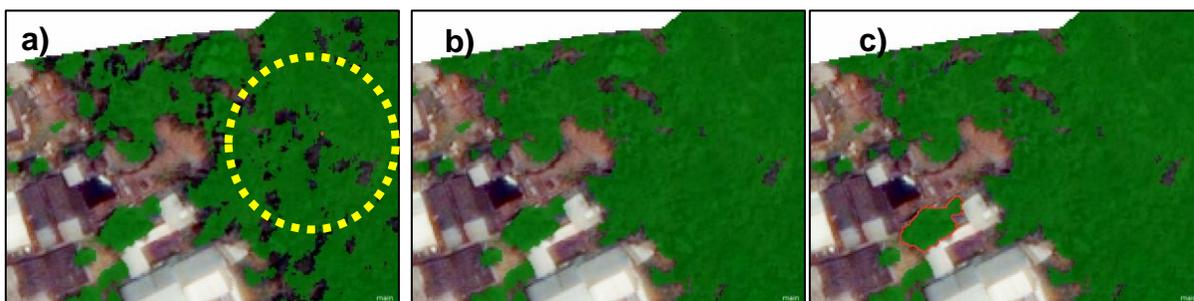


Figura 6.12. Etapas de la clasificación de la vegetación: a) clasificación según el índice ExG, b) relleno de huecos, c) unión de segmentos.



Figura 6.13. Clasificación de la vegetación en el área de estudio (imagen satelital).

a) Cauce.

Los valores umbrales máximos y mínimo de la banda verde que permitieron discretizar con éxito el cauce fueron (Figura 6.14): para la zona 1 y 2 de 75 y 20; para la 3 de 78 y 38 y para la cuarta de 69 y 38; estos valores umbrales dependieron de la tonalidad de las aguas del cauce y de la cantidad de sombras que se tenían dentro de las zonas establecidas. Los umbrales máximos y mínimos encontradas de las cuatro zonas fueron de 78 y 20, respectivamente, esto indica que en la banda verde el cauce se puede discretizar dentro de ese rango de valores.

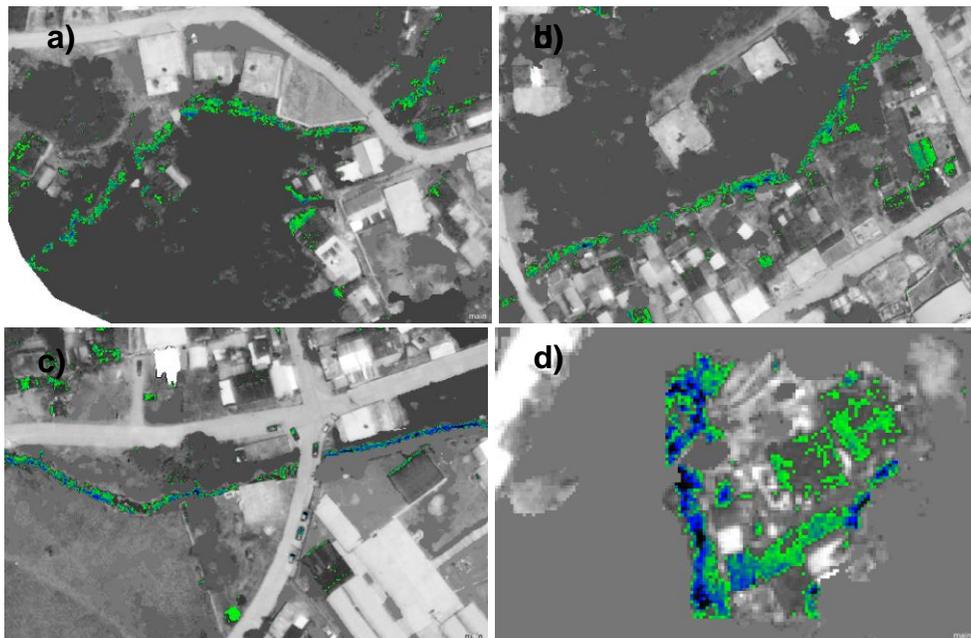


Figura 6.14. Rango de valores de la banda verde por zona, a) zona uno (20-75), b) zona dos (20-75), c) zona tres (38-78) y d) zona 4 (38-69).

En la Figura 6.15 se muestran los resultados obtenidos en las cuatro etapas de clasificación del cauce y en la Figura 6.16 la clasificación completa en el área de estudio de la vegetación y el cauce. La correcta clasificación de esta clase dependió de los valores umbrales mínimos y máximos de la banda verde seleccionados y de la cantidad de sombra de árboles que se encontraron sobre las márgenes de los ríos. Es muy importante que se clasifique la vegetación con el índice de exceso de verde antes que el cauce, ya que esta banda además del cauce permite discretizar las sombras de los árboles.

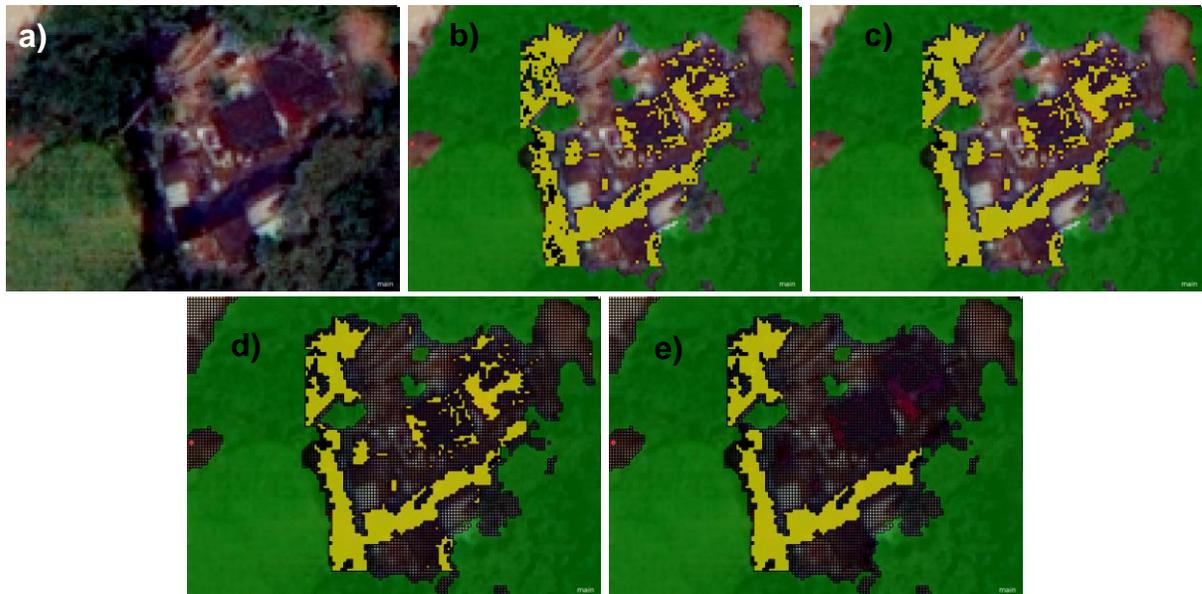


Figura 6.15. Etapas de la clasificación del cauce: a) imagen falso color, b) clasificación según banda verde (38-69, zona 4), c) rellenar huecos, d) unión de segmentos, e) eliminar objetos pequeños.



Figura 6.16. Clasificación de la vegetación y el cauce en el área de estudio (imagen satelital).

b) Carreteras de concreto

El valor umbral (X) en la banda azul que permitió discretizar el concreto de otras clases fue de 176 (Figura 6.17). Con este valor umbral se clasificaron también segmentos de construcciones cuyas losas son de concreto, por ello, el parámetro Densidad fue muy importante para buscar y eliminar de la clase a estos segmentos, el valor umbral del parámetro Densidad seleccionado fue de 1.85.

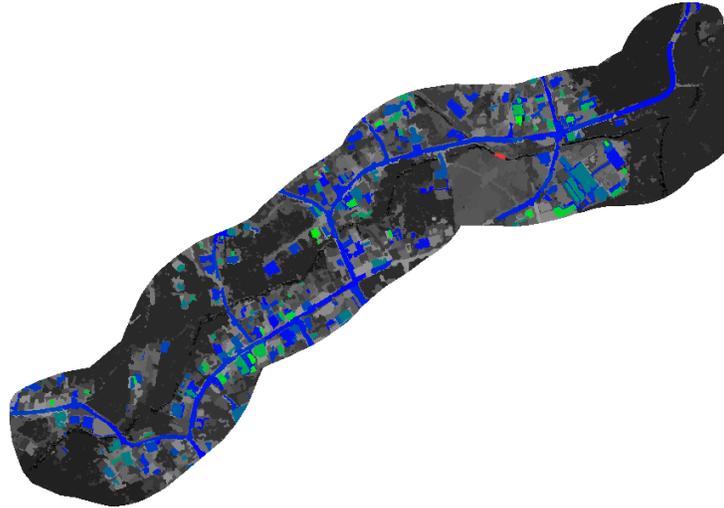


Figura 6.17. Segmentos con valor en la banda azul >176 (imagen satelital).

En la Figura 6.18 se presentan la clasificación completa en el área de estudio de las carreteras de concreto y en la Figura 6.19 los resultados obtenidos en las cuatro etapas de clasificación. De acuerdo a los resultados se observa que la banda azul permitió discriminar el concreto de manera correcta, y con un valor umbral adecuado se tuvo una buena clasificación; al no contar con un modelo digital de elevaciones se tuvo cuidado al seleccionar el valor umbral y del parámetro densidad.



Figura 6.18. Clasificación del cauce en el área de estudio (imagen satelital).

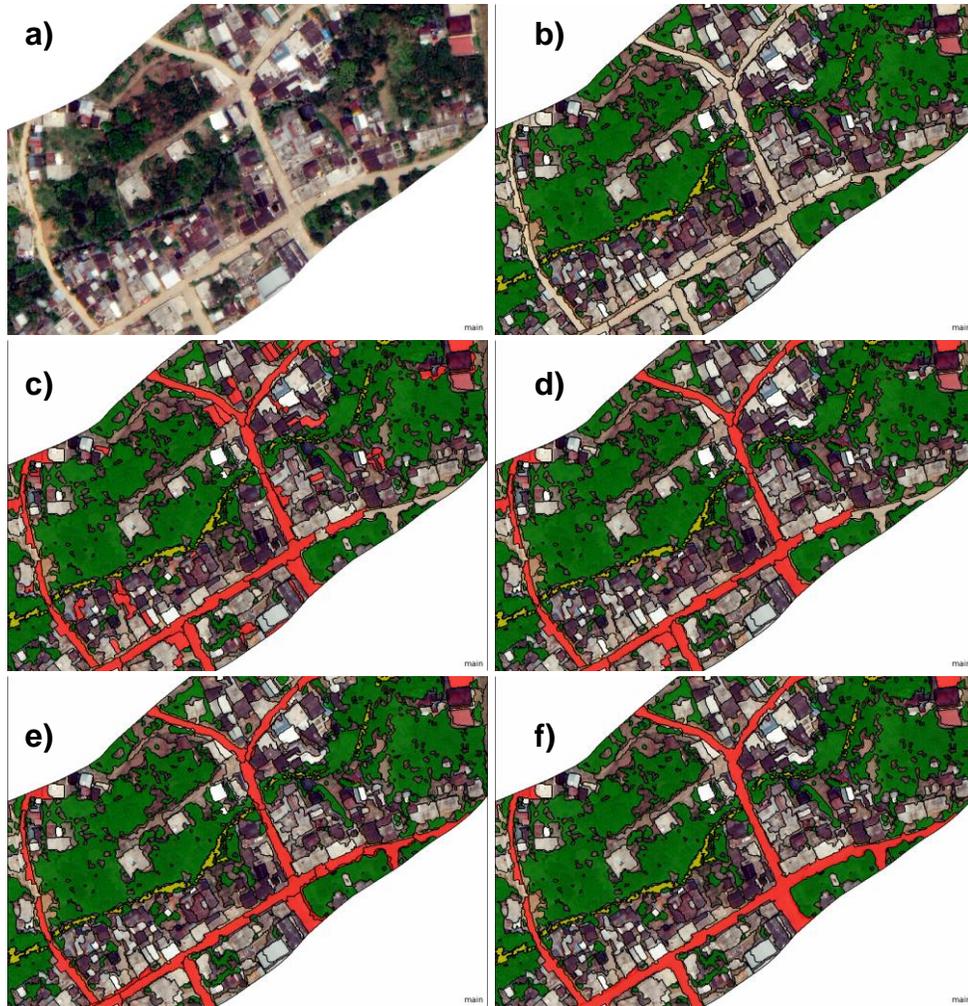


Figura 6.19. Etapas de la clasificación del pavimento: a) imagen en falso color, b) Segmentación, c) Clasificación según banda azul y el parámetro Density, d) Eliminación de segmentos (área < 1,075 px), e) relación de borde con segmentos vecinos (> 0.2) y valor en banda azul > 169, f) Unión de segmentos.

Los principales errores que se detectaron en la clasificación se producen en superficies de concreto que presentan cubierta de tierra o lodo (Figura 6.20), ya que los valores de estos segmentos en la banda azul son inferiores que el umbral establecido.



Figura 6.20. Errores en la clasificación del pavimento (imagen satelital).

c) Construcciones.

En la clasificación de las losas de color rojo, los valores umbrales del ExG fueron: -0.025 para la zona uno, para la dos de -0.04, para el 3 de -0.054 y para la 4 de -0.082 (Figura 6.21), en todos los casos el valor umbral fue inferior a cero. En algunas zonas donde se contaba con suelo desnudo de color rojizo alrededor de las construcciones se tuvieron problemas de clasificación con el ExG, porque estos segmentos de suelo se clasificaron, sin embargo, en zonas donde el suelo alrededor de las construcciones era de otro color la clasificación no presentó problemas.

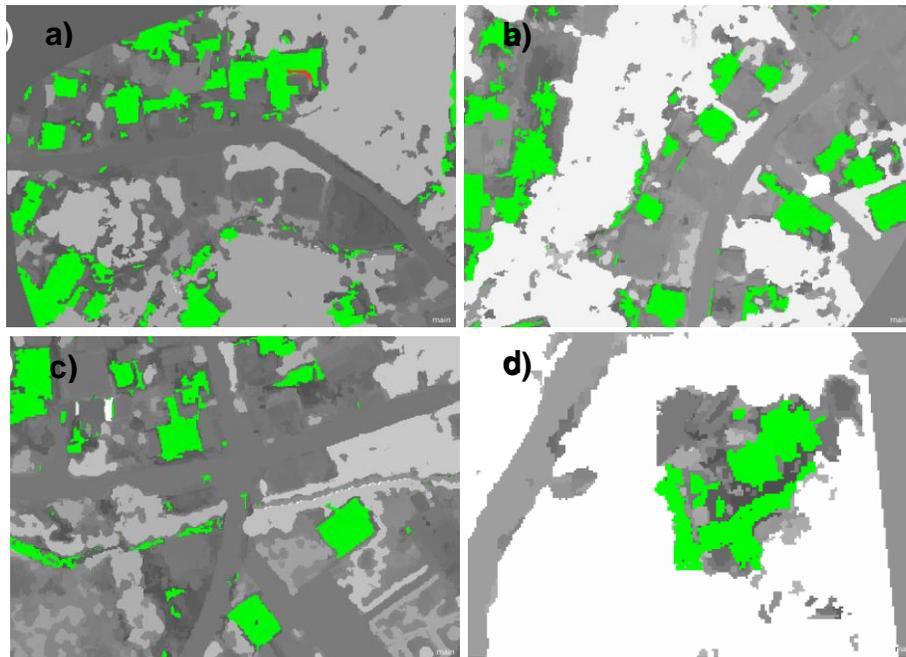


Figura 6.21. Índice ExG por zona (color verde), a) zona uno (<-0.025), b) zona dos (<-0.04), c) zona tres (<-0.054) y d) zona 4 (<-0.082).

En la Figura 6.22 se presentan los resultados obtenidos en las cuatro etapas de clasificación de las construcciones con losas de color rojo, para ejemplificar las etapas se presenta la clasificación en la zona 1. El índice ExG se ha usado de manera exitosa para discriminar la vegetación de otros tipos de coberturas, sin embargo, cambiando el sentido de la clasificación (clasificar píxeles con valores por debajo del umbral) y con el uso de un valor umbral adecuado es posible discretizar objetos de color rojo-rojo oscuro en la imagen RGB, como se realizó en este caso con las construcciones de losas color rojo.

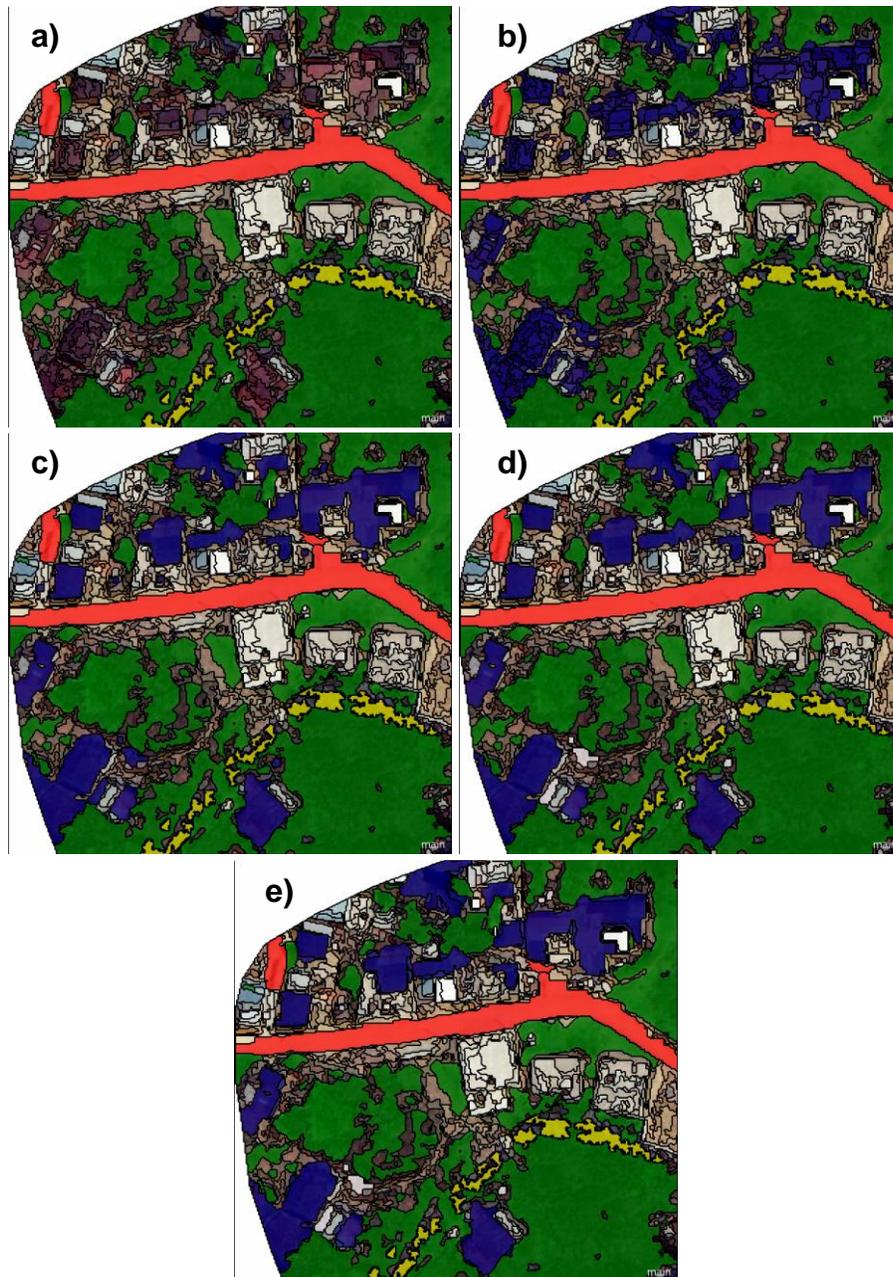


Figura 6.22. Etapas de la clasificación de losas rojas (Zona 1), a) Segmentación, b) Clasificación según índice exceso de verde (valores < -0.025), c) Unión de segmentos, d) Eliminación de segmentos (densidad < 1.5 y área $< 150\text{ px}$), e) Relación borde con segmentos vecinos (> 0.35).

En el caso de las construcciones con losas de concreto, el valor umbral en la banda azul para la zona uno fue de 165, para la dos de 164, para la tres de 170 y en la última zona no se contaba con losas de concreto (Figura 6.23). En la Figura 6.24 se presentan los pasos que se siguieron para clasificar las losas de concreto, para ejemplificar se presenta la clasificación en la zona 1. La clasificación de techos de concreto se realizó de manera correcta ya que anteriormente se realizó la clasificación de las carreteras.

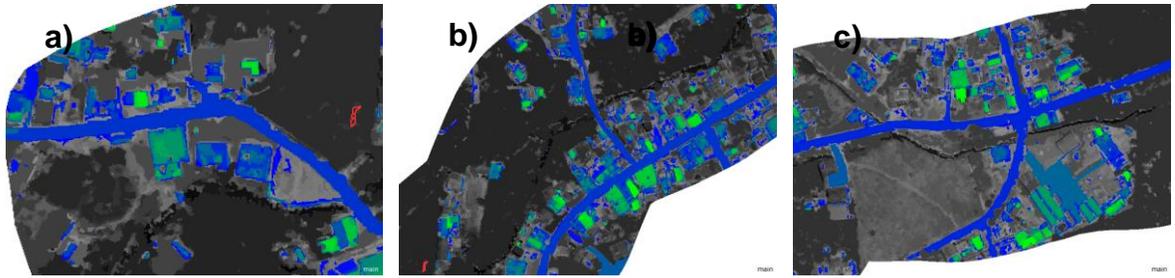


Figura 6.23. Rango de valores de la banda azul por zona (color azul), a) zona uno (>165), b) zona dos (>164), c) zona tres (>170).

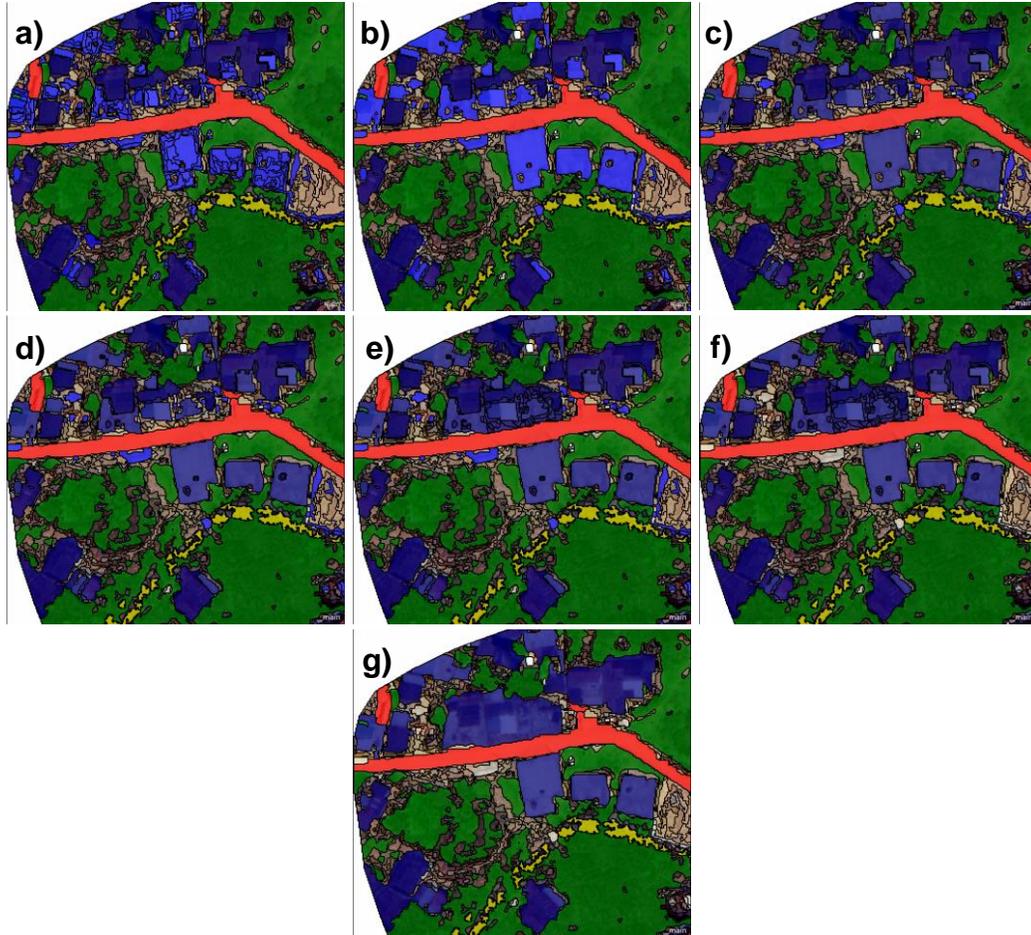


Figura 6.24. Etapas de la clasificación de losas de concreto (Zona 1), a) clasificación según banda azul (azul claro), b) Unión de segmentos, c) pasar a clase construcciones objetos con densidad >1.7 y área >120 px, d) Relleno de huecos, e) Relación de borde con segmentos vecinos (>0.55), f) eliminar clase losas de concreto, g) unión de segmentos.

El factor de escala usado (11) en la segmentación evitó que en un mismo segmento quedaran píxeles de techos rojo y suelo rojo; si se usa un factor de escala más pequeño se tendría más variabilidad y la clasificación se realizaría en un mayor número de pasos. El valor medio conveniente sería usar un factor de escala de 10.

d) Cobertura y uso de suelo antes de la inundación

En la Figura 6.25 se muestra el mapa de cobertura y uso de suelo antes de la inundación superpuesta en la imagen satelital, en donde es posible identificar las cinco clases en que se dividió la clasificación. En la clase otros, la mayoría de los píxeles son de suelo desnudo; la clase con mayor cobertura fue el de vegetación con 43.6 %, el menor cobertura fue el cauce con 1.6 %.

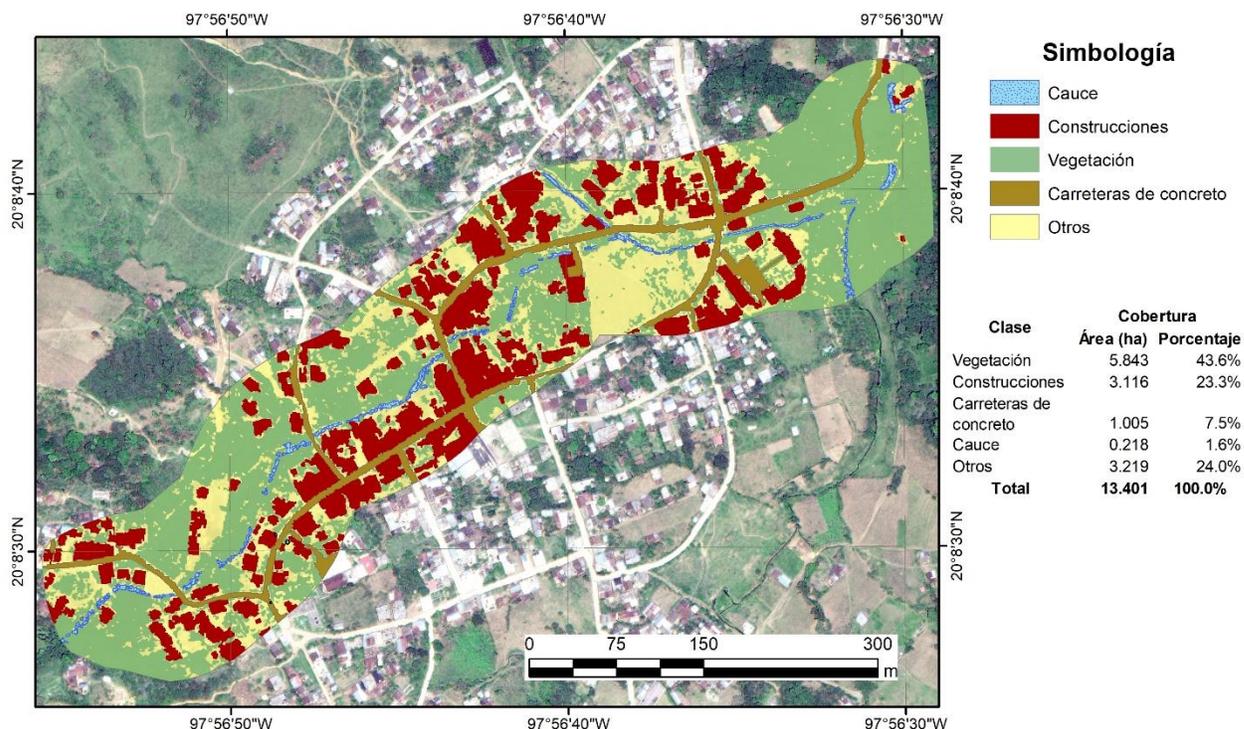


Figura 6.25. Cobertura uso de suelo después de la inundación.

e) Análisis de la precisión de la clasificación

La precisión global para la clasificación de la imagen satelital fue de 82 % y el coeficiente Kappa de 0.74, lo que indica que la calidad de la clasificación fue buena, de acuerdo a la escala de valoración del coeficiente Kappa de Landis & Koch. La precisión de las clases individuales fue muy variable, desde 62% al 93%; la precisión del productor más bajo fue de la clase carretera con 62 %, lo que indica que el 38% del área que corresponde a carreteras no se clasificó dentro de esta clase. El coeficiente Kappa de las cinco clases estuvo entre los valores de 0.61 y 0.78; esto indica que la clasificación de cada clase fue buena. Cabe resaltar que al no contar con modelos digitales se complica al discretizar correctamente las clases, sobre todo cuando un mismo criterio se cumple para dos o más clases.

Cuadro 13. Matriz de confusión de la clasificación de la imagen satelital antes de la inundación

Automático\ Manual	Vegetación	Construcciones	Carretera	Cauce	Otros	Suma
Vegetación	3,447	91	15	29	295	3,877
Construcciones	29	4,894	78	4	281	5,286

Carretera	10	30	588	1	20	649
Cauce	23	2	0	193	3	221
Otros	844	762	263	46	3,586	5,501
Suma	4,353	5,779	944	273	4,185	15,534
Precisión del productor	0.79	0.85	0.62	0.71	0.86	
Precisión del usuario	0.89	0.93	0.91	0.87	0.65	
Kappa por clase	0.72	0.77	0.61	0.70	0.78	
Precisión Global	0.82					
Kappa	0.74					

6.4.2. Clasificación del ortomosaico (después de la inundación)

a) Vegetación arbustiva y arbórea.

El valor umbral del índice de exceso de verde obtenido con el algoritmo de Otsu fue de 0.173. En la Figura 6.26 se muestra los resultados obtenidos en las cinco etapas de clasificación de la vegetación y en la Figura 6.27 la clasificación completa de la vegetación en el área de estudio.

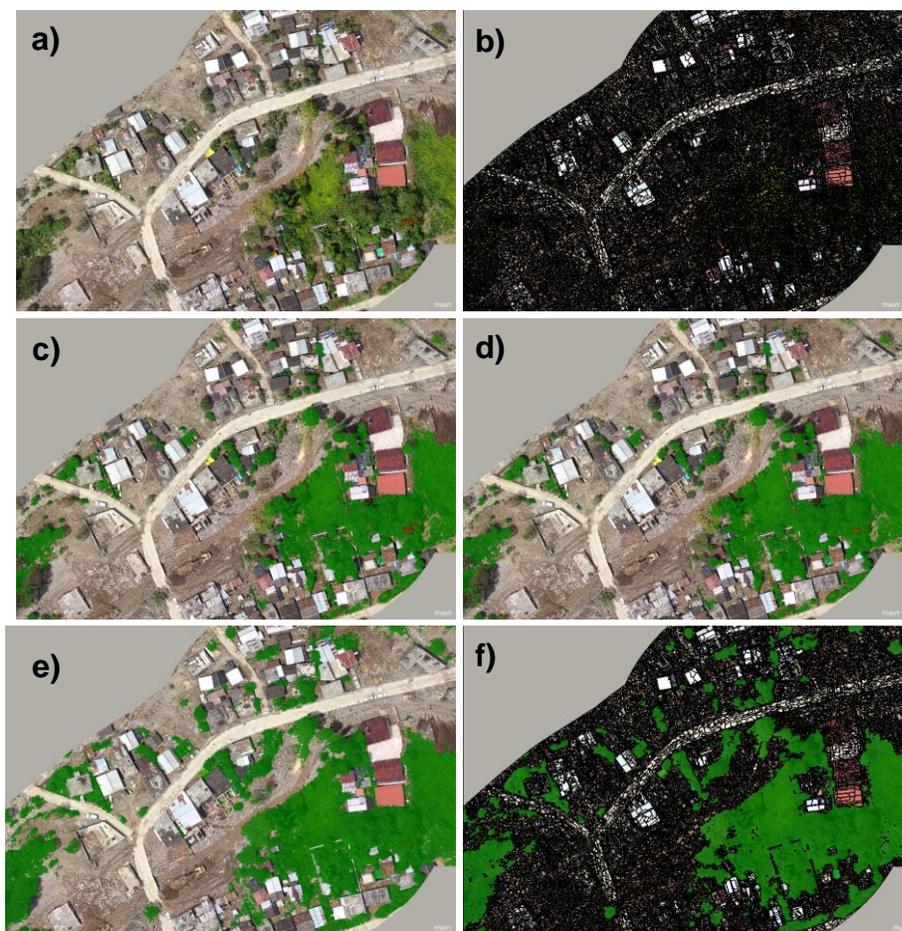


Figura 6.26. Etapas de la clasificación de la vegetación: a) imagen en falso color, b) segmentación, c) clasificación según el ExG, d) Relleno de huecos, e) relación borde con segmentos vecinos f) unión de segmentos.



Figura 6.27. Clasificación de la vegetación en el área de estudio (ortomosaico).

En la mayoría de los casos la clasificación se realizó de manera correcta, los principales errores tienen que ver en principio con el índice de exceso de verde, ya que este índice se ha usado satisfactoriamente en discriminar la vegetación verde, sin embargo, en el ortomosaico al ser de una población semiurbana existen pixeles de vegetación color naranja (Figura 6.28), la cual no se logra discriminar como vegetación; también existen diversos pixeles de color verde que no se tratan de vegetación (Figura 6.29) y el índice los discrimina; estas dos consideraciones se deben tomar en cuenta al discretizar la vegetación en poblaciones semiurbana. En este caso, la vegetación de color roja se logró clasificar al aplicar las operaciones morfológicas de relleno de hueco y relación de borde con respecto al vecino cercano. El índice ExG apoyado de operaciones morfológicas logro discriminar satisfactoriamente la vegetación de otras clases.

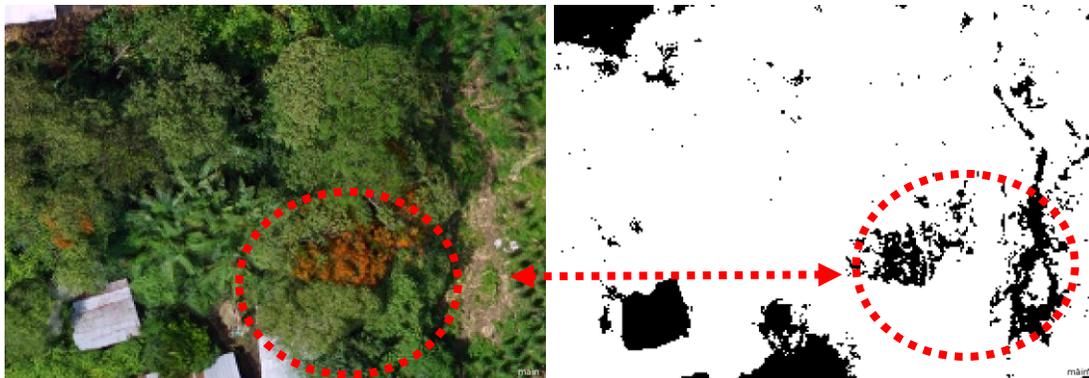


Figura 6.28. Vegetación (blanco) no considerada en el índice de verde (ortomosaico).

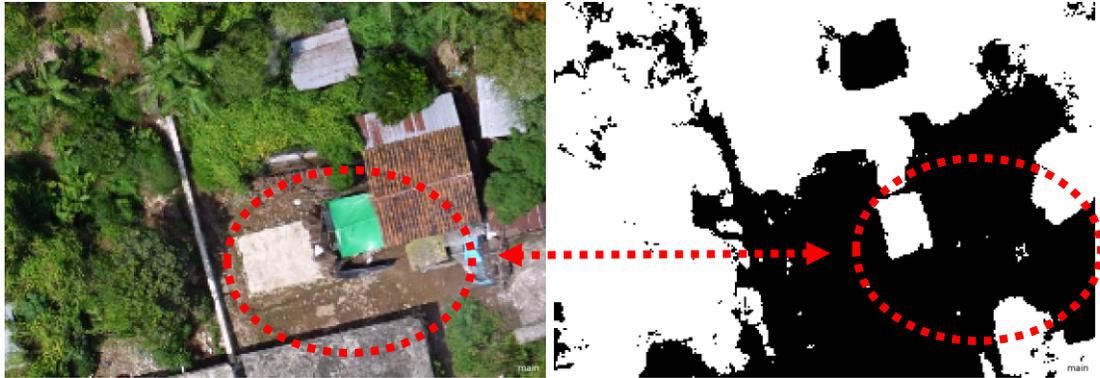


Figura 6.29. Errores en discretizar la vegetación con el índice de exceso de verde.

b) Construcciones.

En la segmentación, al usar las tres bandas de la imagen RGB y el MDS, permitió en principio que se dividiera la imagen en base a los tonos de color y luego volver a dividir los segmentos tomando en cuenta la elevación, lo anterior permitió que en un mismo segmento no quedaran pixeles de carretera y construcciones (Figura 6.30).

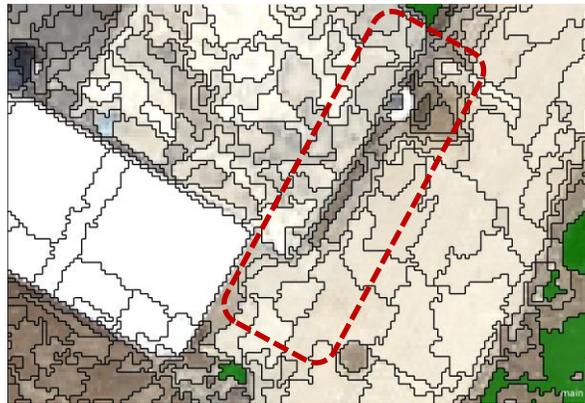


Figura 6.30. Detalles Segmentación construcciones (ortomosaico).

En la Figura 6.31 se muestra una parte de la imagen en escala de grises que resultado de la diferencia de elevaciones entre el MDS y MDT, esta diferencia permitió que los objetos que tuviera una altura mayor a cero resaltaran en la imagen; como las construcciones son objetos, el valor umbral de 2 m se volvió el parámetro más importante para clasificar las construcciones, esto permitió que los objetos como vehículos o personas no entraran en esta clase al tener una altura menor a 2m. En el caso de los árboles que tienen una altura mayor a 2m, no se tuvo problemas ya que se clasificaron en el paso anterior como vegetación. En la Figura 6.32 se muestran los resultados obtenidos en las cinco etapas de clasificación de las construcciones y en la Figura 6.33 la clasificación toda el área de estudio.



Figura 6.31. Raster de diferencia de altura entre el MDS y MDT

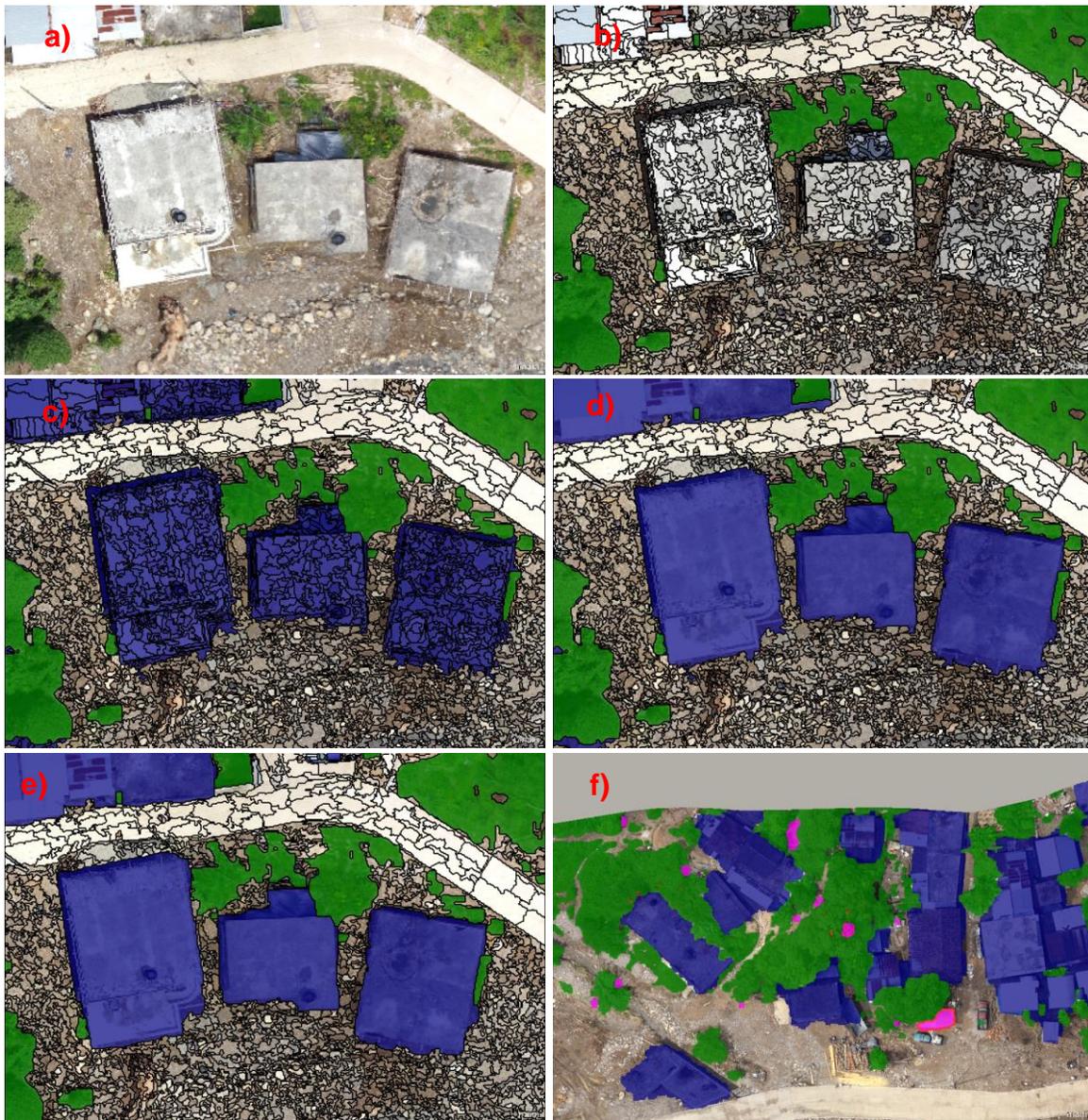


Figura 6.32. Etapas de la clasificación de las construcciones: a) imagen falso color b) Segmentación, c) clasificación según la diferencia en alturas entre el MDS y MDT, c) unión de segmentos, d) suavizado del borde, f) eliminar objetos pequeños (rosa).



Figura 6.33. Clasificación de las construcciones (ortomosaico).

Los principales errores en la clasificación ocurrieron en construcciones que se están pegados a cerros o cerca de lomeríos; al realizar la resta entre ambos modelos de elevación, las esquinas de las construcciones más próximas a la loma resultaron con valores menores a dos metros, por lo que no lograron incluirse dentro de la clase; en algunos casos dichas esquinas se lograron completar con las operación morfológicas, sin embargo, en otras no pudo ser posible como se muestra en la Figura 6.34.



Figura 6.34. Detalle: Errores en la clase construcciones (ortomosaico).

c) Carreteras de concreto.

El modelo digital de superficie usado como segmentador ayudó a que en un mismo segmento no quedaran pixeles de carretera y techos de concreto (que no se clasificaron anteriormente). El factor de escala (150) de la segmentación fue el parámetro más importante para que la clasificación se realizará en cuatro pasos; no se consideró conveniente usar un factor de escala

más pequeño, en primera porque las carreteras son más grandes que los otros objetos contenidos en la imagen, en segunda complicaría la clasificación ya que se tendría mayor variabilidad entre los segmentos. En la Figura 6.35 se muestran los resultados obtenidos en las cuatro etapas de clasificación de las carreteras de concreto (rojo), y en la Figura 6.36 la clasificación en toda el área de estudio.



Figura 6.35. Etapas de la clasificación de las carreteras de concreto: a) imagen falso color b) segmentación, c) clasificación según la banda azul (>139), d) relación borde con segmentos vecinos, e) unión de segmentos, f) eliminar objetos pequeños.

La clasificación en base a la banda azul se complicó en las carreteras que presentan sedimentos o lodos; en este caso, cuando ocurrió el desbordamiento del río, fueron arrastrados los

sedimentos hacia ambas márgenes, lo que provocó que las carreteras no pudieran ser segmentadas de manera adecuada y no se clasificarán (Figura 6.37). En las carreteras de concreto que no estaban manchadas el criterio de clasificación mediante la banda azul arrojó excelentes resultados. Además, los segmentos de techos de concreto que no entraron en la clase construcciones se clasificaron como carreteras de concreto (Figura 6.38).



Figura 6.36. Clasificación del pavimento (ortomosaico).

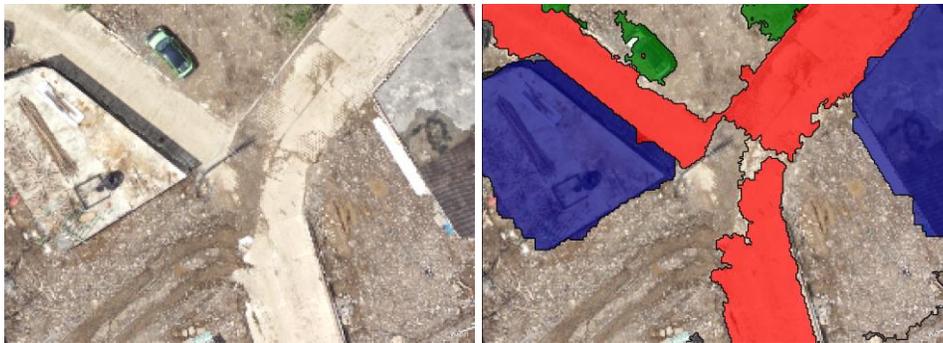


Figura 6.37. Clasificación en el pavimento manchado



Figura 6.38. Clasificación de techos de concreto como carreteras (ortomosaico).

d) Cauce.

El valor umbral de la desviación estándar de las elevaciones que permitió clasificar el borde cauce fue de 0.157. La clasificación usando el parámetro desviación estándar de los segmentos vecinos presento buenos resultados en taludes del cauce que se encuentre bien definido en el modelo digital de terreno y en los que no se encontraban obstruido por árboles o construcciones. En la Figura 6.39 se presentan las fases que se siguieron para realizar la clasificación del cauce.

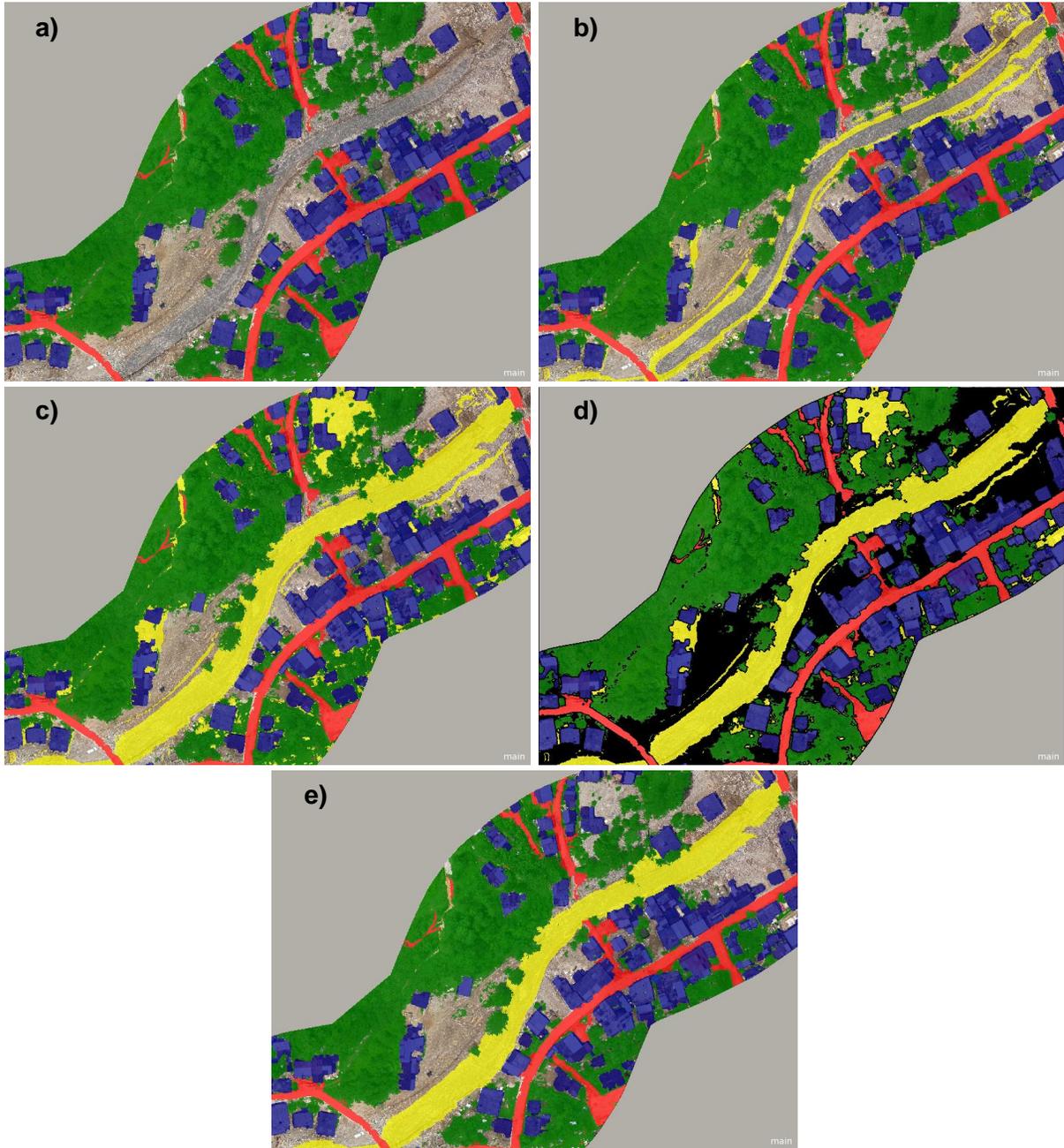


Figura 6.39. Etapas de la clasificación del cauce: a) imagen falso color b) Clasificación del borde según la desviación estándar en las alturas del MDT, c) relleno de huecos, d) unión de segmentos, e) eliminar objetos pequeños

e) Cobertura y uso de suelo después de la inundación

En la Figura 6.40 se muestra las cinco clases de la clasificación sobrepuesto en el ortomosaico. En la clase otros, la mayoría de los píxeles son de suelo desnudo; la clase con mayor cobertura fue el de vegetación con 37.9 %, el menor cobertura fue el cauce con 8.1 %.

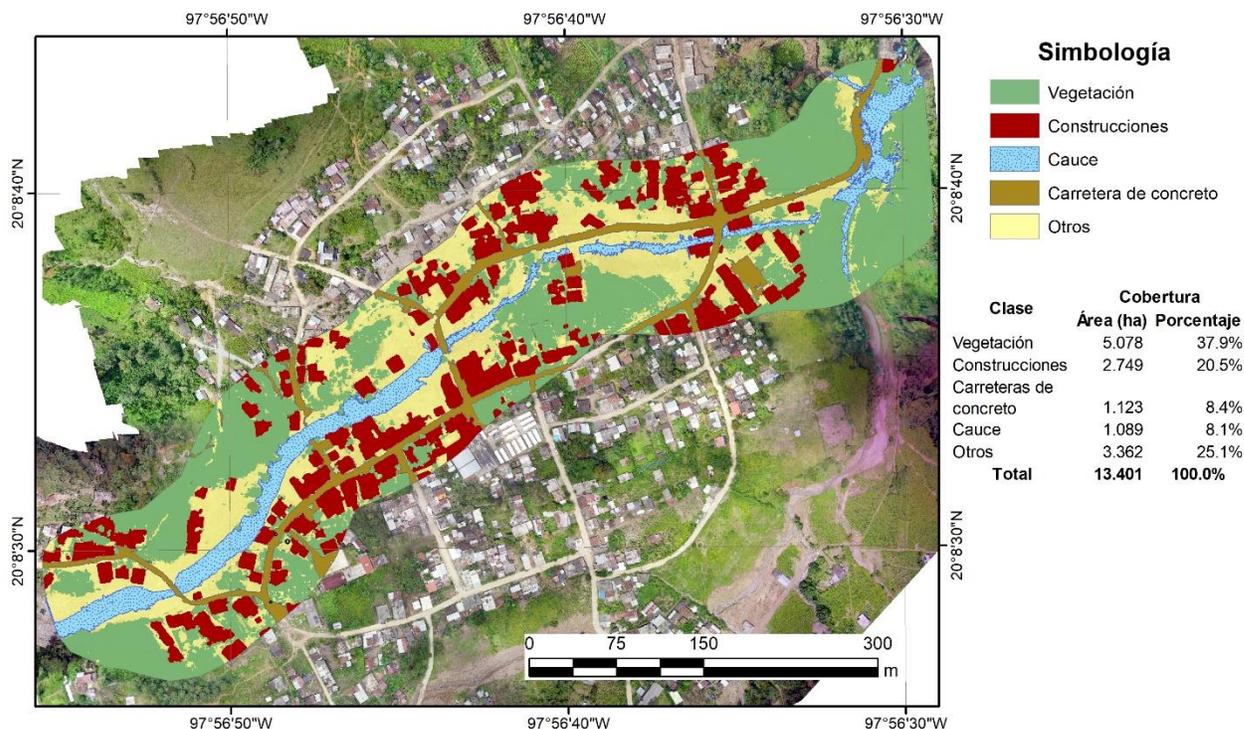


Figura 6.40. Mapa de uso de suelo y cobertura después de la inundación.

a) Análisis de la precisión

La precisión global para la clasificación fue de 89 % y el coeficiente Kappa de 0.86, lo que indica que la calidad de la clasificación fue muy buena, de acuerdo a la escala de valoración del coeficiente Kappa de Landis & Koch. La precisión de las clases individuales fue muy variable, variando de 82% al 97%; la precisión del productor más bajo fue de la clase otros con 82 %, lo que indica que el 18% del área que corresponde al suelo desnudo (principalmente) no se clasificó dentro de esta clase. El coeficiente Kappa para las clases vegetación, construcciones, carreteras y cauce fue mayor a 0.80, esto indica que la clasificación de estas clases fue muy buena. Lo cual demuestra que la metodología empleada en la clasificación arrojó resultados satisfactorios

Cuadro 14. Matriz de confusión de la clasificación del ortomosaico después de la inundación

Automático \ Manual	Vegetación	Construcciones	Carretera	Cauce	Otros	Suma
Vegetación	31,341	549	282	636	1373	34,181
Construcciones	44	22,095	276	61	1484	23,960
Carretera	118	404	7,406	52	1089	9,069
Cauce	134	25	18	12,513	1976	14,666

Otros	524	1185	927	797	26,662	30,095
Suma	32,161	24,258	8,909	14,059	32,584	111,971
Precisión del productor	0.97	0.91	0.83	0.89	0.82	
Precisión del usuario	0.92	0.92	0.82	0.85	0.89	
Kappa por clase	0.96	0.89	0.82	0.87	0.75	
Precisión global	0.89					
Kappa	0.86					

La precisión de esta clasificación es mayor en comparación con la de abril, esto se debe en principio a que se contó con modelos digitales de elevación y en segunda a que el ortomosaico tiene una resolución espacial cerca de 10 veces mayor que la imagen satelital. Lo cual muestra los alcances que se pueden tener al utilizar información proveniente de vehículos aéreos no tripulados, ya que únicamente con sobrevolar un área determinada se pueden tener modelos digitales de elevaciones y ortomosaicos de alta resolución.

6.4.1. Análisis de cambio de cobertura y uso de suelo antes y después de la inundación

En el Cuadro 15 se muestra el cambio de cobertura que hubo en la zona después de la inundación; la mayor parte del cambio se centra sobre las márgenes del río Zempoloantongo; después de la inundación, la clase que más se redujo en superficie fue el de vegetación (1.9 ha), y la que menos reducción tuvo fue el cauce (0.08 ha); la clase que más superficie aumento fue “otros” (1.53 ha) que en realidad se trata de suelo desnudo y la de menor aumento fueron las construcciones (0.02 ha).

Cuadro 15. Cambio de la cobertura por la inundación en la zona de estudio

Después de la inundación	Antes de la inundación									
	Vegetación		Construcciones		Carreteras de concreto		Cauce		Otros	
	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%	ha	%
Vegetación	3.94	67.5	0.01	0.3	0.03	2.5	0.03	11.7	1.07	33.3
Construcciones	0.01	0.2	2.73	87.6	0.00	0.0	0.00	0.0	0.01	0.2
Carreteras de concreto	0.07	1.2	0.01	0.2	0.91	90.9	0.00	0.3	0.12	3.8
Cauce	0.71	12.1	0.05	1.6	0.01	0.9	0.14	65.4	0.18	5.6
Otros	1.11	19.0	0.32	10.2	0.06	5.7	0.05	22.6	1.84	57.1
Total	5.84	100	3.12	100.	1.00	100	0.22	100	3.22	100
Cambio	1.90	32.5	0.39	12.4	0.09	9.1	0.08	34.6	1.38	42.9

En la Figura 6.41 se muestra en un plano las zonas en donde ocurrieron cambios positivo y negativo de las distintas coberturas de uso de suelo antes y después de la inundación; los cambios positivos indican las zonas en donde aumentó un tipo de cobertura y los negativos las zonas en donde disminuyó.

En el caso de la vegetación, este tipo de cobertura se vio desplazada por el suelo desnudo (clase otros) en un 19% y por el cauce en un 12 %, esta disminución se centra sobre las márgenes del río, la inundación provoco que el ancho del cauce aumentara y los árboles que estaban sobre las márgenes del río fueron arrastradas. Sin embargo, la superficie de vegetación aumento en algunas zonas, debido principalmente a la actividad agrícola, en el mes de abril no se había sembrado el cultivo de maíz por tanto esa superficie era suelo desnudo, y en el mes de septiembre, después de la inundación, se puede apreciar dicho cultivo.

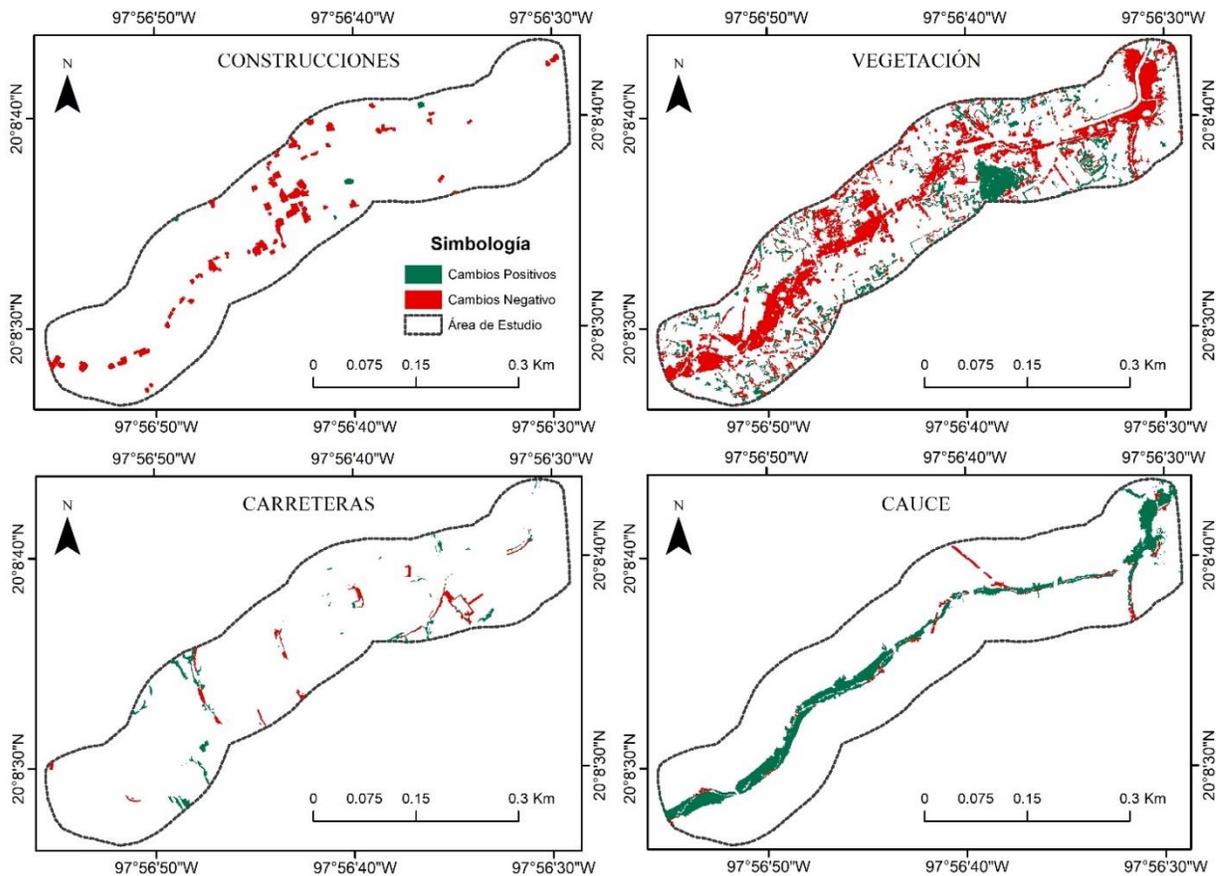


Figura 6.41. Cambios en la cobertura del suelo después de la inundación.

En lo que se refiere a las construcciones, se contabilizaron 60 casas afectadas totalmente, es decir, casas que fueron arrastradas completamente debido a la inundación, la mayoría de estas casas se localizaban a menos de 30 m sobre las márgenes del río Zempoloantongo, las superficies que tenían estas construcciones ahora en su mayoría son ocupadas por el suelo desnudo (10.2 %) y cauce (1.2 %). Además, se contabilizaron cuatro casas construidas entre abril y septiembre del 2016 (Figura 6.42), los cuales en conjunto ocupan una superficie de 190 m².

En el caso de las carreteras, un puente vehicular colapso, por lo que su superficie de cobertura ahora fue ocupada por el cauce; además, en diversas zonas las carreteras presentaban sedimentos

o lodos, esto hizo que esas zonas se clasificaran en la clase “*Otros*”, provocando que exista un cambio de uso de suelo de la clase carretera a “*otros*” en un 5.7 %. Y en el caso de la clase cauce, el río cambio su alineación y su ancho aumento, por lo cual su superficie de cobertura aumento de igual manera.

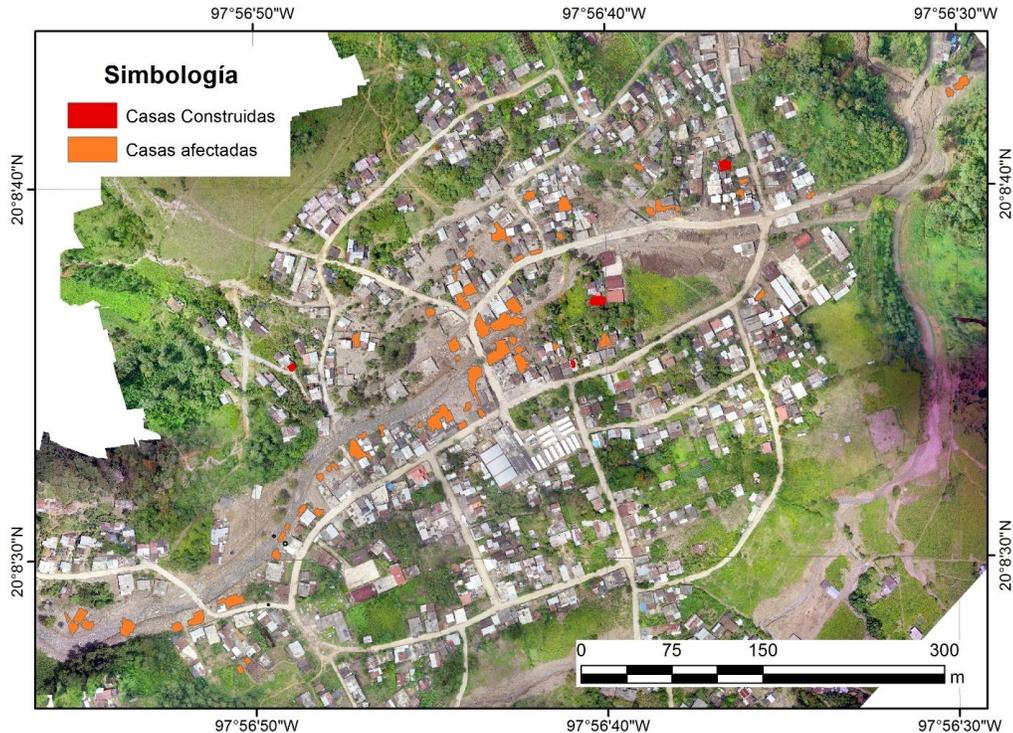


Figura 6.42. Casas arrastradas durante la inundación y construidas entre abril y septiembre

6.4.2. Aplicación de la metodología de clasificación con VANTs

a) Clasificación

El valor umbral del índice ExG obtenido con el algoritmo de Otsu para la imagen de Tlaola fue de 0.202. Este algoritmo permite que la clasificación de la vegetación con el ExG sea automática. En el caso de las carreteras, el valor umbral utilizado de la banda azul fue 136, este valor es inferior a tres unidades con respecto al utilizado para la clasificación de Chichahuaxtla (después de la inundación). Para la clasificación del borde del cauce, el valor umbral de la desviación estándar de las elevaciones fue de 0.18, el cual es superior a 0.02 con respecto al utilizado en Chichahuaxtla, se observó que el parámetro de desviación estándar es útil cuando el talud del cauce se encuentra bien definido en el modelo digital. Los resultados de la clasificación del ortomosaico para Tlaola se muestran en la Figura 6.43.

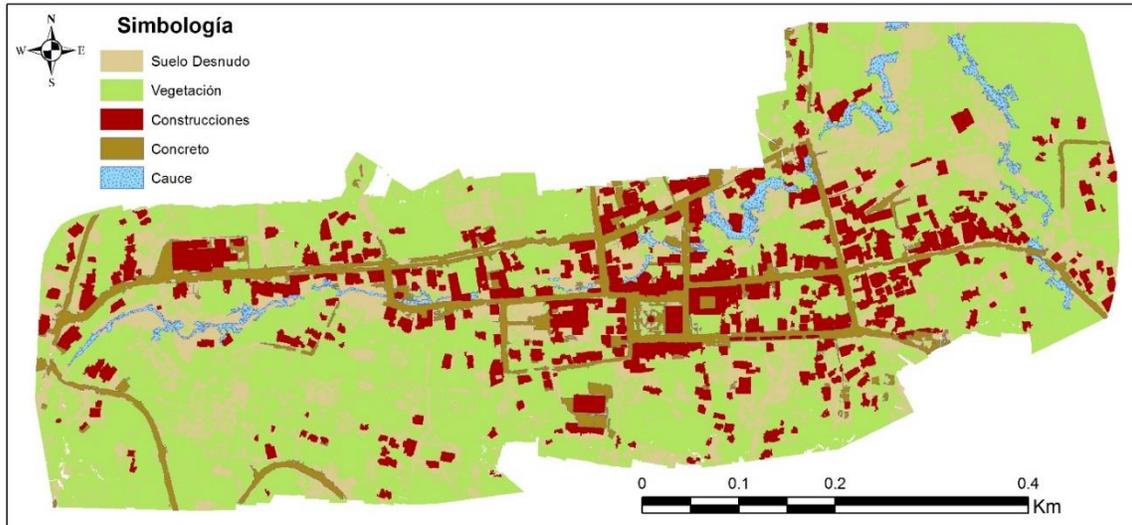


Figura 6.43. Cartografía de Tlaola

b) Precisión

La precisión global para la clasificación fue de 89 % y el coeficiente Kappa de 0.85. La precisión de las clases individuales fue muy variable. El coeficiente Kappa para las clases vegetación, construcciones y carreteras fue mayor a 0.80, esto indica que la clasificación de estas clases fue muy buena (0.80-1.0), de acuerdo a la escala de valoración del coeficiente Kappa de Landis & Koch. En lo que respecta a la clase Cauce la clasificación únicamente fue buena (0.60-0.80).

Cuadro 16. Matriz de confusión de la clasificación de Tlaola

Automático \ Manual	Vegetación	Construcciones	Carretera	Cauce	Otros	Suma
Vegetación	24,441	122	69	33	259	24,924
Construcciones	76	14,516	285	34	297	15,208
Carretera	66	290	6,934	6	577	7,873
Cauce	13	3	10	1,006	359	1,391
Otros	1,891	745	849	456	6,782	10,723
Suma	26,487	15,676	8,147	1,535	8,274	60,119
Precisión del productor	0.92	0.93	0.85	0.66	0.82	
Precisión del usuario	0.98	0.95	0.88	0.72	0.63	
Kappa por clase	0.87	0.90	0.83	0.65	0.78	
Precisión global	0.89					
Kappa	0.85					

La precisión de esta clasificación en comparación con la de Chichahuaxtla (después de la inundación) es similar, tanto en precisión global como en el índice Kappa. En lo que respectan a las clases, el coeficiente Kappa de la *vegetación* disminuyo en esta clasificación debido a que se encontraron mayor superficie de vegetación seca, lo cual el índice de ExG no logra

clasificarlo; sin embargo, en ambas clasificación este índice fue mayor a 0.8, lo que indica que la metodología empleada para clasificar automáticamente la vegetación en zonas semiurbanas con información obtenida desde VANTs es precisa.

En ambas clasificaciones de la clase *construcciones* se encontró que el coeficiente Kappa fue aproximadamente a 0.9, esto resalta la importancia de contar con modelos digitales de elevaciones y de realizar previamente la clasificación de la vegetación. Los resultados muestran que la metodología empleada para la clasificación automática de las construcciones permite obtener resultados satisfactorios. Lo mismo sucede con la clase *carreteras*, esta metodología permitió obtener una clasificación muy buena ($Kappa > 0.8$) en ambas imágenes, solamente se debe considerar que logra discriminar correctamente el concreto que tiene sedimento o lodo.

En lo que respecta a la clase *cauce*, en esta clasificación los valores de precisión e coeficiente Kappa disminuyeron en comparación con la de Chichahuaxtla, debido a que en Tlaola, en el MDT el cauce en tramos queda debajo de construcciones u obstruidos por árboles, por lo cual el algoritmo en esos tramos no funcionó correctamente. Lo anterior indica que el algoritmo propuesto funciona siempre y cuando el cauce no se encuentre obstruido.

6.5. CONCLUSIONES

El impacto del cambio de uso de suelo sobre el área de estudio se centra sobre las márgenes del río Zempoloantongo; después de la inundación, la clase que más se redujo en superficie fue el de vegetación (1.9 ha), y la que menos reducción tuvo fue el cauce (0.08 ha); la clase que más superficie aumento fue “otros” (1.53 ha) que en realidad se trata de suelo desnudo y la de menor aumento fueron las construcciones (0.02 ha). El suelo desnudo creció (“Otros”) debido a la erosión que provoco la inundación, la cual también ocasiono que la alineación del cauce cambiara y su ancho aumentara.

La cobertura de la vegetación se vio desplazada por el suelo desnudo (clase otros) en un 19% y por el cauce en un 12 %, esta disminución se centra sobre las márgenes del río. En lo que se refiere a las construcciones, se contabilizaron 60 casas afectadas totalmente, es decir, casas que fueron arrastradas completamente debido a la inundación, la mayoría de estas casas se localizaban a menos de 30 m sobre las márgenes del río Zempoloantongo, las superficies de estas construcciones ahora en su mayoría son ocupadas por el suelo desnudo (10.2 %) y cauce (1.2 %). Además, se contabilizaron cuatro casas construidas entre abril y septiembre del 2016 (Figura 6.42), los cuales en conjunto ocupan una superficie de 190 m². Mediante la comparación de imágenes no fue posible cuantificar el número de construcciones que fueron afectadas parcialmente (construcciones que fueron afectadas por la inundación pero no fueron arrastradas), esto se podría lograr realizando una simulación hidráulica de la inundación del

evento. En el caso de las carreteras, un puente vehicular colapso, por lo que su superficie de cobertura ahora fue ocupada por el cauce.

En la clasificación, el uso información proveniente de VANTs presento ventajas considerables sobre las imágenes satelitales de alta resolución, ya que la precisión de la clasificación aumento al emplear modelos digitales de elevación y ortomosaicos de muy alta resolución (<3 cm), logrando valores de coeficiente Kappa de 0.86 en Chicahuaxtla y 0.85 en Tlaola, lo que en ambos casos da como resultados una clasificación muy buena, según la escala de valoración del coeficiente Kappa de Landis & Koch, en cambio, con la imagen satelital se tuvo un coeficiente kappa de 0.74, lo que dio como resultado una clasificación buena. Estos valores muestran los alcances y precisiones que se pueden alcanzar con información adquiridas desde un VANT en la clasificación digital de imágenes.

La metodología empleadas para cartografiar la vegetación, construcciones, carreteras de concreto y cauce usando imágenes satelitales de alta resolución brindaron precisiones muy variables, desde 62% al 93%. Estas precisiones pueden aumentar si se cuenta con información de modelos digitales de elevación.

La metodología empleada para cartografiar la vegetación, construcciones y carreteras de concreto usando información de VANTs arrojaron resultados precisos, las tres clases presentaron una precisión superior al 80 % y un coeficiente Kappa mayor a 0.8, obteniendo así una clasificación muy buena. Cabe resaltar que si se desea cartografiar las construcciones previamente se debe realizar la cartografía de vegetación y sí únicamente se desea cartografiar las carreteras previamente se debe cartografiar las construcciones; lo cual indica la dependencia de las clases.

En lo que respecta a la clasificación del cauce, se encontró que el parámetro de la desviación estándar de las elevaciones del MDT permite una clasificación muy buena (índice Kappa>0.8) siempre y cuando el cauce no se encuentre obstruido por construcciones o árboles, como sucedió en Tlaola que se logró un coeficiente Kappa de 0.65, inferior a lo que se logró en Chicahuaxtla (Kappa=0.85) con un cauce bien definido en el MDT

VII. SUPERVISIÓN DE PRESAS USANDO VANTs

7.1. INTRODUCCIÓN

México es un país con gran tradición en torno a la construcción de obras hidráulicas, concretamente se estima que existen más de 4,000 presas que proporcionan una diversidad de servicios, siendo el sector agrícola mayormente beneficiado con estas estructuras como fuentes de abastecimiento de las zonas de riego (Ojeda *et al.*, 2016).

La política hidráulica en México de los últimos años, se orienta a reducir la construcción de nuevas presas, por su elevado costo y porque mucha de la infraestructura, de más de 50 años, requiere inversiones crecientes para asegurar su operación, seguridad y funcionalidad (CONAGUA, 2014) y así elevar su vida útil.

La vida útil de una presa se puede alargar cuando es operada de manera adecuada y recibe mantenimiento frecuente, sin embargo, esto no siempre sucede, de forma que la aparición de fallas o grietas en la estructura o alguna de sus obras auxiliares, pueden constituir un riesgo a mediano o largo plazo, primero de la estructura, pero lo más importante de las personas que la operan y en casos extremos, provocando daños colaterales en la población o infraestructura localizada aguas abajo de esta.

En tal sentido, la supervisión de estas infraestructuras se vuelve el primer paso para la detección de fallas. En esta supervisión, la fotogrametría, la percepción remota y los VANTs ofrecen diversas ventajas, las principales son: i) Se obtienen fotografías y videos en alta resolución de la obra en pocas misiones de vuelo, a un bajo costo. Los VANTs vuelan cerca de la superficie de interés para localizar grietas, problemas de erosión corrosión y defectos de construcción, que de otro modo requerirían plataformas, andamios, escaleras o arneses de seguridad. Anteriormente esta tarea demandaba el uso de vehículos tripulados o brigadas de supervisión, con un gran consumo de tiempo y recursos. ii) No se expone la vida del operador. El recorrido se programa de forma remota y se asiste por medio de un sistema de seguimiento computarizado. iii) En el VANT se pueden colocar cámaras térmicas y termográficas, útiles en la detección de corrosión, fugas y motores con problemas de calentamiento (Ojeda-Bustamante *et al.*, 2017).

El tipo de VANT que mayor ventaja presenta en la supervisión de estas estructuras son los multirrotor, ya que permiten realizar maniobras en forma estacionaria y/o a baja velocidad (Barrientos *et al.*, 2007).

En el presente trabajo, se adquirieron imágenes de la cortina de dos presas (La Boquilla y Valerio trujano) con un VANT hexacóptero, y se generaron modelos digitales de elevación y ortomosaicos, con el fin de determinar características como zonas de filtración y grietas, además de determinar mediante técnicas de análisis de imágenes la elevación media del vaso.

7.2.OBJETIVOS

- ❖ Generar el modelo digital de elevaciones y el ortomosaico de dos presas a partir de imágenes captadas desde un VANT.
- ❖ Clasificar automáticamente las zonas húmedas existentes sobre la cortina de una presa
- ❖ Detectar y clasificar automáticamente grietas que se encuentran sobre la cortina de una presa.
- ❖ Determinar automáticamente las elevaciones del vaso de una presa.

7.3. METODOLOGÍA

7.3.1. Zona de estudio

En este trabajo se han considerado como caso de estudio las cortinas de la presa La Boquilla y Valerio Trujano, el primero ubicado en el estado de Chihuahua y el segundo en Guerrero, México.

a) Presa la boquilla

La presa de almacenamiento La Boquilla es la principal fuente de abastecimiento de agua del Distrito de Riego 005 Delicias, en el estado de Chihuahua. Esta presa también produce energía eléctrica. La presa está ubicada sobre el Río Conchos en las coordenadas $27^{\circ} 32' 39.5''$ latitud norte y $105^{\circ} 24' 46.7''$ longitud oeste en el municipio de San Francisco de conchos (Figura 7.1).

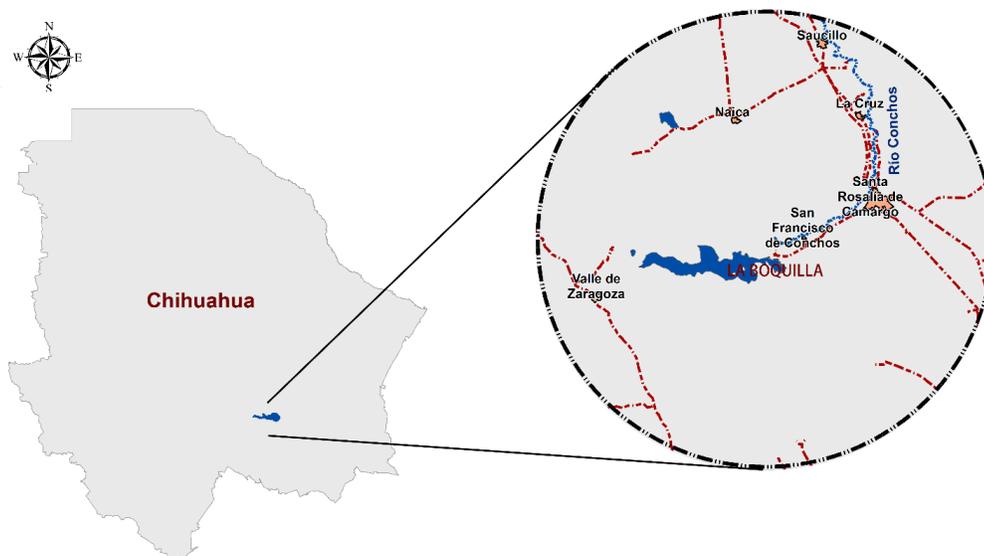


Figura 7.1. Macro y microlocalización de la presa La Boquilla

La cortina de la presa La Boquilla (Figura 7.2) es de sección gravedad de mampostería y concreto, en planta curva; tiene una altura máxima de 82 m, con ancho en la base de 60 m. En la parte de aguas arriba de la base se construyó un dentellón de concreto de 6 m de profundidad y ancho de 10 m; en el cuerpo de la cortina y a 12 m del paramento mojado se dejó una galería

de sección portal para inspección y drenaje cuyas dimensiones son: ancho de 8 m, altura de 9 m y longitud de 130 m.

La corona que tiene una longitud de 270.20 m, se encuentra a la elevación de 1,317 msnm (pasillo) y 1,322.00 msnm hasta el parapeto actual sobreelevado. El paramento de aguas arriba de la cortina es vertical y el de aguas abajo también vertical hasta la elevación 1,314.00 msnm y de ahí hasta el desplante con talud 0.71:1.



Figura 7.2. Cortina de la presa La Boquilla

Para la obra de toma se instalaron originalmente siete tuberías, cuyo eje a la entrada está a la elevación 1,290 msnm. Actualmente, sólo se utilizan las cuatro tuberías centrales de 2.60 m de diámetro para la producción de energía, que se apoyan en silletas sobre el talud de aguas abajo de la cortina. Las tuberías de la obra de toma transportan el agua con un gasto máximo en conjunto de $44 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta las turbinas de eje horizontal tipo Francis de 10,000 HP cada una.

b) Presa Valerio trujano

La presa Valerio Trujano está ubicada sobre el río Tepecoacuilco en el municipio del mismo nombre, en el estado de Guerrero, a 10 km al sureste de la ciudad de Iguala, con coordenadas $18^\circ 17' 45''$ latitud norte y $99^\circ 28' 00''$ longitud oeste. La presa fue construida para regularizar y aprovechar en riego los escurrimientos del río Tepecoacuilco, en beneficio de 3,400 ha.

La cortina es de tipo roca con corazón impermeable y respaldos de materiales friccionantes formados por rezaga (roca o mineral fracturada por explosivos) aguas arriba; arena y rezaga aguas abajo. Los paramentos exteriores están protegidos contra oleaje y erosión con chapas de roca.

La cortina tiene una altura máxima sobre el desplante de 33.30 m (25.30 m sobre el lecho del río), un ancho en la base de 155 m y de 10 m en la corona. La longitud de la corona es de 1,230 m, los taludes aguas arriba y aguas abajo son de 2:1 desde la corona hasta unas banquetas de 6 m de ancho, localizadas a la elevación 820.00 msnm. Desde estas banquetetas hasta el cauce del río la elevación del desplante de la cimentación es de 811.00 msnm, del fondo del cauce 819.00 msnm y de la corona 844.30 msnm el bordo libre es de 1.52 m.

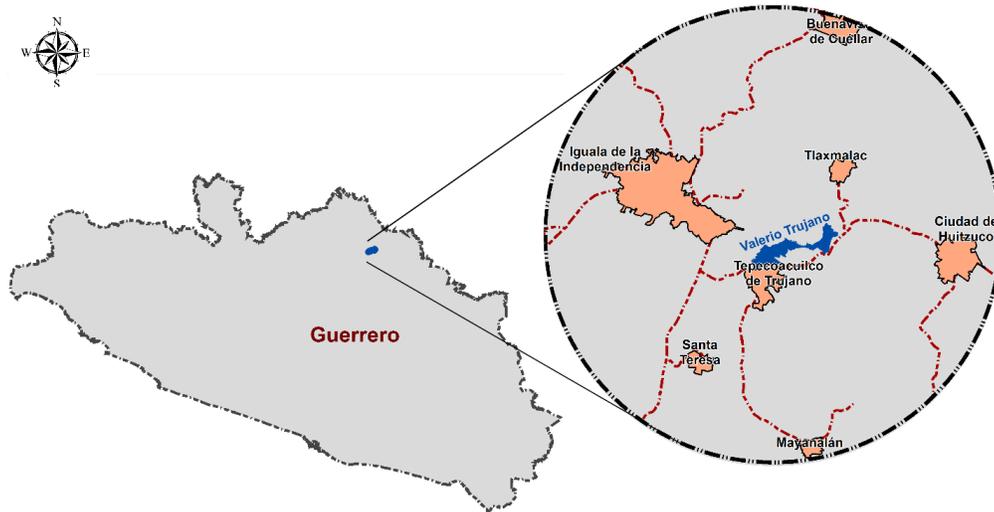


Figura 7.3. Macro y microlocalización de la presa Valerio Trujano

La obra de excedencia se encuentra alojada en el extremo derecho de la cortina; es de cresta libre de planta circular y descarga por un canal convergente a un tanque amortiguador. El gasto de la avenida de diseño es de $1,100 \text{ m}^3/\text{s}$ y el gasto de la capacidad máxima de descarga es de $780 \text{ m}^3/\text{s}$.

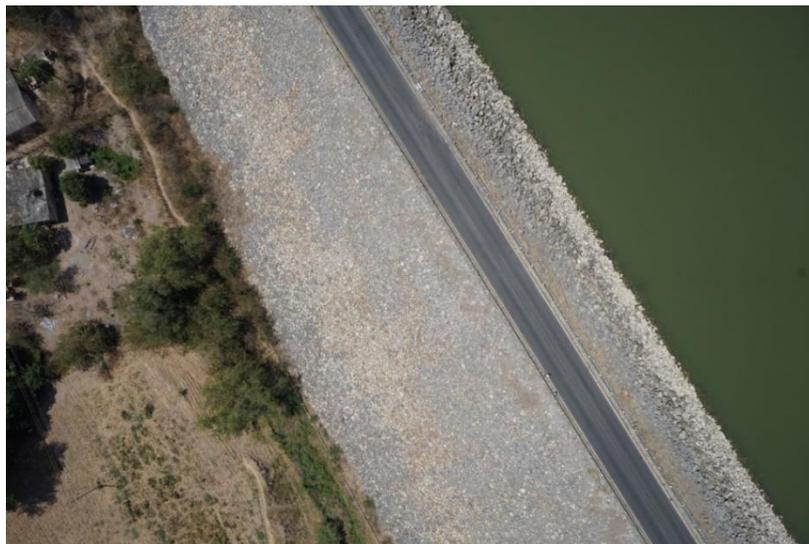


Figura 7.4. Vista aérea de la cortina de la presa Valerio trujano

La longitud de la cresta vertedora es de 97.82 m con radio de 123.91 m, se encuentra a una la elevación de 839.94 msnmm. Inmediatamente aguas debajo de la cresta se inicia el canal de descarga, formado por una rápida de sección trapecial de concreto reforzado convergente en planta, con taludes 0.5:1 y pendiente ligeramente superior a la crítica, la cual termina en un tanque amortiguador.

El tanque amortiguador es de 20 m de ancho por 41 m de longitud y 3.50 m de profundidad con taludes de 0.5:1. El cual está provisto de dientes de concreto reforzado. Descarga al río por un canal de 25 m de ancho de plantilla con taludes 1.5:1.

La obra de toma se encuentra alojada en la ladera derecha, entre el cauce del río y la obra de excedencias, está formada por un conducto de concreto reforzado de sección oval, alojado en un tajo abierto en la roca y cubierto por el cuerpo de la cortina. El control de las extracciones se hace por medio de compuertas deslizantes operadas desde una torre de toma, situada en el extremo de aguas arriba del conducto y a la que se tiene acceso por medio de un puente, la elevación del umbral de la obra de toma es de 829.93 msnm y el gasto máximo de diseño es de 20.0 m³/s.

7.3.2. Adquisición de la información: Presa la boquilla

a) Apoyo topográfico

Se ubicaron y marcaron 16 puntos de control sobre el terreno antes del vuelo para que estas aparezcan claramente identificados en las imágenes (Figura 7.5). Las coordenadas de estos puntos se obtuvieron con un GPS RTK en coordenadas UTM para la zona 13N.



Figura 7.5. Ubicación de puntos de control en la cortina de la presa La Boquilla

b) Misión de vuelo y Adquisición de las imágenes

Se adquirieron 137 imágenes RGB en un vuelo sobre la cortina de la presa, el vuelo se realizó al mediodía. El equipo utilizado para la toma de las imágenes fue el VANT hexacóptero DJI A2 y la cámara SONY α 5100 descritas en la sección 4.1. En total, se cubrió una superficie aproximada de 5 ha en un tiempo efectivo de 7 minutos, a una altura máxima y mínima sobre la superficie de 103 y 45 m, respectivamente, (Figura 7.6), la cual corresponde a una resolución espacial promedio de las imágenes de 1.6 cm/píxel.

En el caso de los traslapes, las imágenes obtenidas con VANTs deben tener un alto porcentaje de traslape para que el procesamiento fotogramétrico pueda beneficiarse potencialmente, lo que permitirá la generación de modelos digitales de alta calidad (Haala, Cramer, & Rotherme, 2013). En este caso, el traslape frontal y lateral de las imágenes fue de 75 %. Las misiones de vuelo fueron creadas y ejecutadas con el Software UgCS (SPH Ingeniería, Riga, Letonia).



Figura 7.6. Misión de vuelo sobre la presa la boquilla

7.3.3. Adquisición de la información: Presa Valerio trujano

a) Apoyo topográfico

Se ubicaron y marcaron 20 puntos de control sobre el terreno antes del vuelo, las coordenadas arbitrarias de estos puntos se obtuvieron con una estación total NIKON.

b) Misión de vuelo y Adquisición de las imágenes

Se adquirieron 315 imágenes RGB en tres vuelos sobre la cortina y el vertedor de la presa (Figura 7.7). El equipo utilizado para la toma de las imágenes fue el VANT hexacóptero DJI A2 y la cámara SONY α 5100 descritas en la sección 4.1. En total, se cubrió una superficie aproximada de 43 ha, en un tiempo efectivo de 15 minutos, a una altura media de 115 m sobre la superficie, la cual corresponde a una resolución espacial promedio de las imágenes de 2.6

cm/pixel. El traslape frontal y lateral entre imágenes fue de 75 %. Las misiones de vuelo fueron creadas y ejecutadas con el Software UgCS (SPH Ingeniería, Riga, Letonia).



Figura 7.7. Misiones de vuelo sobre la cortina de la presa Valerio Trujano

7.3.4. Procesamiento de la información

El programa utilizado para la restitución fotogramétrica (sección 3.2.8) de las imágenes de ambos sitios fue “PhotoScan” (Agisoft, 2016). La alineación de las imágenes y la nube de puntos densa se generaron en calidad media. En el entorno del programa se realizó la corrección geométrica de las imágenes RGB en base a los puntos de control terrestres.

Esta restitución fotogramétrica permitió generar los ortomosaicos y los modelos digitales de elevación (MDE). Estos modelos fueron utilizados para identificar estructuras de interés y realizar mediciones sobre ellas, con el fin de compararlos con los reportados en el sistema de seguridad de presas de CONAGUA.

7.3.5. Análisis de la información

a) Detección automática de zonas húmedas sobre la cortina

En la cortina de la presa la boquilla se presentan zonas húmedas, debido a la existencia de una filtración a la altura de la obra de toma alta. Para clasificar automáticamente estas zonas húmedas se utilizó un ortomosaico RGB, y técnicas de segmentación basadas en detección de similitudes. Además, se probaron dos métodos de análisis de imágenes, el primero basado en objetos (*Object Based Image Analysis, OBIA*) y el segundo en pixel; por lo cual se utilizaron los programas Matlab y eCognition, Matlab para la clasificación basada en pixel, y eCognition (Trimble, 2017) para nivel objetos.

El análisis de imágenes orientado a objetos presenta dos etapas fundamentales: la segmentación de la banda o bandas de entrada, y la posterior clasificación de los segmentos previamente definidos. En este caso, para segmentar la imagen se utilizó el algoritmo *Multiresolution*

Segmentation (Liu & Yang, 1994), con la cual los segmentos son creados en base a tres criterios: escala, color y forma (suavidad y compactibilidad) (González, Quintano, & Edemir, 2009). El factor de escala utilizado fue de 10 y se asignó un peso de 1 a las tres bandas del ortomosaico. En el caso del análisis orientado a pixel no fue necesario aplicar algún método de segmentación previo, ya que el análisis se realizó directamente sobre los píxeles de la imagen.

Posteriormente, para transformar el ortomosaico RGB en escala de grises, se aplicó una ecuación modificada (ExRm) del índice de exceso de rojo (ExR) (Meyer, Hindman, & Lakshmi, 1998). En el caso del método basada en objetos, la ecuación se aplicó a cada segmento, mientras que en el segundo método la ecuación se aplicó a cada pixel de la imagen.

$$ExR = 1.4r - b \quad (27)$$

$$ExRm = 1.4g - b \quad (28)$$

$$r = \frac{R}{R + G + B} \quad g = \frac{G}{R + G + B} \quad b = \frac{B}{R + G + B} \quad (29)$$

$$R = \frac{R}{R_{max}}; G = \frac{G}{G_{max}}; B = \frac{B}{B_{max}} \quad (30)$$

Dónde: R, G, B, son los valores de la banda roja, verde y azul, respectivamente y r, g, b, son valores de normalización de las bandas R, G, B.

Con respecto al ExR, en el índice propuesto (ExRm) se cambió el valor de la normalización de la banda roja (r) por la verde (g) para resaltar las zonas húmedas y se dejó la normalización de la banda azul (b) para no resaltar el concreto y la mampostería, este nuevo índice tienen valores que van desde -0.4 hasta 1.

A partir del histograma de intensidades de la imagen en escala de grises se clasificaron las zonas húmedas mediante valores umbrales. Los umbrales actúan como separadores que permiten decidir qué conjunto de tonos de gris pertenece a una determinada clase (Alfaro & Sipián, 2012). Los valores umbrales se obtuvieron aplicando tres diferentes algoritmos de segmentación basados en detección de similitudes: ISODATA (Ball & Hall, 1965), Otsu de un umbral (Otsu, 1979) y Otsu multiumbral (Otsu, 1979).

Mediante los algoritmos de ISODATA y Otsu de un umbral, los píxeles o segmentos cuyos valores de ExRm estaban por encima del umbral se consideraron como zonas húmedas, mientras que los que tenían una respuesta por debajo el umbral no se clasificaron. En el caso de Otsu multiumbral, se obtuvieron dos valores umbrales (U1 y U2), por lo que se clasificaron como zonas húmedas los píxeles o segmentos cuyos valores de ExRm estaban entre U1 y U2.

Para estimar la precisión de las clasificaciones se calculó la matriz de confusión. A partir de esta matriz, se calcularon parámetros, como: i) la precisión global (Ecuación 23), que cuantifica el número de píxeles correctamente clasificados, ii) la precisión del productor (Ecuación 24), que indica la probabilidad de que un píxel de la clase i está correctamente clasificado, iii) la precisión

del usuario (Ecuación 25), que indica la probabilidad de que un píxel clasificado como clase i corresponda realmente a dicha clase y iv) el coeficiente Kappa (Ecuación 26) (Cohen, 1960).

b) Detección automática de grietas

Se seleccionó un área sobre la cortina de la presa La Boquilla que presenta grietas (Figura 7.8); la imagen que inicialmente se obtuvo en RGB se convirtió a escala de grises mediante la ecuación 29 propuesta por Pereira & Pereira (2015), en donde $CD(x, y)$ comprende un valor de intensidad de nivel de píxel entre 0 y 255, y R, G, B representan los componentes rojo, verde y azul de la imagen, respectivamente. Esta ecuación hace que en la imagen en escala de grises resalten grietas sobre superficies de concreto que se observan en una imagen en RGB.



Figura 7.8. Imagen en RGB de una grieta sobre la cortina

$$CD(x, y) = 0.2990 * R(x, y) + 0.5870 * G(x, y) + 0.1140 * B(x, y) \quad (31)$$

La imagen en escala de grises se suavizó con un filtro gaussiano $Fg(x, y)$ (Ecuación 34) de 3×3 con un parámetro de escala $\sigma=0.5$ (Fgo); en donde el valor de cada píxel fue el resultado de promediar con distintos pesos los valores vecinos a ambos lados de dicho punto. El tamaño de la matriz y el valor del parámetro de escala seleccionado, fue resultado de ensayos que se hicieron, en el cual se probaron diferentes valores, y se seleccionaron los que permitían que no se perdiera el detalle de la grieta en la imagen.

$$Fg(x, y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (32)$$

$$Fgo = \begin{bmatrix} 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \\ 0.0838 & 0.6193 & 0.0838 \\ 0.0113 & 0.0838 & 0.0113 \end{bmatrix}$$

Sobre esta última imagen con filtro Gaussiano se detectaron las grietas empleando tres distintos métodos de segmentación basados en discontinuidades, el primero basado en detección de puntos, el segundo en líneas y el tercero en bordes.

Detección de puntos

En la segmentación basada en detección de puntos se aplicó a la imagen una máscara Laplaciana de 3x3 (M_0), en donde el punto central tiene un peso mayor ya que los puntos aislados difieren significativamente de los tonos de grises de sus píxeles vecinos, es decir, de los ocho píxeles de su entorno. La multiplicación de la imagen por la máscara devolvió otra imagen en escala de grises (R).

$$M_0 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ -1 & 8 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

El segundo paso consistió en la clasificación de las grietas, para evitar que se clasifiquen las grietas falsas se empleó el operador umbral con *histéresis*, es decir, se seleccionaron dos valores umbrales, uno superior (T_2) y otro inferior (T_1); el valor de T_1 se obtuvo con el algoritmo de umbralización de Otsu (Otsu, 1979) a partir de los valores de los píxeles de la imagen R y T_2 con la Ecuación 33. Los píxeles de R cuyos valores absolutos estaban por encima de T_2 se consideraron como grietas y se les asignó el valor de uno, mientras que los que tenían una respuesta en valor absoluto por debajo de T_1 no se consideraron como grietas y se les asignó un valor de cero. Los que estaban entre T_1 y T_2 y a la vez unidos a un píxel de grieta se les asignó el valor de uno. Esto proporcionó una imagen binarizada.

$$T_2 = T_1 + T_1/3 \quad (33)$$

Finalmente, a la imagen binarizada se le aplicó la operación morfológica de cierre con elemento estructurante tipo disco de radio 2 (M_c) y se eliminaron los objetos aislados que tenían un área menor o igual a cinco píxeles. En la imagen resultante las grietas quedaron representados en color blanco.

$$M_c = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Detección de líneas

En la segmentación basada en detección de líneas se aplicó a la imagen cuatro máscaras (M_1 , M_2 , M_3 y M_4) de 3x3, cada máscara buscó líneas en una dirección (horizontal, vertical y diagonal) y se aplicó de manera separada. Mediante estas máscaras los píxeles que formaban parte de una línea horizontal, vertical o diagonal, tuvieron respuestas extremas. La multiplicación de la imagen por las máscaras devolvió cuatro imágenes en escala de grises (R_1 , R_2 , R_3 y R_4).

$$M_1 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 \\ 2 & 2 & 2 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad M_2 = \begin{bmatrix} -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \end{bmatrix} \quad M_3 = \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \quad M_4 = \begin{bmatrix} -1 & -1 & 2 \\ -1 & 2 & -1 \\ 2 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

El segundo paso consistió en la clasificación de las grietas, se clasificaron las imágenes por separado; se empleó el operador umbral con *histéresis*; el valor de T1 se obtuvo con el algoritmo de umbralización de Otsu a partir de los valores de los píxeles de las imágenes y T2 con la Ecuación 33. Se utilizó el mismo criterio de clasificación que en la segmentación basada en puntos. La clasificación proporcionó cuatro imágenes binarizadas. Considerando todos los píxeles con valor de uno de estas cuatro imágenes se formó uno solo (R₅).

Finalmente, a la imagen binarizada se le aplicó la operación morfológica de cierre con elemento estructurante tipo disco de radio 2 (Mc) y se eliminaron los objetos aislados que tenían un área menor o igual a 20 píxeles. En la imagen resultante las grietas quedaron representados en color blanco.

Detección de bordes

En la segmentación basada en detección de bordes se empleó el método de Canny (Canny, 1986). En la aplicación de este método, primeramente se calcularon para cada píxel de la imagen las magnitudes del gradiente (G) y las direcciones de los bordes locales (θ).

$$G[CD(x, y)] = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial CD(x, y)}{\partial x} \\ \frac{\partial CD(x, y)}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$\frac{\partial CD(x, y)}{\partial x} = CD(x + 1, y) - f(x, y) \quad (35)$$

$$\frac{\partial CD(x, y)}{\partial y} = CD(x, y + 1) - f(x, y) \quad (36)$$

$$|G| = \sqrt{G_x^2 + G_y^2} \quad (37)$$

$$\theta(x, y) = \tan^{-1} \frac{G_y}{G_x} \quad (38)$$

El segundo paso consistió en la supresión de máximos locales de las magnitudes del gradiente. Se observó si el valor de la magnitud de gradiente era más pequeño que al menos uno de sus dos vecinos en la dirección del ángulo θ se asignó el valor 0 a dicho píxel, en caso contrario se asignó el valor de la magnitud del gradiente. Este paso proporcionó una imagen en escala de grises (R).

En el tercer paso se eliminaron los bordes falsos o bordes dobles mediante el operador umbral con *histéresis*; el valor de T1 se obtuvo con el algoritmo de umbralización de Otsu a partir de los valores de gradiente de R y T2 con la Ecuación 33. Los píxeles de R cuyo valor de la

magnitud del gradiente estaban por encima de T2 se consideraron parte del borde y se les denominó bordes fuertes, mientras que los que tenían una respuesta por debajo del umbral inferior no se consideraron bordes. Los que estaban entre T1 y T2 se les denominó bordes débiles. Posteriormente se incorporaron como bordes aquellos bordes débiles que estaban conectados a bordes fuertes. Este paso proporcionó una imagen binarizada.

El cuarto paso consistió en cerrar los contornos que pudiesen haber quedado abiertos por problemas de ruido. Para esto, se usó el algoritmo de Deriche y Cocquerez (Monga, Deriche, Malandain, & Cocquerez, 1991) el cual usa la máscara Md para buscar los extremos de los contornos abiertos y sigue la dirección del máximo gradiente hasta cerrarlos. La multiplicación de la imagen binarizada por la máscara proporcionó que los extremos de los contornos abiertos tuvieran uno de los ocho patrones posibles (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128), en esos extremos se tomó como pixel de borde el del máximo gradiente en las tres dimensiones.

$$Md = \begin{bmatrix} 2^0 & 2^1 & 2^2 \\ 2^7 & 0 & 2^3 \\ 2^6 & 2^5 & 2^4 \end{bmatrix}$$

Finalmente, a la imagen binarizada se le aplicó la operación morfológica de cierre con elemento estructurante tipo disco de radio 2 (Mc) y se eliminaron los objetos aislados que tenían un área menor o igual a 50 píxeles. En la imagen resultante las grietas quedaron representadas en color blanco.

Todos los algoritmos fueron realizados en el programa Matlab, como ejemplo se muestra el código empleado para la clasificación de grietas usando el método de segmentación basado en detección de puntos:

```
%%Leer imagen-----%%
X=double(imread('Crack_Boquilla1.tif','tif'));
X = fix(double(X));
X(X==256) = 0/0;
X(X==0) = 0/0;
% Imagen en escala de grises y filtro Gaussiano
Exgi2 = 0.2990*X(:,,1)+0.5870*X(:,,2)+0.1140*X(:,,3);
BB=fspecial('gaussian', 3,0.5);
Exgi=imfilter(Exgi2,BB, 'replicate');

% Multiplicación de mascara Laplaciana por la imagen
[n,m]=size(Exgi);
M1= [-1 -1 -1; -1 8 -1; -1 -1 -1];
ExgM1=zeros(n-2,m-2);
Cx=2;
Cy=2;
for i=2:n-1
    for j=2:m-1
        if Exgi(i-1,j-1)*Exgi(i-1,j)*Exgi(i-1,j+1)*Exgi(i,j-1)*Exgi(i,j)*Exgi(i,j+1)*Exgi(i+1,j-1)*Exgi(i+1,j)*Exgi(i+1,j+1)~=0
```

```

        ExgM1(i-1,j-1)=abs(M1(Cx-1,Cy-1)*Exgi(i-1,j-1)+M1(Cx-1,Cy)*Exgi(i-1,j)+M1(Cx-
1,Cy+1)*Exgi(i-1,j+1)+M1(Cx,Cy-1)*Exgi(i,j-
1)+M1(Cx,Cy)*Exgi(i,j)+M1(Cx,Cy+1)*Exgi(i,j+1)+M1(Cx+1,Cy-1)*Exgi(i+1,j-
1)+M1(Cx+1,Cy)*Exgi(i+1,j)+M1(Cx+1,Cy+1)*Exgi(i+1,j+1));
    else
        ExgM1(i-1,j-1)=0/0;
    end
end
end
end

```

%Creando el histograma

```

[n,m]=size(ExgM1);
Exga=zeros(1,n*m);
con=1;
for i=1:n
    for j=1:m
        Exga(1,con)=ExgM1(i,j);
        con=con+1;
    end
end
Vc=linspace(min(Exga),max(Exga)+0.000000000000001,256);
Vn=zeros(1,256);
Exg1 = sort(Exga);
[n,m]=size(Exg1);
Super=0;
infer=0;
for i=1:255
    for j=infer+1:m
        if Exg1(1,j)<Vc(1,i+1)
            Super=Super+1;
        elseif Exg1(1,j)>=Vc(1,i+1)
            break
        end
    end
    Vn(1,i)=Super-infer;
    infer=Super;
end

Pr=zeros(1,256);
for i=1:256
    Pr(1,i)=Vn(1,i)/Super;
end

```

%Cálculo del Valor umbral T1 con el algoritmo de Otsu

```

Dtt=zeros(1,256);
conta=1;
for k=1:256
    W1=0;
    W2=0;
    for i=1:256
        if Vc(1,i)<=Vc(1,k)

```

```

        W1=W1+Pr(1,i);
    else
        W2=W2+Pr(1,i);
    end
end
if (W1*W2)>0
    C1=zeros(1,256);
    C2=zeros(1,256);
    for i=1:256
        if Vc(1,i)<=Vc(1,k)
            C1(1,i)=Pr(1,i)/W1;
        else
            C2(1,i)=Pr(1,i)/W2;
        end
    end
    U1=0;
    U2=0;
    for i=1:256
        U1=U1+i*C1(1,i);
        U2=U2+i*C2(1,i);
    end
    Ut=U1*W1+U2*W2;
    Dt=W1*(U1-Ut)^2+W2*(U2-Ut)^2;
    Dtt(1,k)=Dt;
else
end
end
Posicion=median(Vc(1,Dtt==max(Dtt)));

```

% Binarización de la imagen con umbralización por histéresis

```

Bina2=ExgM1;
[n,m]=size(Bina2);
for i=1:n
    for j=1:m
        if abs(ExgM1(i,j))>=abs(Posicion)+Posicion/3 % Ecuación de T2
            Bina2(i,j)=1;
        elseif abs(ExgM1(i,j))<abs(Posicion)
            Bina2(i,j)=0;
        else
            Bina2(i,j)=0;
        end
    end
end
Bina3=Bina2;
for i=2:n-1
    for j=2:m-1
        if Bina3(i,j)==1
            if abs(ExgM1(i-1,j-1))>=abs(Posicion)
                Bina3(i-1,j-1)=1;
            elseif abs(ExgM1(i-1,j))>=abs(Posicion)
                Bina3(i-1,j)=1;
            end
        end
    end
end

```


agua del vaso. El tamaño de la matriz y el valor del parámetro de escala seleccionado, fue resultado de ensayos que se hicieron, en el cual se probaron diferentes valores.

$$Fg1 = \begin{bmatrix} 0.0751 & 0.1238 & 0.0751 \\ 0.1238 & 0.2042 & 0.1238 \\ 0.0751 & 0.1238 & 0.0751 \end{bmatrix}$$

A partir del histograma de intensidad de la imagen Nag se calculó el valor umbral que permitió separa los pixeles de la cortina y del vaso; este valor umbral se calculó con el algoritmo de umbralización de Otsu (Otsu, 1979); los pixeles de la imagen cuyo valor era menor que el valor umbral se consideraron como parte de la cortina y se les asignó un valor de cero, mientras que los que tenían una respuesta por arriba del umbral se consideraron como parte del vaso y se les asigno un valor de uno. El resultado de esta clasificación fue una imagen binarizada donde los pixeles del vaso estaban representados en color blanco y los de la cortina en negro. A esta imagen binarizada se le aplico la operación morfológica de relleno de huecos para evitar que quedaran pixeles negros sobre el vaso.

Sobre la imagen binarizada se aplicó el método de detección de bordes de Canny (Canny, 1986); el cual consiste en cuatro pasos que se ejecutaron de la siguiente manera:

- i. Se calcularon para cada pixel de la imagen las magnitudes del gradiente (G) y las direcciones de los bordes locales (θ).
- ii. Se hizo la supresión de máximos locales de las magnitudes del gradiente.
- iii. Se eliminaron los bordes falsos mediante el operador umbral con *histéresis*; es decir, se seleccionaron dos valores umbrales, uno superior (T2) y otro inferior (T1); el valor de T1 se obtuvo con el algoritmo de umbralización de Otsu (Otsu, 1979) a partir de los valores de gradiente y T2 con la Ecuación 33. Los píxeles de la imagen cuyo valor de la magnitud del gradiente estaban por encima de T2 se consideraron parte del borde y se les denominó bordes fuertes, mientras que los que tenían una respuesta por debajo de T1 no se consideraron bordes. Los que estaban entre T1 y T2 se les denominó bordes débiles. Posteriormente se incorporaron como bordes aquellos bordes débiles que estaban conectados a bordes fuertes. Este paso proporciono otra imagen binarizada con los bordes representados en color blanco.
- iv. Se cerraron los contornos que pudiesen haber quedado abiertos por problemas de ruido, se usó el algoritmo de Deriche y Cocquerez (Monga, Deriche, Malandain, & Cocquerez, 1991) el cual usa la máscara Md para buscar los extremos de los contornos abiertos y sigue la dirección del máximo gradiente hasta cerrarlos; la multiplicación de la imagen binarizada por la máscara proporciono que los extremos de los contornos abiertos tuvieran uno de los ocho patrones posibles (1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 128), en esos extremos se tomó como pixel de borde el del máximo gradiente en las tres dimensiones.

Posteriormente, se eliminaron los bordes que tenían una longitud menor o igual a 1,000 px. Y del MDS se extrajeron las elevaciones de los pixeles que representaban el borde entre la cortina

y el vaso, y se calculó la media y la desviación estándar de esas elevaciones, esta media representa el nivel del vaso de la presa.

La media de las elevaciones extraídas con esta metodología se comparó con la media de las mediciones de 19 puntos de verificación, con el fin de comparar la diferencia que existe entre los valores calculados y los medidos. Estas elevaciones se muestran en el Cuadro 17.

Cuadro 17. Elevación de los puntos de verificación

Puntos	Elevación	Puntos	Elevación
1	92.398	11	92.405
2	92.455	12	92.366
3	92.407	13	92.407
4	92.427	14	92.436
5	92.360	15	92.428
6	92.438	16	92.367
7	92.387	17	92.522
8	92.406	18	92.536
9	92.456	19	92.452
10	92.443	Media	92.426

7.4. RESULTADOS

7.4.1. Presa la boquilla

a) Procesamiento de la información

La resolución espacial del ortomosaico fue de 1.6 cm/píxel y el del modelo digital de elevaciones (MDS) de 6.5 cm/píxel; la nube de puntos densa resultó con 17.5 millones de puntos con coordenadas X, Y y Z. La resolución del ortomosaico y del MDS fueron diferentes, ya que la resolución del MDS dependió de la altura a la que se adquirieron las imágenes y de la calidad con que se realizaron la alineación y la densificación de la nube de puntos, mientras que la resolución del ortomosaico dependió únicamente de la altura a la que se adquirieron las imágenes

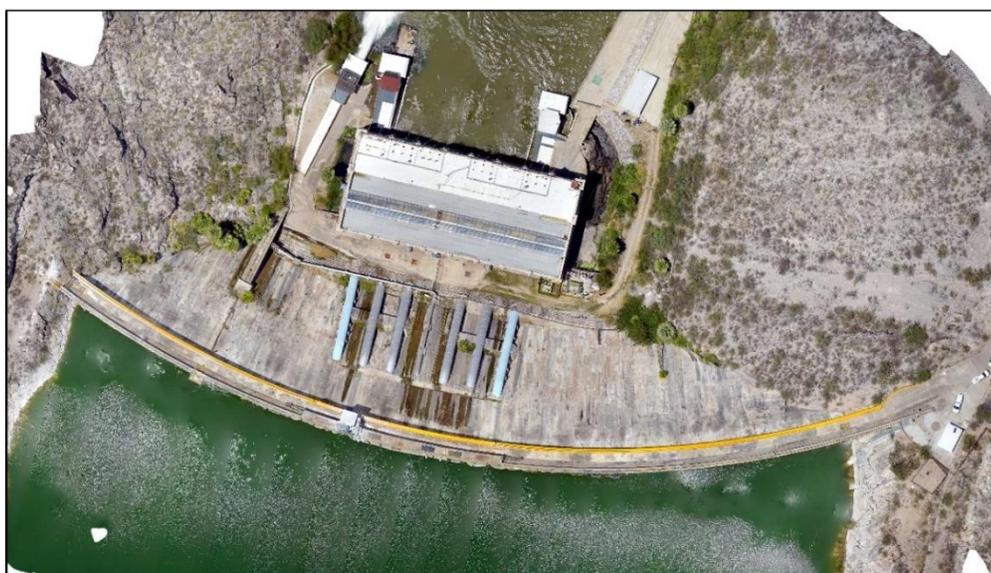


Figura 7.9. Ortomosaico de la presa La Boquilla

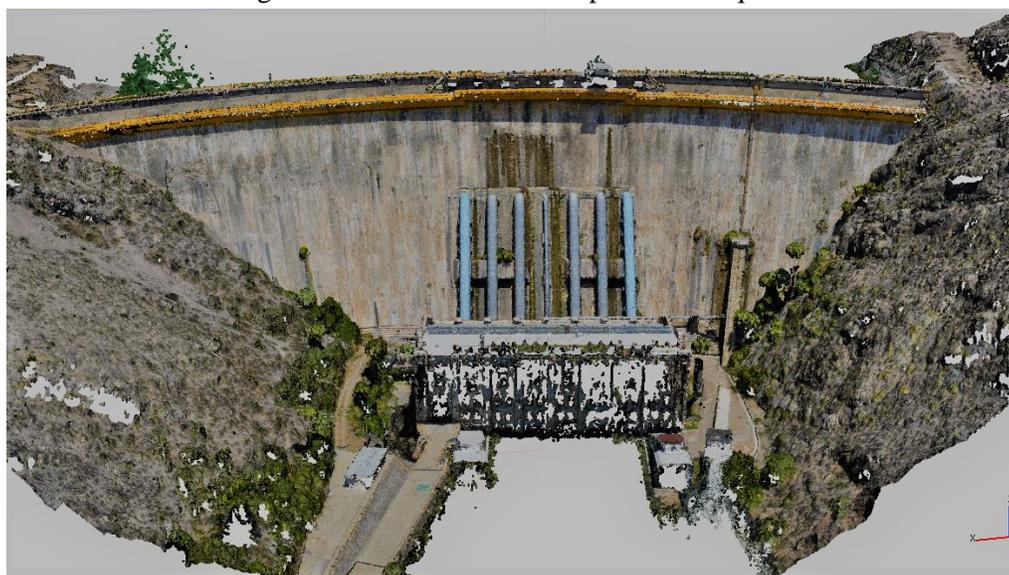


Figura 7.10. Nube de puntos de la presa La Boquilla

El RMSE del modelo digital de elevaciones evaluado en 23 puntos de verificación fue de 3.7 cm, 3.4 cm y 5.4 cm, en X, Y y Z respectivamente. El RMSE en el plano (X, Y, Z) fue de 7.3 cm. El error máximo encontrado fue de 14.9 cm, 12.4 cm y 17.4 cm en X, Y y Z, respectivamente.

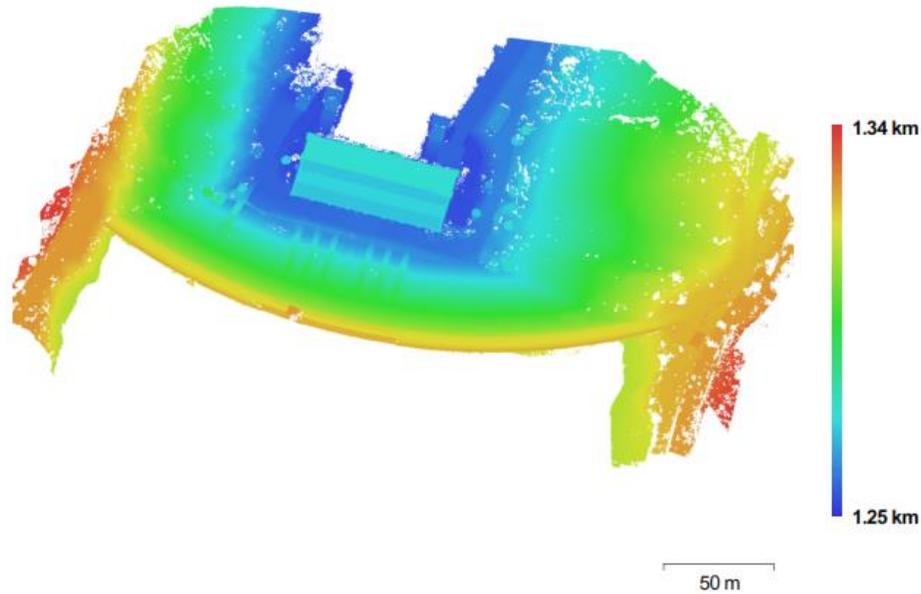


Figura 7.11. Modelo digital de superficie de la presa La Boquilla



Figura 7.12. Medida de la longitud de la cortina y el ancho del parapeto

Los resultados anteriores indican que los productos obtenidos son de alta resolución espacial y que las mediciones que se hacen en el ortomosaico y en el modelo digital de elevaciones son precisas. En esta vertiente; la longitud de la cortina y el ancho del parapeto medido sobre ortomosaico resulto de 270 m y 0.952 m, respectivamente (Figura 7.12), la altura de la cortina medida sobre el modelo digital de elevaciones fue de 79.72 y el perfil de la cortina se muestra en el Figura 7.13. De acuerdo a estas mediciones y las que reporta la CONAGUA, 2017a, en el

ancho del parapeto existe una diferencia de 0.2 cm, los taludes aguas abajo de la cortina, su longitud total, su altura y las elevaciones a las que se encuentran las estructuras son muy similares.

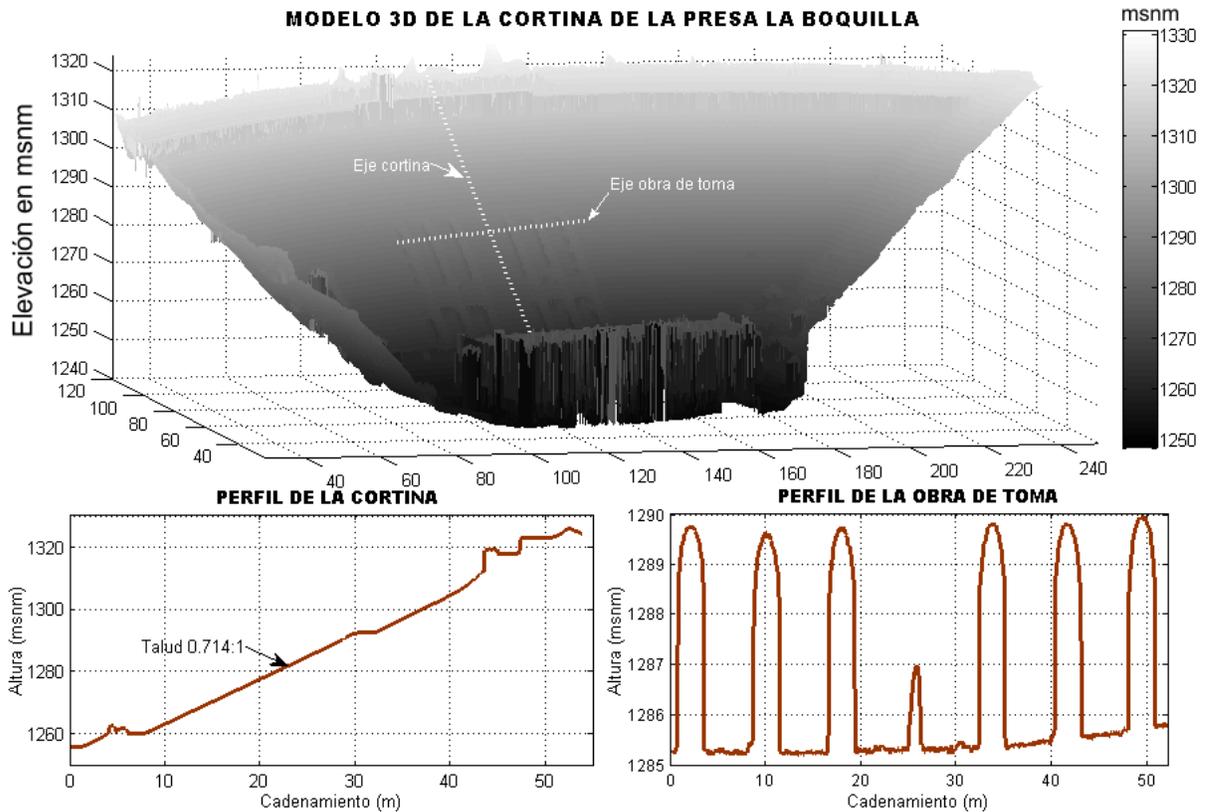


Figura 7.13. Perfil de la cortina de la presa La Boquilla

b) Detección automática de zonas húmedas

Los valores umbrales del histograma de intensidad de la imagen, que determinaron los límites de las zonas húmedas fueron: con el algoritmo ISODATA de 0.257, con Otsu de un umbral de 0.254 y con Otsu de dos umbrales de 0.206 y 0.360.

En la Figura 7.15 se muestra la clasificación basado en objetos y en la Figura 7.16 la clasificación basada en pixel de las zonas húmedas realizado en Matlab. En la clasificación basado en objetos, usando el algoritmo Otsu multiumbral se obtuvo una precisión global del 98 % y un coeficiente Kappa de 0.85 (Cuadro 18), esto indica que la clasificación fue muy buena (0.80-1.0), de acuerdo a la escala de valoración del coeficiente Kappa de Landis & Koch; de los otros dos algoritmo (de un umbral) el que presenta mejor precisión es el de Otsu ya que tiene un coeficiente Kappa superior al de ISODATA aunque en precisión global son idénticos (94 %).

La ecuación propuesta para transformar la imagen RGB en escala de grises permitió resaltar con éxito las zonas húmedas sobre la cortina de otras superficies; sin embargo, al asignarle un peso mayor a la banda verde provocó que la vegetación tuviera valores altos de intensidad de pixel,

cercanos al límite superior (Figura 7.14); por esta razón, de los tres algoritmos utilizados en la clasificación, el algoritmo Otsu multiumbral fue el de mayor precisión ya que se pudieron separar los píxeles en tres clases: concreto, zonas húmedas y vegetación; mientras que con los otros dos algoritmos solo separaron los píxeles en dos clases (concreto y zonas húmedas), lo cual provocó que los píxeles que pertenecían a vegetación se clasificaran como zonas húmedas, logrando así valores bajos de precisión en la clasificación; sin embargo, el algoritmo Otsu de un umbral e ISODATA se pueden aplicar para clasificar las zonas húmedas siempre y cuando sobre la cortina no exista vegetación.

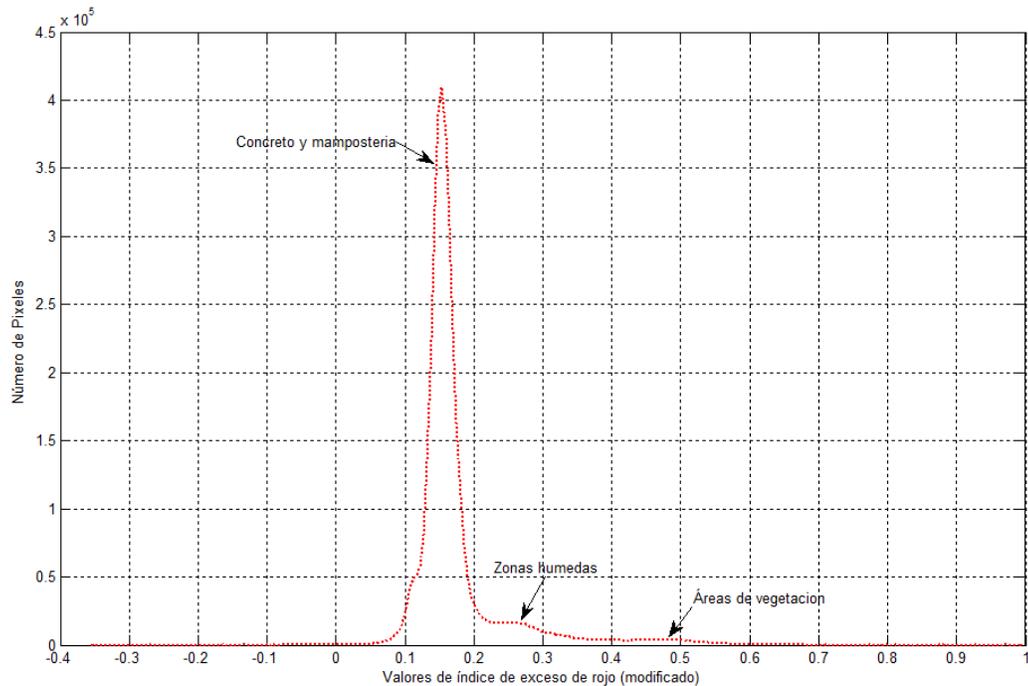


Figura 7.14. Histograma de intensidades de la imagen de la cortina.

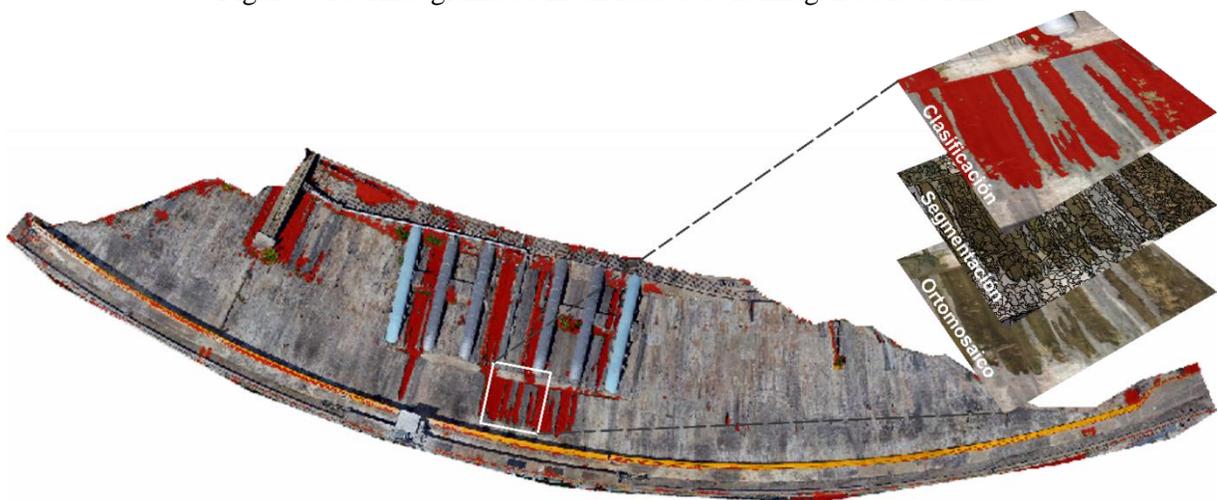


Figura 7.15. Clasificación de zonas húmedas (rojo) basado en objetos usando el algoritmo Otsu multiumbral.

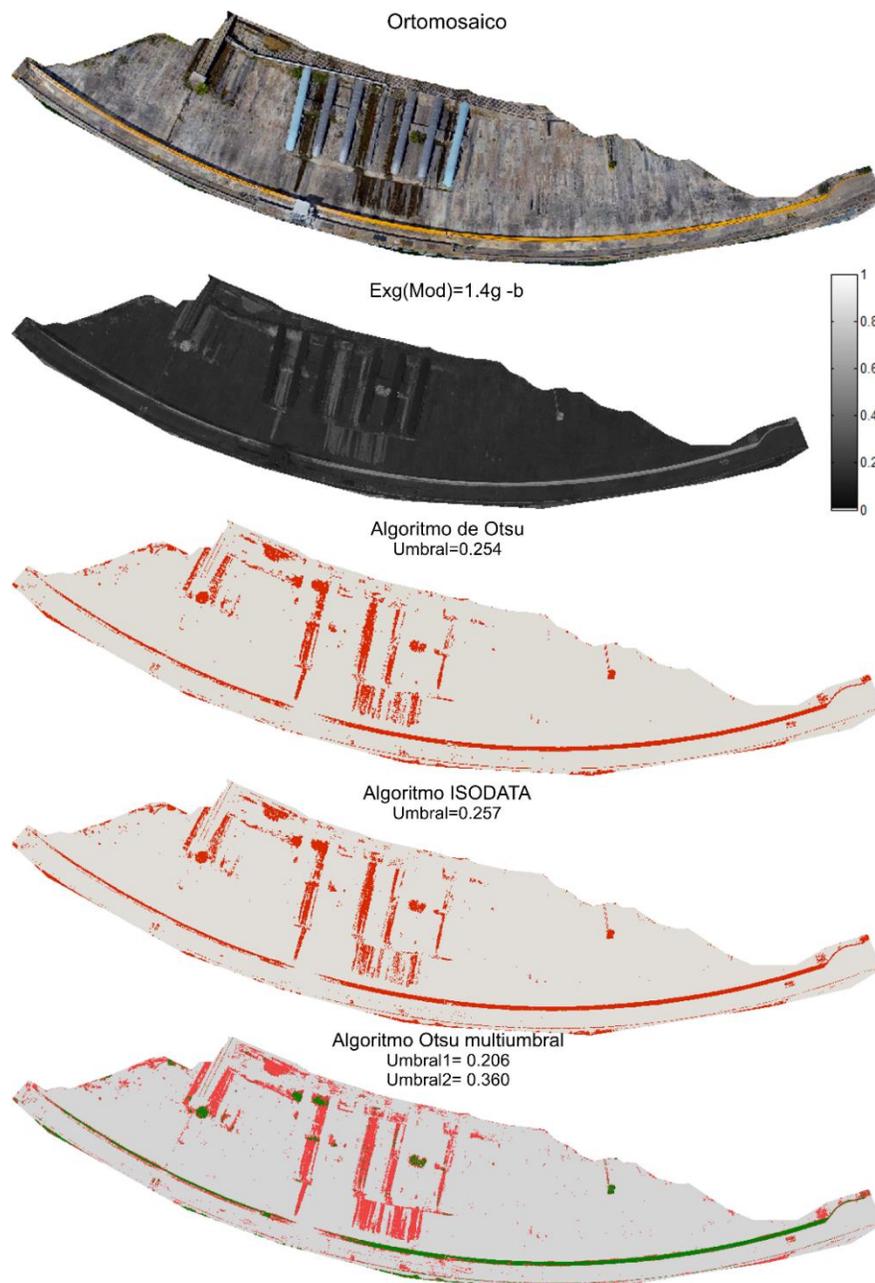


Figura 7.16. Clasificación de zonas húmedas (rojo) basado en pixel con Matlab

Cuadro 18. Matriz de error de las clasificaciones con distintos algoritmos de umbralización

Automático \ Manual	Otsu un umbral			ISODATA			Otsu multiumbral		
	Zonas Húmedas	Otros	Suma	Zonas Húmedas	Otros	Suma	Zonas Húmedas	Otros	Suma
Zonas Húmedas	1,277	687	1,964	1,202	654	1,856	2,777	759	3,536
Otros	1,656	36,614	38,270	1,731	36,647	38,378	156	36,542	36,698
Suma	2,933	37,301	40,234	2,933	37,301	40,234	2,933	37,301	40,234
Precisión del productor	0.44	0.98		0.41	0.98		0.95	0.98	

Precisión del usuario	0.65	0.96	0.65	0.95	0.79	1.00
Kappa por clase	0.41	0.62	0.38	0.62	0.94	0.77
Precisión Global	0.94		0.94		0.98	
Kappa	0.49		0.47		0.85	

Los valores umbrales definieron la calidad y precisión de la clasificación en base a la ecuación propuesta; también influyó el método de clasificación, ya sea a nivel pixel u objetos, se tuvieron mejores resultados en la clasificación basada en objetos, ya que previo a dicha clasificación se realizó una segmentación de la imagen basado en el color y en la forma.

c) Detección automática de grietas

El filtro gaussiano aplicado antes de la segmentación y clasificación, permitió que se suavizara la imagen y se eliminara el ruido; sin embargo, si se realiza un suavizado excesivo se pierden detalles de las grietas en la imagen (Figura 7.17) (Valverde, 2007), en este caso, se observó que con valores del factor de escala superior a 2, las grietas delgadas pierden su continuidad.



Figura 7.17. Filtro Gaussiano con distintos parámetros de escala

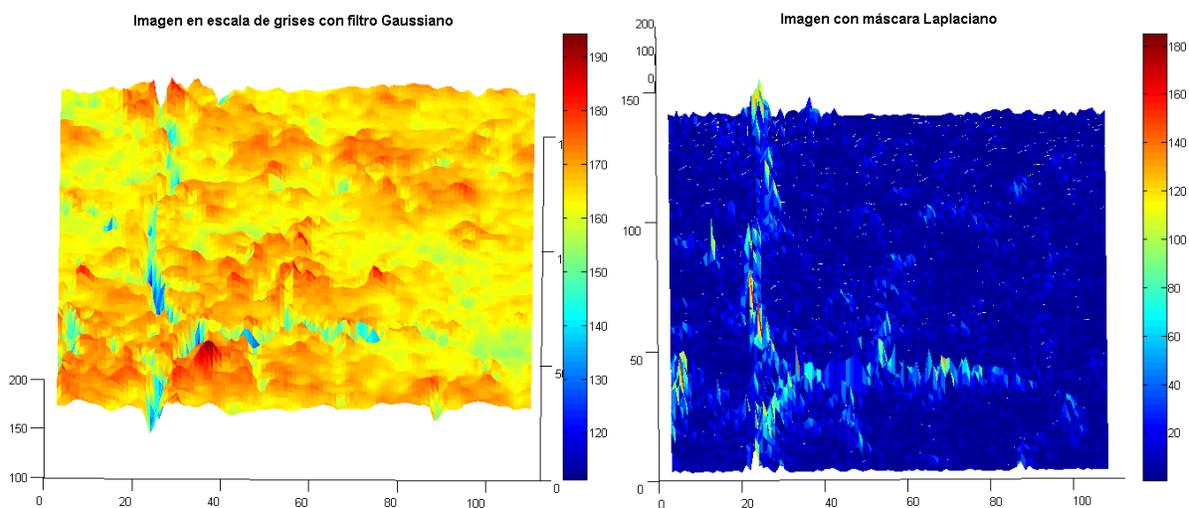


Figura 7.18. Valores de la imagen en escala de grises con máscara laplaciana en la detección de puntos

La máscara Laplaciana usada en la detección de puntos hizo que los píxeles de la imagen que formaban parte de las grietas tuvieran un valor superior al resto de los otros píxeles (Figura 7.18), se encontró que mediante la aplicación de esta máscara a la imagen en escala de grises y métodos de umbralización se pueden clasificar las grietas gruesas. Sin embargo, las grietas delgadas no logran clasificarse correctamente, ya que en algunas zonas se pierde la continuidad de estas (Figura 7.19).

La clasificación mejoró notablemente usando el algoritmo de umbral de histéresis en el cual se utilizan dos valores umbrales a comparación de usar un solo valor umbral (Figura 7.20), ya que esto permitió que se eliminaran las grietas falsas producidas por el ruido; además, al aplicar este algoritmo permitió que se consideraran los aspectos espaciales de los grietas lo cual no ocurriría al usar un solo valor umbral. Además, la obtención de los valores umbrales T1 y T2 (umbrales de histéresis) obtenidas con el algoritmo de umbralización de Otsu y la ecuación propuesta (Ecuación 33) permitieron que el proceso de clasificación de las grietas en base a detección de puntos fuera totalmente automático.

La etapa del procesamiento morfológico ayudo a tener un resultado más exacto de la clasificación de las grietas, además de que realzaron las geometrías de estas.

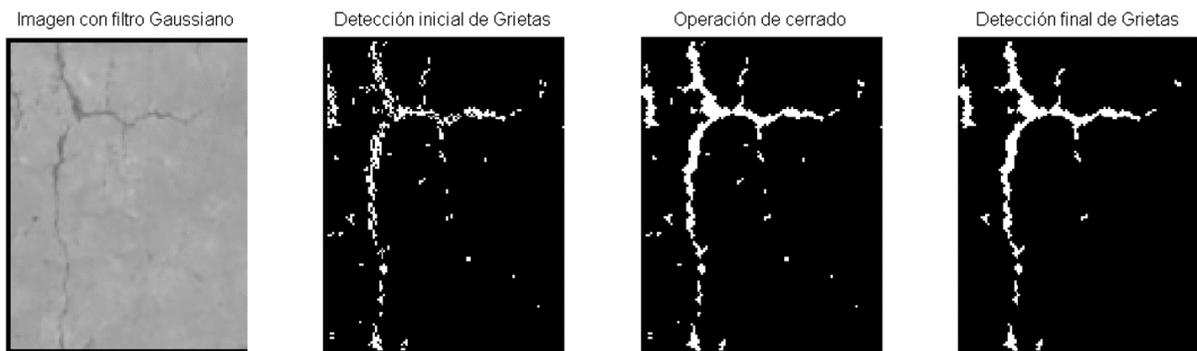


Figura 7.19. Grietas basadas en detección de puntos

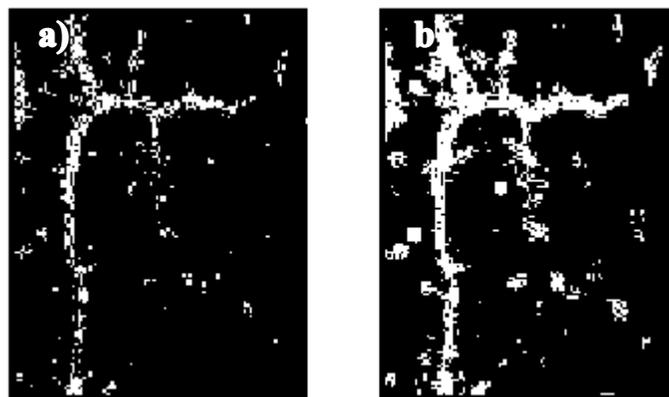


Figura 7.20. Clasificación de grietas con un solo umbral (Otsu): a) Puntos, b) líneas

Las cuatro máscara aplicadas a la imagen para la detección de líneas hicieron que los pixeles que formaban parte de las grietas tuvieran valores más altos en comparación del resto de pixeles, cada máscara hizo resaltar los pixeles de grietas que se encontraban en una cierta dirección (Figura 7.21); el efecto de las máscaras unidas en una sola imagen y métodos de umbralización permitieron clasificar las grietas de forma exitosa; se obtuvo una mejor clasificación que en el método de segmentación anterior, ya que se lograron clasificar tanto las grietas delgadas como las gruesas (Figura 7.22).

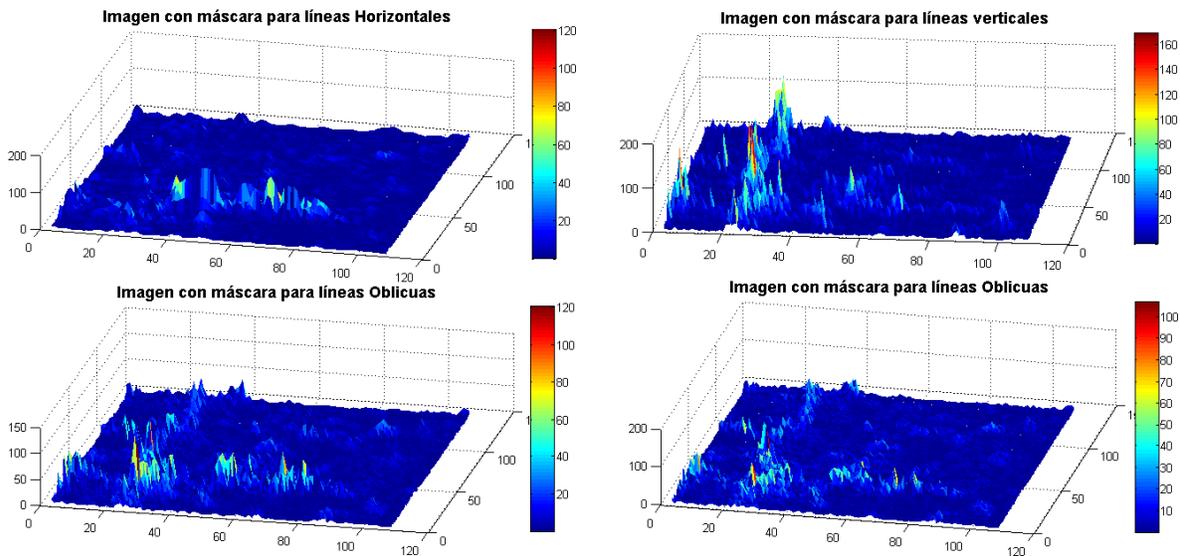


Figura 7.21. Modelo de imagen en escala de grises con máscara palaciana en la detección de líneas

El resultado de la clasificación mejoro con las operación morfológicas y con el uso de dos valores umbrales (umbrales de histéresis) a comparación de si se usara solamente uno (Figura 7.20), tal como sucedió en el método de segmentación anterior; además se logró que la clasificación de las grietas fuera totalmente automática gracias a que se obtuvo el valor de T1 con el algoritmo de umbralización de Otsu y T2 con las Ecuación 33.



Figura 7.22. Grietas basadas en detección de líneas

El método de Canny usado para la detección de bordes, desde el primer paso que es el cálculo del gradiente de cada pixel permitió que resalten los pixeles que pertenecen a grietas, los cuales

tuvieron un valor superior al resto de píxeles (Figura 7.23); este algoritmo fue el más complejo de aplicar, sin embargo fue el que mejor resultados arrojó en la clasificación, se lograron clasificar tanto las grietas gruesas como las delgadas, además, la calidad de la clasificación aumento al contemplar los pasos de cierre de contornos abiertos y las operación morfológicas de cerrado y borrado.

Se logró además que la clasificación de las grietas fuera totalmente autónomo gracias a que se obtuvo el valor de T1 con el algoritmo de umbralización de Otsu y T2 con las Ecuación 33; lo anterior ayudo a que la selección de los valores umbrales fuera únicamente en base al histograma de intensidad del gradiente y así evitar estar probando valores umbrales óptimos.

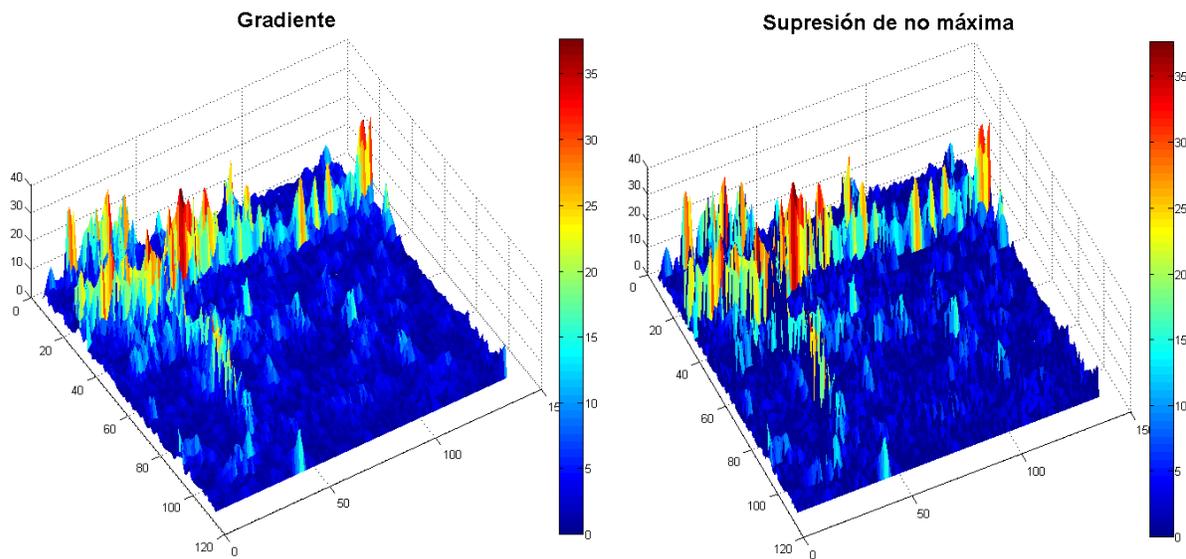


Figura 7.23. Modelo de imagen en escala de grises con mascara palaciana en la detección de puntos

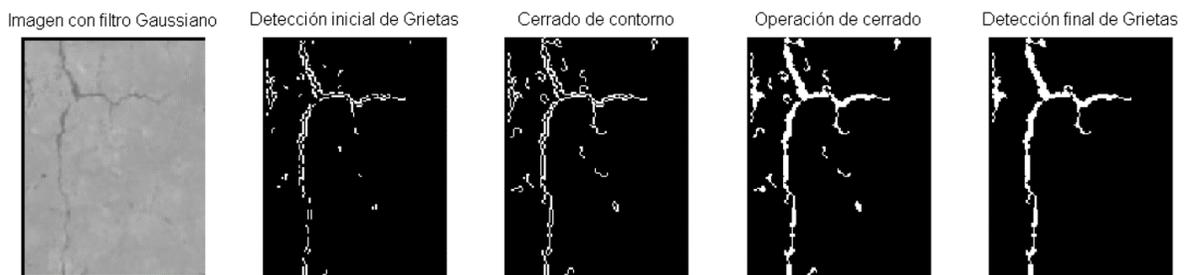


Figura 7.24. Grietas basadas en detección de bordes

Los tres métodos de segmentación permitieron detectar grietas sobre la imagen; el método de detección de bordes con el método de Canny brindó los mejores resultados pero es el más complejo de aplicar, el método de detección de líneas permitió clasificar grietas delgadas y gruesas. No obstante, se requiere aplicar una máscara por cada dirección de búsqueda de las grietas. El método más sencillo de aplicar fue mediante la detección de puntos, que solo pudo

detectar con precisión las grietas gruesas, ya que en algunas zonas se pierde la continuidad de grietas delgadas.

En la Figura 7.25 se muestran los tres métodos aplicados a una imagen (con filtro gaussiano) que presenta una grieta y una junta; en los tres métodos se observa que se clasifican las grietas y la junta, lo anterior debido a que la junta posee características similares a la grieta. Esto indica que estos algoritmos también permiten localizar las juntas que se encuentran en las presas o en canales de riego.

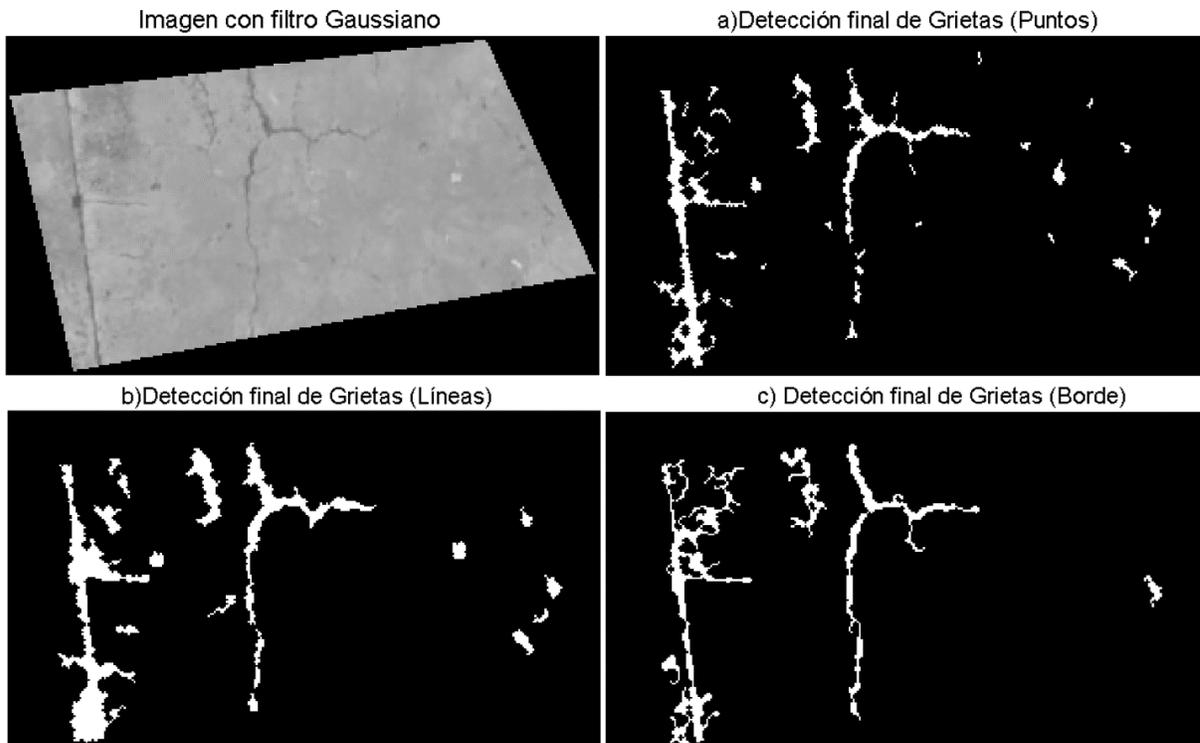


Figura 7.25. Clasificación de una grieta y una junta

7.4.2. Presa Valerio trujano

a) Procesamiento de la información

La resolución espacial del ortomosaico fue de 2.6 cm/píxel y el del modelo digital de elevaciones (MDE) de 10.3 cm/píxel; la nube de puntos densa resultó con 37.7 millones de puntos con coordenadas X, Y y Z. Como se mencionó anteriormente, la diferencia en las resoluciones espaciales del ortomosaico y del MDE se debió a las condiciones del procesamiento y a la altura de adquisición de las imágenes.



Figura 7.26. Ortomosaico de la presa Valerio Trujano

El RMSE del modelo digital de elevaciones evaluado en 7 puntos de verificación fue de 2.7 cm, 6.4 cm y 4.52 cm, en X, Y y Z respectivamente. El RMSE en el plano (X, Y, Z) fue de 8.3 cm. En esta ocasión el error en Z fue menor que en Y, ya que los puntos de verificación se colocaron sobre la cortina y sobre el vertedor, es decir, en lugares relativamente planos, además, el número de puntos de control es de 20 y como se vio anteriormente este número repercute más en la precisión en Z que en los otros dos ejes.

Los resultados anteriores indican que es posible hacer mediciones con precisión de centímetros tanto en el MDS como en el ortomosaico; en este sentido, se encontró una diferencia de 7 cm en el ancho de la corona, de 6 cm en la longitud de la cresta libre y 3 cm en el radio de la cresta vertedora (Figura 7.26), con respecto a mediciones reportadas por (CONAGUA, 2017b).

Con respecto a las elevaciones en el MDE, se pudieron obtener perfiles longitudinales y transversales de estructuras hidráulicas con gran precisión (Figura 7.28). Sin embargo, las elevaciones no fueron confiables en zonas profundas del vaso de la presa, ya que el brillo del

sol que se refleja y el movimiento propio del agua afectaron negativamente la generación de la nube de puntos densa en esta zona, tal como se observa en la Figura 7.27;

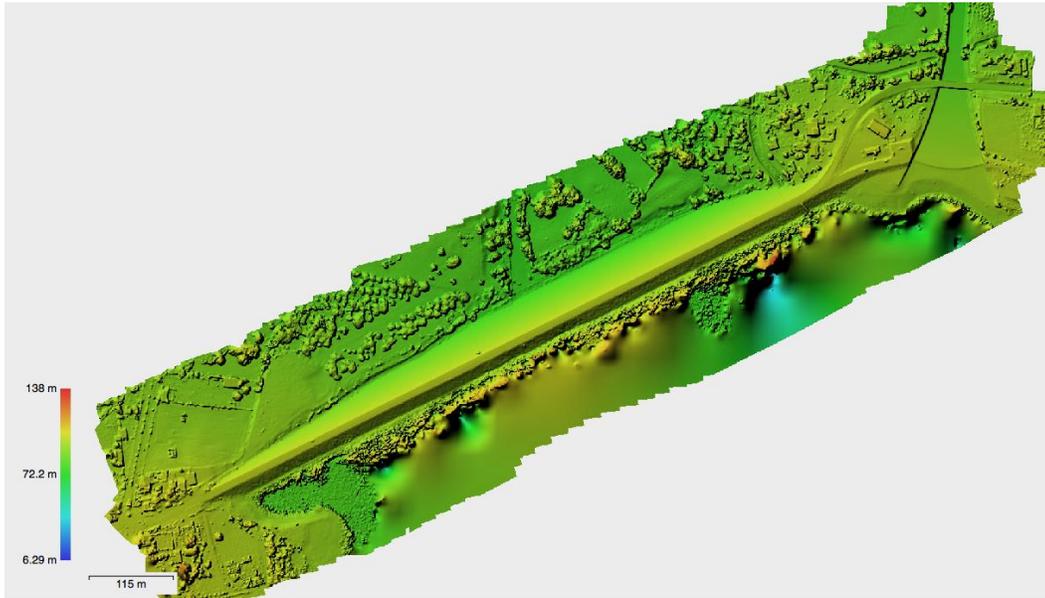


Figura 7.27. Modelo digital de superficie de la presa Valerio Trujano

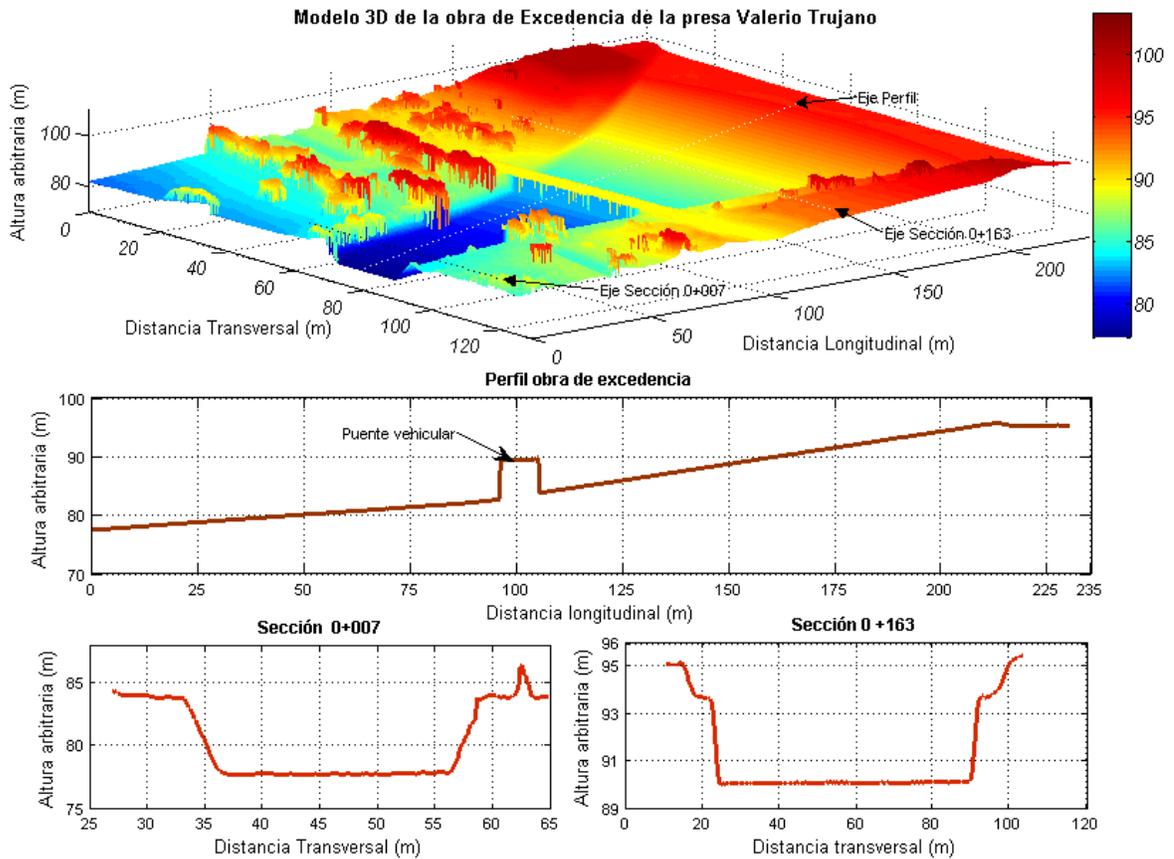


Figura 7.28. Modelo 3D de la obra de excedencia de la presa Valerio trujano

a) Medición automática del nivel del vaso de una presa

El valor umbral del índice de relación de pigmentos verdes (PPRb) que permitió clasificar los píxeles del vaso y los de la cortina fue de 0.074 (Figura 7.29), este valor obtenido con el algoritmo de umbralización de Otsu permitió que la clasificación se realizara de una manera automática. El índice PPRb, al tener un peso positivo de la banda verde hizo resaltar los píxeles de este color de la imagen RGB, por lo cual, los píxeles del vaso resultaron con valores altos (>0), mientras que los píxeles de la cortina resultaron con valores bajos (<0).

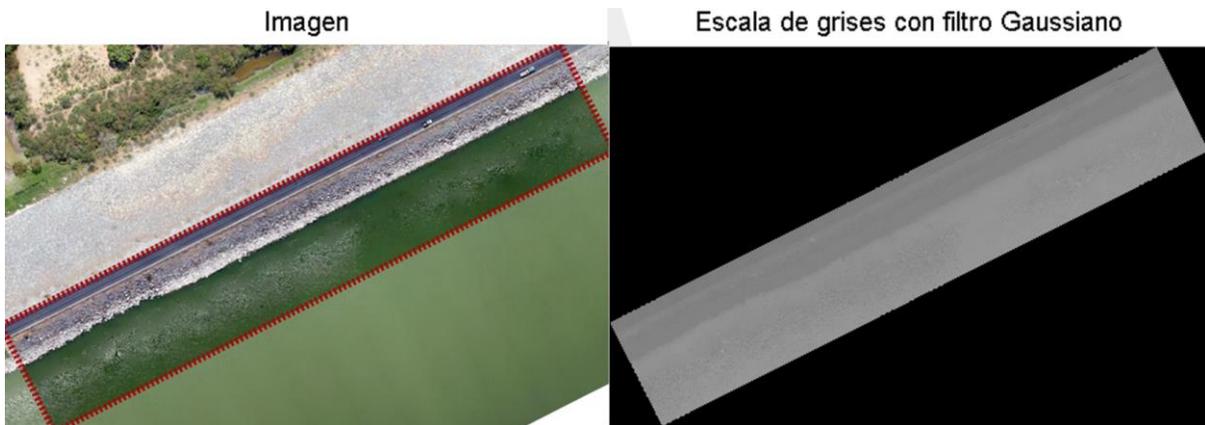


Figura 7.29. Imagen de la zona de estudio y en escala de grises con filtro Gaussiano

La etapa del procesamiento morfológico de relleno de huecos ayudó a tener un resultado más exacto de la clasificación del vaso, ya que inicialmente los píxeles que muestran el brillo del agua no se habían clasificado dentro de esta clase, y esta operación morfológica corrigió este detalle (Figura 7.30). Cabe aclarar que si no se hubiera realizado esta operación morfológica se habrían identificado bordes dentro del vaso con el método de Canny, lo cual podría afectar el cálculo de la elevación del vaso.

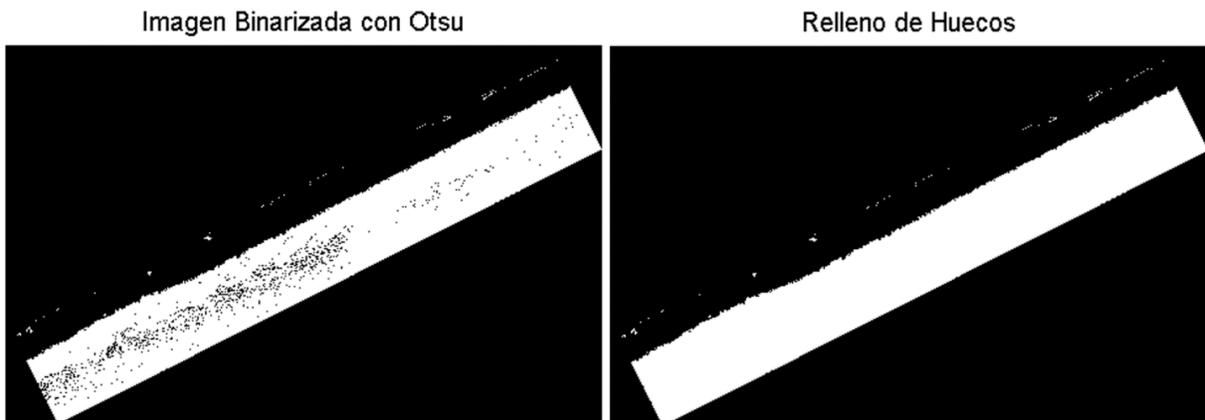


Figura 7.30. Clasificación del vaso de la presa (Blanco)

El algoritmo de detección de bordes de Canny permitió delimitar los límites entre el vaso y la cortina de manera satisfactoria. El borde entre la cortina y el vaso resultó en una línea continua, mientras que los otros bordes detectados en la imagen que se eliminaron se trataron de líneas discontinuas (Figura 7.31).

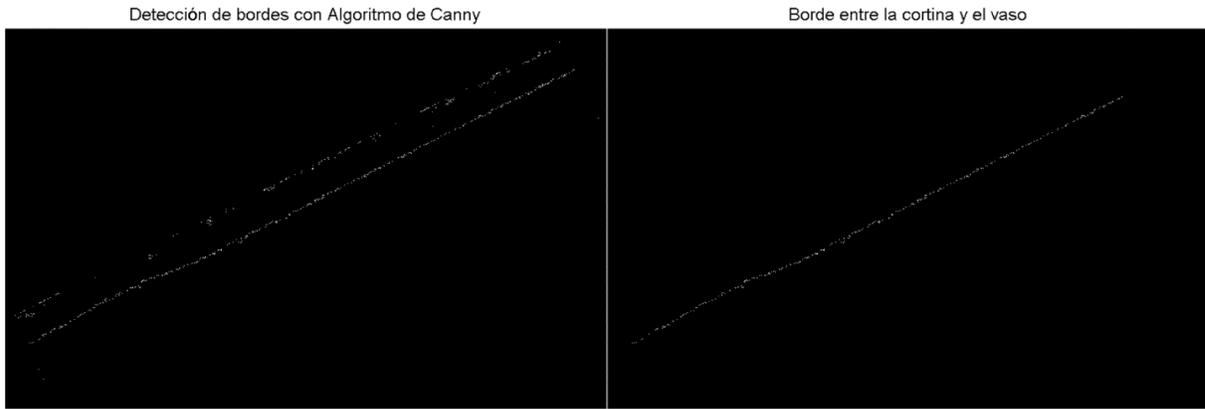


Figura 7.31. Detección del borde entre la cortina y el vaso de la presa

Las elevaciones que se obtuvieron del vaso de la presa variaron desde los 92.14 m y 92.62 m. El valor promedio fue de 92.365 m y la desviación estándar de 0.0864 m (Figura 7.32); lo que indica que la variación de los valores con respecto al promedio es pequeña. A partir de los 19 puntos de verificación se tiene una elevación media del vaso de 92.426 m, por tanto, la diferencia entre el valor medido y el calculado fue 6.1 cm. En este caso, el método empleado subestimó el valor de la elevación promedio (medido) del agua en el vaso. Los resultados anteriores muestran que con la metodología propuesta se puede obtener las elevaciones precisas del vaso de una presa de manera autónoma a partir de información obtenidas desde los vehículos aéreos no tripulados.

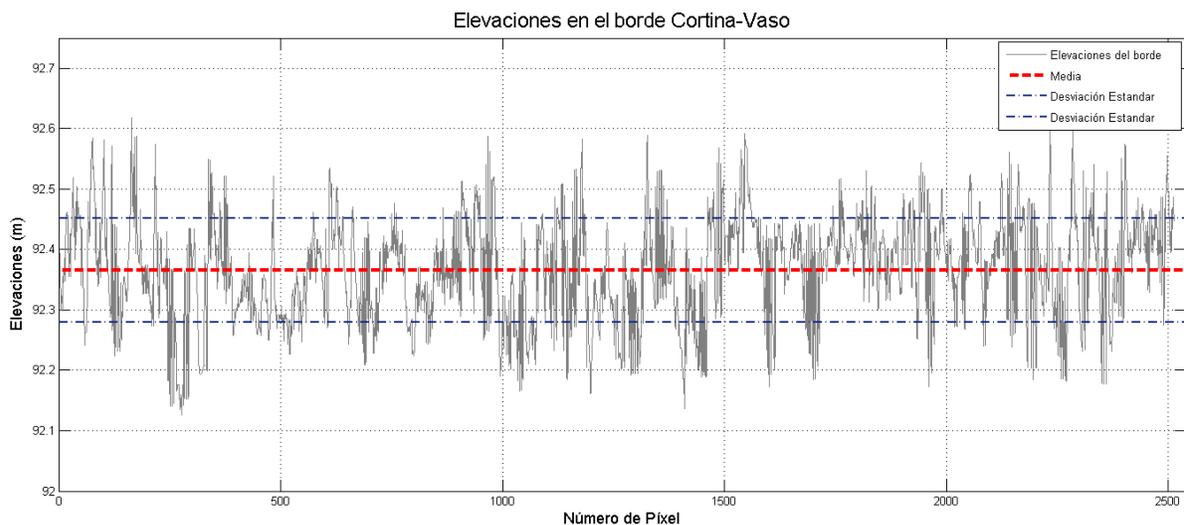


Figura 7.32. Elevaciones en el borde entre la cortina y el vaso de la presa Valerio Trujano.

7.5. CONCLUSIONES

Mediante información captada desde vehículos aéreos no tripulaciones se pueden realizar mediciones en estructuras hidráulicas a través de los modelos digitales de elevación (MDE) y ortomosaicos. Con esta información, se pueden obtener áreas, distancias y perfiles longitudinales y transversales con precisión centimétrica. Además, con una metodología propuesta mediante algoritmos de umbralización y detección de bordes, se pudieron extraer las elevaciones del vaso en los límites entre éste y la cortina de una presa; en las elevaciones obtenidas, se encontró un error medio de -6.1 cm con respecto a elevaciones obtenidas en campo.

Se observó del MDE, que en zonas más profundas del vaso de la presa, las elevaciones no fueron confiables ya que presentaban muchos errores debido principalmente al brillo del sol que se reflejó en el agua y a su movimiento, lo cual afectó negativamente el procesamiento fotogramétrico de las imágenes, por lo cual, para futuros trabajos, se recomienda adquirir las imágenes en horas en donde no haya tanto reflejo del sol en el agua.

En lo que se refiere a la detección de zonas húmedas, la ecuación propuesta permitió en la imagen resaltar con éxito dichas zonas sobre materiales de concreto y mampostería; se encontró que sí sobre la cortina existe vegetación se debe usar un algoritmo multiumbral para clasificar las zonas húmedas, en caso contrario es suficiente con un algoritmo de un solo valor umbral. Además, se encontró que se tienen mejores resultados cuando se utiliza un método de clasificación basado en objetos que uno basado en pixel, ya que previo a la clasificación se realiza una segmentación de la imagen basado en el color y en la forma. La detección de zonas húmedas comúnmente se ha realizado con cámaras térmicas; sin embargo, estas cámaras a comparación de las RGB, son de mayor costo, por lo cual, la metodología empleada en este trabajo usando imágenes RGB es una opción viable que permite reducir costos.

En la detección de las zonas húmedas, el valor umbral fue el factor más importante para detectar correctamente estas zonas en la imagen, por lo que se recomienda para trabajos futuros, probar otros algoritmos de umbralización como Otsu-Valley, doble pico, etc., para saber si la clasificación de estas zonas mejora o no.

En la clasificación de grietas, los tres métodos de segmentación empleados permitieron detectarlos sobre la imagen. El método de detección de bordes de Canny brindó los mejores resultados pero es el más complejo de aplicar. Por otro lado, el método de detección de líneas permitió clasificar grietas delgadas y gruesas; sin embargo, se requiere aplicar una máscara a la imagen por cada dirección de búsqueda de las grietas (horizontal, vertical y dos diagonales). Finalmente, el método de detección de puntos fue el más sencillo de aplicar ya que solamente se usa una máscara sobre la imagen; sin embargo, solo pudo detectar con precisión las grietas gruesas, ya que en algunas zonas se pierde la continuidad de grietas delgadas. Si se quisiera emplear esta metodología para detectar grietas en canales revestidos, se recomienda usar un

algoritmo para detectar segmentos rectos ya sea códigos de cadena o la Transformada de Hough. Estos segmentos rectos representarían las juntas del canal, y así se podría separar las grietas y las juntas.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- Agisoft. (2016, Noviembre 8). Agisoft PhotoScan User Manual: Professional Edition, Version 1.2. San Petersburgo, Rusia.
- Alcántara, D. (1999). *Apuntes de topografía* (segunda ed.). México: Universidad Autónoma Metropolitana.
- Alcántara, D. (2014). *Topografía y sus aplicaciones* (Primera ed.). México, México: Compañía editorial continental.
- Alfaro, A., & Sipirán, I. (2012). *Diseño de un Algoritmo de Segmentación de Imágenes aplicando el Funcional de Mumford-Shah para mejorar el desempeño de los Algoritmos Clásicos de Segmentación*. Universidad Nacional de Trujillo, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Trujillo, Perú: Escuela Académico-Profesional de Informática.
- Aracena, D., Campos, P., & Luis, C. (2005). Comparación de técnicas de calibración de cámaras digitales. *Revista Facultad de Ingeniería-Universidad de Tarapacá*, *13*(1), 57-67.
- Ardila, J., Espejo, O., & Herrera, J. (2005). Validación de una metodología de clasificación de imágenes satelitales en un entorno orientado a objetos. *Ingeniería*, *10*(1), 61-69.
- Ball, G. H., & Hall, D. J. (1965). ISODATA, a novel method of data analysis and pattern classification. *Analysis*, (AD699616), 1–79. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(92\)90114-X](https://doi.org/10.1016/0031-3203(92)90114-X)
- Barrientos, A., del Cerro, J., Gutiérrez, P., San Martín, R., Martínez, A., & Rossi, C. (2007). Vehículos aéreos no tripulados para uso civil. Tecnología y aplicaciones. *Universidad politécnica de Madrid*, 1-29.
- Bennett, V. (1990). GPS program status report. *Third Forest Service Remote Sensing Applications Conference* (pp. 334-338). Bethesda, Maryland USA: American Society for Photogrammetry and Remote Sensing.
- Blaschke, T., & Strobl, J. (2001). What's wrong with pixels? Some recent developments interfacing remote sensing and GIS. *Interfacing Remote Sensing and GIS*, *6*(1), 12-17.
- Bock, M., & Lessing, R. (2000). Remote Sensing, Formation of Objects and Determination of Quality. *EnviroInfo*, (pp. 581-594). Marburg, Alemania. Obtenido de <http://enviroinfo.eu/sites/default/files/pdfs/vol102/0581.pdf>
- Buill, F., Núñez, M., & Rodríguez, J. (2003). *Fotogrametría analítica* (Primera ed., Vol. 79). (E. UPC, Ed.) Universidad Politécnica de Catalunya.
- Cabazos, P., & Cisneros, J. (2012). Fotogrametría con cámaras digitales convencionales y software libre. *Expresión gráfica arquitectónica*, *17*(20), 88-99.
- Caballero-Novella, J. J., Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., & López-Granados, F. (2015). Optimización de algoritmos de segmentación por valor umbral aplicado a detección de

- malas hierbas en imágenes procedentes de vehículos aéreos no tripulados. In *XV Congreso de la Sociedad Española de Malherbología. Sevilla 2015* (pp. 217–222).
- Canaz, S., Karsli, F., Guneroglu, A., & Dihkan, M. (2015). Automatic boundary extraction of inland water bodies using LiDAR data. *Ocean & Coastal Management*, **118**(2015), 158–166.
- Canny, J. (1986). A computational approach to edge detection. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **8**(6), 679–698. <https://doi.org/10.1109/TPAMI.1986.4767851>
- Cánovas-García, F., Alonso-Sarría, F., & Gomariz-Castillo, F. (2013). Segmentación de imágenes de muy alta resolución espacial: optimización local del parámetro de escala del algoritmo de segmentación multiresolución. *XV Congreso de la Asociación Española de Teledetección INTA* (pp. 1-4). Torrejón de Ardoz, Madrid, España: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de teledetección espacial* (Segunda ed.). Madrid, España: Ediciones Rialp.
- CONAGUA. (2014). *Operación y Conservación de Presas y Estructuras de Cabeza*. Ciudad de México: Comisión Nacional del Agua. Obtenido de http://www.coneval.org.mx/Informes/Evaluacion/Diagnostico/Diagnostico_2014/Diagnostico_2014_SEMARNAT_K111.pdf
- CONAGUA. (2017a, 07 23). *Sistema de Seguridad de Presas*. Obtenido de Cortina de Presa La Boquilla: <http://201.116.60.136/inventario/hcortinas.aspx?750>
- CONAGUA. (2017b, 08 15). *Sistema de seguridad de presas*. Obtenido de Cortina Valerio Trujano: <http://201.116.60.136/inventario/hcortinas.aspx?1505>
- Cohen, J. (1960). A Coefficient of Agreement for Nominal Scales. *Educational and Psychological Measurement*, **20**(1), 37–46. <https://doi.org/10.1177/001316446002000104>
- Cuartero, A., Felicísimo, A., & Ariza, F. (2001). Análisis del error en modelos digitales de elevaciones según la fuente de datos. *XIII Congreso Internacional de Expresión Gráfica* (pp. 1-9). Badajoz, España: Asociación de Profesores de Expresión Gráfica en la Ingeniería.
- D'Oleire-Oltmanns, S., Marzloff, I., Peter, K. D., & Ries, J. B. (2012). Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco. *Remote Sensing*, **4**(11), 3390–3416. <https://doi.org/10.3390/rs4113390>
- DGAC. (2015). *Circular obligatoria que establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)*. México: Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- Di Leo, N. (2015). Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma. *Agromensajes*, **41**(1), 7-17.
- Domínguez, B., Martínez, L. E., & Sandoval, J. (2013). *Estudio comparativo entre cuatrirotores y aeronaves de ala fija. Sistemas de control de vuelo, tecnología y misiones*. Instituto politécnico superior. México, DF: Escuela superior de ingeniería mecánica y eléctrica.

- Eisenbeiss, H., Lambers, K., Sauerbier, M., & Li, Z. (2005). Photogrammetric documentation of an archaeological site (Palpa, Peru) using an autonomous model helicopter. *CIPA 2005 XX International Symposium*, (pp. 1-6). Torino, Italy. Obtenido de https://www.uni-bamberg.de/fileadmin/ivga/Lambers/eisenbeiss_et_al_2005.pdf
- Escalante, J., Cáceres, J., & Porrás, H. (2016). Ortomosaicos y modelos digitales de elevación generados a partir de imágenes tomadas con sistemas UAV. *Revista Tecnura*, **20**(50), 119-140. doi:10.14483/udistrital.jour.tecnura.2016.4.a09
- ESRI. (2017, 05 22). *ArcGis*. Obtenido de Referencia de la herramienta: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/tool-reference/analysis/erase.htm>
- Fallas, J. (2002). *Sistema de Posicionamiento Global*. Costa Rica: Universidad Nacional Heredia.
- Fallas, J. (2007). *Modelos digitales de elevación: Teoría, métodos de interpolación y aplicaciones*. Costa Rica: Escuela de Ciencias Ambientales. Universidad Nacional.
- Felicísimo, A. (1994). *Modelos Digitales del Terreno*. Oviedo: Pentalfa.
- Flener, C., Vaaja, M., Jaakkola, A., Krooks, A., Kaartinen, H., Kukko, A., . . . Alho, P. (2013). Seamless Mapping of River Channels at High Resolution Using Mobile LiDAR and UAV-Photography. *Remote Sensing*, **5**(1), 6382-6407. doi:10.3390/rs5126382
- Fook Hai, H. (2008). *3D Terrestrial Laser Scanning For Application In Earthwork And Topographical Surveys*. Research Project, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying.
- Fuentes, J., Bolaños, J., & Rozo, D. (2012). Modelo Digital de Superficie a partir de imágenes de satélite IKONOS para el análisis de áreas de inundación en santa marta, Colombia. *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, **41**(2), 251-266.
- Garriga, A., & Morón, S. (2015). *Producción cartográfica con UAVs*. Aeroproducciones.
- Geipel, J., Link, J., & Claupein, W. (2014). Combined spectral and spatial modeling of corn yield based on aerial images and crop surface models acquired with an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*, **6**(11), 10335–10355. <https://doi.org/10.3390/rs61110335>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., & Rundquist, D. (2002). Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing of Environment*, **80**(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gómez, M. (2004). *Método y técnicas de la cartografía temática*. Ciudad de México, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Gómez-Candón, D., De Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat. *Precision Agriculture*, **15**(1), 44–56. <https://doi.org/10.1007/s11119-013-9335-4>
- González, D., Quintano, P., & Edemir, Y. (2009). Análisis de imágenes basado en objetos aplicado a imágenes fracción derivadas del sensor MODIS para cartografiar áreas quemadas en la cuenca Mediterránea. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, (págs. 2737-2743). Natal, Brasil.

- Gora, J. (2015). Determinación del Relieve 3D de la Superficie de Marte usando un UAV. *Revista ECIPerú*, *1*(12), 32-38.
- Haala, N., Cramer, M., & Rotherme, M. (2013). Quality of 3d point clouds from highly overlapping UAV imagery. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, *40*(1), 183-188.
- Hernández, A., Madera, E., Robles, C., & Saavedra, R. (2008). Generación de Modelos de realidad virtual a partir de procesos fotogramétricos. *UD y la Geomática*, *1*(2), 33-43.
- Hernández, D. (2006). *Introducción a la fotogrametría digital*. Madrid, España: Universidad de Castilla La Mancha.
- Herrera, B. (1987). *Elementos de fotogrametría*. Limusa.
- Höfle, B., Vetter, M., Pfeifer, N., Mandlbürger, G., & Stötter, J. (2009). Water surface mapping from airborne laser scanning using signal intensity and elevation data. *Earth Surface Processes And Landforms*, *34*(2009), 1635-1649. doi:10.1002/esp.1853
- Hugenholtz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B., LeClair, A., . . . Hamilton, T. (2013). Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model. *Geomorphology*, *194*, 16-24. doi:10.1016/j.geomorph.2013.03.023
- INAFED. (05 de Noviembre de 2016). *Instituto nacional para el federalismo y el desarrollo municipal*. Obtenido de Municipios: <http://www.inafed.gob.mx/work/enciclopedia/EMM21puebla/municipios/21183a.html>
- INEGI. (27 de 02 de 2017). *INEGI*. Obtenido de Modelos Digitales de Elevación (MDE) - Descripción: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- Jiménez, S., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros, R., & Marcial, M. (2017). Levantamientos topográficos de alta resolución mediante drones. *184 congreso nacional de irrigación* (pp. 1-11). Texcoco, México: Asociación Nacional de Especialistas en Irrigación.
- Joly, F. (1979). *La Cartografía*. Barcelona: Ariel.
- Kataoka, T., Kaneko, T., Okamoto, H., & Hata, S. (2003). Crop growth estimation system using machine vision. *Proceedings 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2003)*, *2*(Aim), 1079–1083. <https://doi.org/10.1109/AIM.2003.1225492>
- Khoshelham, K., & Zhilin, L. I. (2004). A model-based approach to semi-automated reconstruction of buildings from aerial images. *Photogrammetric Record*, *19*(108), 342–359. <https://doi.org/10.1111/j.0031-868X.2004.00290.x>
- Kornus, W., & Ruiz, A. (2003). Strip adjustment of LIDAR data. *Institut Cartogràfic de Catalunya*, 1-4.
- Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The Measurement of Observer Agreement for Categorical Data. *Biometrics*, *33*(1), 159. <https://doi.org/10.2307/2529310>
- Lehmann, G. (1975). *Fotogrametría*. Barcelona, España: Editores Técnicos asociados.
- Lerma, E. (2013). *Extracción semiautomática de polígonos catastrales mediante otografías aéreas*. Facultad de ingeniería. Bogotá: Universidad del Valle.

- Lerma, J., & Biosca, J. (2008). *Teoría y práctica del Escaneado Láser Terrestre: Material de aprendizaje basado en aplicaciones prácticas*. Proyecto Leonardo da Vinci 3DRiskMapping.
- Latham, L. (2001). *GPS fácil. Uso del sistema de posicionamiento global* (Vol. 67). Paidotribo.
- Liu, J., & Yang, Y. (1994). Multiresolution Color Image Segmentation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, **16**(7), 689–700. <https://doi.org/10.1109/CBMS.2000.856900>
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, **28**(5), 823-870. doi:10.1080/01431160600746456
- Mañana-Borrazás, P., Rodríguez, A., & Blanco-Rotea, R. (2008). Una experiencia en la aplicación del Láser Escáner 3D a los procesos de documentación y análisis del Patrimonio Construido: su aplicación a Santa Eulalia de Bóveda (Lugo) y San Fiz de Solovio (Santiago de Compostela). *Arqueología de la arquitectura*, **5**(1), 15-32.
- Marambio, A., & García, P. (2006). Escáner laser: modelo 3d y orto imágenes arquitectónicas de la iglesia de Santa María del mar en Barcelona. *Arquitectura, ciudad y entorno*, **1**(2), 178-187.
- Martín, M. (2004). *Técnicas Clásicas de Segmentación de Imagen*. Massachusetts. Obtenido de <http://lmi.bwh.harvard.edu/papers/pdfs/2003/martin-fernandezCOURSE03b.pdf>
- Martínez, P., Ojeda, D., Pérez, E., & Bravo, F. (2015). Vehículos aéreos no tripulados (vant) en cuba, aplicados a la Geomática. Estado actual, perspectivas y desarrollo. *XV Encuentro de Geógrafos de América Latina Cuba 2015*, (pp. 1-9). Habana, Cuba.
- MCCormac, J. (2008). *Topografía*. México: Limusa Wiley.
- Mejía, P. (2016). *Mediciones sobre ortofotos con base en videogrametría UAV*. Tesis de licenciatura, Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Facultad de medio ambiente y recursos naturales, Bogotá.
- Metternicht, G. (2003). Vegetation indices derived from high-resolution airborne videography for precision crop management. *International Journal of Remote Sensing*, **24**(14), 2855–2877. <https://doi.org/10.1080/01431160210163074>
- Meyer, G., Hindman, T., & Lakshmi, K. (1998). Machine vision detection parameters for plant species identification. *Precision Agriculture and Biological Quality; Proceedings of the SPIE*, **3543**(November), 327–335. <https://doi.org/10.1117/12.336896>
- Mihaylov, A., Chibunichev, A., & Kurkov, V. (2005). Utilización de las cámaras digitales no-métricas y los barredores láser para resolver problemas en fotogrametría. *Universidad Estatal de Geodesia y Cartografía de Moscú. Rusia. Universidad Nacional de San Juan Argentina*, 1-8.
- Monga, O., Deriche, R., Malandain, G., & Cocquerez, J. P. (1991). Recursive filtering and edge tracking: two primary tools for 3D edge detection. *Image and Vision Computing*, **9**(4), 203–214. [https://doi.org/10.1016/0262-8856\(91\)90025-K](https://doi.org/10.1016/0262-8856(91)90025-K)
- Montes, M. (1996). *Topografía*. México: Alfaomega.
- Morillo, J., Pozo, J., Pérez, F., Rodríguez, M., & Rebollo, F. (2002). Análisis de calidad de un modelo digital de elevaciones generado con distintas técnicas de interpolación. *XIV*

- Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica* (pp. 1-12). Santander, España: Asociación de Profesores de Expresión Gráfica en la Ingeniería.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). UAV for 3D mapping applications: A review. *Applied Geomatics*. <https://doi.org/10.1007/s12518-013-0120-x>
- Ojeda, W., Flores, J., & Unland, H. (2014). *Drones y sistemas de información geográfica en la ingeniería hidroagrícola*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Riego y Drenaje. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda, W., Ontiveros, R., Flores, J., Robles, B., & Jimenez, S. (2016). Aplicaciones a la Ingeniería. In W. Ojeda, J. Flores, & R. Ontiveros, *Drones aplicados a la ingeniería y agricultura de precisión* (pp. 223-229). Jiutepec: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Ojeda-Bustamante, W., González-Sánchez, A., Mauricio-Pérez, A., & Flores-Velázquez, J. (2017). Aplicaciones de los vehículos aéreos no tripulados en la ingeniería hidroagrícola. *Tecnología Y Ciencias Del Agua*, 8(4), 157–166. Obtenido de <https://imta.gob.mx/tyca/descargas/art-2017-04-10.pdf>
- Ok, A. Ö. (2009). Automated Description of 2-D Building Boundaries From a Single Color Aerial Ortho-Image. In *ISPRS Archives* (Vol. XXXVIII, p. 1–4–7/W5). Obtenido de http://www.isprs.org/proceedings/XXXVIII/1_4_7-W5/paper/Ok-150.pdf
- Ortiz, P. (2013). Digitalización automática del patrimonio arqueológico a partir de fotogrametría. *Virtual Archaeology Review*, 4(8), Virtual Archaeology Review.
- Otsu, N. (1979). A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66. <https://doi.org/10.1109/TSMC.1979.4310076>
- Pachas, R. (2009). El levantamiento topográfico: uso del GPS y estación total. *Academia*, 8(16), 29-45.
- Peinado, Z., Fernández, A., & Agustín, L. (2014, Mayo). Combinación de fotogrametría terrestre y aérea de bajo coste: el levantamiento tridimensional de la iglesia de San Miguel de Ágreda (Soria). *Virtual Archaeology Review*, 5(10), 51-58.
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., de Castro, A. I., Kelly, M., & López-Granados, F. (2013). Weed Mapping in Early-Season Maize Fields Using Object-Based Analysis of Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Images. *PLoS ONE*, 8(10). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077151>
- Peña, J. M., Torres-Sánchez, J., Serrano-Pérez, A., & López-Granados, F. (2014). Detección de malas hierbas en girasol en fase temprana mediante imágenes tomadas con un vehículo aéreo no tripulado (UAV). *Revista de Teledetección* (42), 39-47.
- Perea, A., Meroño, J., & Aguilera, M. (2009). Clasificación orientada a objetos en fotografías aéreas digitales para la discriminación de usos del suelo. *Interciencia*, 34(9), 612-616.
- Pereira, F., & Pereira, C. (2015). Embedded Image Processing Systems for Automatic Recognition of Cracks using UAVs. *IFAC (International Federation of Automatic Control)*, 48(10), 16-21. doi:10.1016/j.ifacol.2015.08.101
- Pérez, C. (2006). Aplicaciones de la fotogrametría convergente en la restauración y rehabilitación de edificios. *Grupo Energía, Edificación y Patrimonio*, 1-8.

- Pérez, C., & Muñoz, Á. (2006). *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Salamanca, España: Universidad de Salamanca.
- Phinn, S., Roelfsema, C., & Mumby, P. (2012). Multi-scale, object-based image analysis for mapping geomorphic and ecological zones on coral reefs. *International Journal of Remote Sensing*, 33(12), 3768-3797. doi:10.1080/01431161.2011.633122
- Pix4D. (2017, 03 03). *pix4d*. Obtenido de Soporte: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560579-How-to-automatically-generate-a-Digital-Terrain-Model-DTM-#gsc.tab=0>
- Ponti, M. P. (2013). Segmentation of low-cost remote sensing images combining vegetation indices and mean shift. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(1), 67–70. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2193113>
- Pozo-Ruz, A., Ribeiro, A., García-Alegre, M., García, L., Guinea, D., & Sandoval, F. (2000). Sistema de posicionamiento global (GPS): descripción, análisis de errores, aplicaciones y futuro. *ETS Ingenieros de Telecomunicaciones. Universidad de Málaga*, 1-9.
- Pozuelo, F., Andrés, M., & Jordana, J. (2013). *Fotogrametría analítica* (Vol. 79). Universidad Politécnica de Catalunya.
- Quirós, E. (2014). *Introducción a la Fotogrametría y cartografía aplicada a la Ingeniería Civil*. Cáceres: Universidad de Extremadura.
- Ramírez, N., Huerta, R., Yepéz, F., & Lozano, D. (2015). Experimento práctico para evaluar la eficiencia en la producción de nubes de puntos de tres programas fotogramétricos. *SELPER-XXI-México-UACJ-2015*, (pp. 1-8). Ciudad Juárez.
- Recio, J. (2009). *Técnicas de extracción de características y clasificación de imágenes orientada a objetos aplicadas a la actualización de bases de datos de ocupación del suelo*. Tesis doctoral, Universidad politécnica de valencia, Departamento de ingeniería, cartográfica, geodesia y fotogrametría, Valencia.
- Ruiz, A., & Kornus, W. (2003). Experiencias y aplicaciones del LIDAR. *Institut Cartogràfic de Catalunya*, 1-7.
- Sánchez, N., Arias, B., González, D., & Gómez, J. (2004). Análisis aplicado de métodos de calibración de cámaras para usos fotogramétricos. *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía* (pp. 1-15). Madrid, España: TOPCART.
- Santos, D. (2014). *Fotogrametría usando plataforma aérea UAV (Unmanned Aerial Vehicle)*. Universidad Politécnica de Catalunya.
- Serna, N., & Román, U. (2009). Técnicas de Segmentación en Procesamiento Digital de Imágenes. *Revista de Ingeniería de Sistemas e Informática*, 6(2), 9-16.
- Sobrino, j., Raissouni, N., Kerr, Y., Oliosio, A., López-García, M., Belaid, A., . . . Dempere, L. (2000). *Teledetección*. (J. Sobrino, Ed.) Valencia, España: Universidad de València.
- Soubra, O.-P., & Lorenzo, A. (2004). Aplicaciones de láser escáner 3D Trimble-MENSI en estudios de accidentes y de criminología (forensics). *VIII Congreso Nacional de Topografía y Cartografía* (pp. 1-7). Madrid, España: Colegio Oficial de Ingeniería Geomática y Topográfica.
- SPH Ingeniería. (2016, Noviembre 24). UgCS User Manual, v2.9. Riga, Letonia.

- Tamminga, A., Hugenholtz, C., Eaton, B., & Lapointe, M. (2014). Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an unmanned aerial vehicle (UAV): A first assessment in the context of river research and management. *River Research And Applications*, 1-29.
- Torres, Á., & Villate, E. (2001). *Topografía* (Cuarta ed.). Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería.
- Torres-Sánchez, J., Peña, J. M., de Castro, A. I., & López-Granados, F. (2014). Multi-temporal mapping of the vegetation fraction in early-season wheat fields using images from UAV. *Computers and Electronics in Agriculture*, 103, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2014.02.009>
- Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Serrano, N., Arquero, O., & Peña, J. (2015). High-Throughput 3-D Monitoring of Agricultural-Tree Plantations with Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Technology. *PLoS ONE*, 10(6), 1-20. doi:10.1371/journal.pone.0130479
- Trimble. (2017, 10 16). eCognition Developer. Munich, Alemania.
- UgCS. (2017, 21 02). Obtenido de Producto: <https://www.ugcs.com>
- Urrejola, H. (2015). *Introducción a la información territorial y el uso del GPS*. Temuco, Chile: Corporación Nacional Forestal.
- Uysal, M., Toprak, A., & Polat, N. (2015). DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill. *Measurement*, 73(1), 539-543.
- Valverde, J. (2007). *Detección de bordes mediante el algoritmo de Canny*. Escuela Académico Profesional de Informática, 1-9. Trujillo, Perú: Universidad Nacional de Trujillo.
- Weitkamp, C. (2005). *Lidar, Range-Resolved optical remote sensing of the atmosphere*. (C. Weitkamp, Ed.) Singapore: Springer.
- Westaway, R., Lane, S., & Hicks, M. (2001). Remote Sensing of Clear-Water, Shallow, Gravel-Bed Rivers Using Digital Photogrammetry. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 67(11), 1271-1281.
- Wobbecke, D. M., Meyer, G. E., Von Bargen, K., & Mortensen, D. A. (1995). Color Indices for Weed Identification Under Various Soil, Residue, and Lighting Conditions. *Transactions of the ASAE*, 38(1), 259–269. <https://doi.org/10.13031/2013.27838>
- Wolf, P., & Brinker, R. (1997). *Topografía* (novena ed.). México: Alfaomega.
- Yébenes, Á., & Giner, Á. (2010). *Clasificación digital de imágenes por satélite*. Valencia: Universidad de Valencia.
- Zapata, O. (2003). *Fundamentos de Fotogrametría para imágenes de contacto y digitales*. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Zhang, L., Pateraki, M., & Baltsavias, E. (2002). Matching of Ikonos Stereo and Multitemporal GEO Images for DSM Generation. *Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Hoenggerberg, CH-8093, Zurich, Switzerland*, 1-7. Obtenido de <https://doi.org/10.3929/ethz-a-004659022>

IX. ANEXOS

9.1. PRECISIÓN TLAOLA

En los siguientes cuadros se presentan los cuatro parámetros de error (ME, RMSE, SDE y Error Máximo) para el poblado de Tlaola por puntos de control (PC).

Cuadro A1. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.043	0.0019	0.0005	0.0431	0.077	0.0059	0.0008	0.0767	0.270	0.0729	6.1741	0.2701	0.2840	0.0807	6.1314	0.2840
PV-2	0.162	0.0264	0.0096	0.1625	0.096	0.0093	0.0010	0.0964	1.649	2.7193	1.2228	1.6490	1.6598	2.7550	1.2109	1.6598
PV-3	0.116	0.0136	0.0027	0.1164	0.071	0.0051	0.0000	0.0714	1.661	2.7590	1.1964	1.6610	1.6666	2.7777	1.1959	1.6666
PV-4	0.130	0.0170	0.0043	0.1304	0.130	0.0169	0.0043	0.1302	3.059	9.3578	0.0925	3.0591	3.0646	9.3918	0.0927	3.0646
PV-5	0.107	0.0114	0.0018	0.1069	0.178	0.0315	0.0128	0.1775	4.007	16.0560	1.5679	4.0070	4.0123	16.0989	1.5678	4.0123
PV-6	0.091	0.0084	0.0007	0.0914	0.144	0.0208	0.0063	0.1441	3.947	15.5791	1.4213	3.9470	3.9507	15.6082	1.4173	3.9507
PV-8	0.066	0.0044	0.0000	0.0660	0.126	0.0159	0.0038	0.1259	3.389	11.4854	0.4022	3.3890	3.3920	11.5056	0.3991	3.3920
PV-10	-0.096	0.0092	0.0257	0.0959	-0.026	0.0007	0.0083	0.0265	0.680	0.4623	4.3052	0.6800	0.6872	0.4722	4.2974	0.6872
PV-9	-0.010	0.0001	0.0055	0.0099	0.079	0.0063	0.0002	0.0794	2.898	8.3985	0.0205	2.8980	2.8991	8.4049	0.0193	2.8991
PV-7	0.012	0.0002	0.0027	0.0124	0.143	0.0204	0.0061	0.1429	3.735	13.9503	0.9607	3.7350	3.7378	13.9709	0.9556	3.7378
PV-12	0.052	0.0027	0.0002	0.0516	0.113	0.0128	0.0023	0.1130	3.893	15.1551	1.2953	3.8930	3.8949	15.1706	1.2876	3.8949
PV-11	0.099	0.0099	0.0012	0.0994	0.129	0.0166	0.0041	0.1288	3.870	14.9764	1.2435	3.8699	3.8734	15.0029	1.2391	3.8734
Total (m)	0.065	0.094	0.071	0.162	0.105	0.116	0.068	0.178	2.755	3.041	1.345	4.007	2.7602	3.0447	1.3421	4.012

Cuadro A2. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 (b) PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	-0.030	0.0009	0.0017	0.0300	0.048	0.0023	0.0030	0.0480	-1.320	1.7424	0.8755	1.3200	1.3212	1.7456	0.1452	1.3212
PV-2	0.050	0.0025	0.0015	0.0500	-0.083	0.0069	0.0058	0.0830	-1.451	2.1054	1.1378	1.4510	1.4542	2.1148	0.2642	1.4542
PV-3	-0.003	0.0000	0.0002	0.0030	-0.085	0.0072	0.0061	0.0850	-1.349	1.8198	0.9306	1.3490	1.3517	1.8270	0.1693	1.3517
PV-4	0.001	0.0000	0.0001	0.0010	-0.044	0.0019	0.0014	0.0440	-0.941	0.8855	0.3099	0.9410	0.9420	0.8874	0.0000	0.9420

PV-5	0.002	0.0000	0.0001	0.0020	0.056	0.0031	0.0040	0.0560	0.177	0.0313	0.3151	0.1770	0.1857	0.0345	0.5693	0.1857
PV-6	0.004	0.0000	0.0001	0.0040	0.069	0.0048	0.0058	0.0690	0.927	0.8593	1.7196	0.9270	0.9296	0.8641	0.0001	0.9296
PV-8	0.076	0.0058	0.0042	0.0760	0.073	0.0053	0.0064	0.0730	1.029	1.0588	1.9975	1.0290	1.0344	1.0699	0.0089	1.0344
PV-10	0.040	0.0016	0.0008	0.0400	-0.157	0.0246	0.0225	0.1570	-2.310	5.3361	3.7082	2.3100	2.3157	5.3623	1.8919	2.3157
PV-9	0.001	0.0000	0.0001	0.0010	-0.066	0.0044	0.0035	0.0660	-0.552	0.3047	0.0281	0.5520	0.5559	0.3091	0.1477	0.5559
PV-7	-0.017	0.0003	0.0008	0.0170	0.023	0.0005	0.0009	0.0230	0.035	0.0012	0.1758	0.0350	0.0452	0.0020	0.8010	0.0452
PV-12	-0.014	0.0002	0.0006	0.0140	0.028	0.0008	0.0012	0.0280	0.543	0.2948	0.8599	0.5430	0.5439	0.2958	0.1571	0.5439
PV-11	0.023	0.0005	0.0001	0.0230	0.055	0.0030	0.0038	0.0550	0.600	0.3600	0.9689	0.6000	0.6030	0.3636	0.1137	0.6030
Total (m)	0.011	0.031	0.031	0.076	-0.007	0.074	0.076	0.157	-0.384	1.111	1.088	2.310	0.9402	1.1134	0.6229	2.316

Cuadro A3. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 5 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.056	0.0031	0.0035	0.0558	0.054	0.0029	0.0029	0.0537	0.050	0.0025	0.0025	0.0500	0.0922	0.0085	0.0003	0.0922
PV-2	0.066	0.0043	0.0048	0.0656	0.019	0.0003	0.0004	0.0186	0.159	0.0253	0.0253	0.1590	0.1730	0.0299	0.0042	0.1730
PV-3	-0.004	0.0000	0.0000	0.0042	-0.006	0.0000	0.0000	0.0058	0.181	0.0328	0.0328	0.1810	0.1812	0.0328	0.0053	0.1812
PV-4	0.016	0.0003	0.0004	0.0161	0.029	0.0008	0.0008	0.0286	0.099	0.0098	0.0098	0.0990	0.1043	0.0109	0.0000	0.1043
PV-5	-0.011	0.0001	0.0001	0.0106	0.045	0.0020	0.0021	0.0452	0.057	0.0033	0.0033	0.0570	0.0736	0.0054	0.0012	0.0736
PV-6	-0.031	0.0010	0.0008	0.0315	0.002	0.0000	0.0000	0.0021	0.007	0.0000	0.0001	0.0070	0.0323	0.0010	0.0058	0.0323
PV-8	0.026	0.0007	0.0009	0.0263	-0.015	0.0002	0.0002	0.0154	-0.051	0.0026	0.0026	0.0511	0.0595	0.0035	0.0024	0.0595
PV-10	-0.094	0.0088	0.0082	0.0938	-0.060	0.0036	0.0036	0.0603	-0.300	0.0900	0.0899	0.3000	0.3201	0.1025	0.0448	0.3201
PV-9	-0.033	0.0011	0.0009	0.0331	-0.030	0.0009	0.0009	0.0298	-0.082	0.0067	0.0067	0.0820	0.0933	0.0087	0.0002	0.0933
PV-7	-0.045	0.0020	0.0017	0.0447	0.011	0.0001	0.0001	0.0106	-0.075	0.0056	0.0056	0.0750	0.0880	0.0077	0.0004	0.0880
PV-12	-0.018	0.0003	0.0002	0.0179	-0.015	0.0002	0.0002	0.0147	-0.017	0.0003	0.0003	0.0170	0.0287	0.0008	0.0064	0.0287
PV-11	0.030	0.0009	0.0011	0.0298	-0.037	0.0014	0.0013	0.0370	-0.030	0.0009	0.0009	0.0300	0.0562	0.0032	0.0027	0.0562
Total (m)	-0.004	0.043	0.045	0.094	-0.0003	0.032	0.034	0.060	0.000	0.122	0.128	0.300	0.1085	0.1339	0.0819	0.320

Cuadro A4. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 6 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.051	0.0026	0.0012	0.0507	0.064	0.0041	0.0030	0.0639	0.040	0.0016	0.0006	0.0400	0.0908	0.0082	0.0001	0.0908
PV-2	0.079	0.0063	0.0039	0.0793	0.039	0.0015	0.0009	0.0389	0.169	0.0286	0.0238	0.1690	0.1907	0.0364	0.0082	0.1907

PV-3	0.019	0.0004	0.0000	0.0191	0.001	0.0000	0.0001	0.0005	0.101	0.0102	0.0074	0.1010	0.1028	0.0106	0.0000	0.1028
PV-4	0.027	0.0007	0.0001	0.0273	0.007	0.0001	0.0000	0.0074	-0.011	0.0001	0.0007	0.0110	0.0304	0.0009	0.0049	0.0304
PV-5	0.020	0.0004	0.0000	0.0196	0.044	0.0019	0.0012	0.0438	0.077	0.0059	0.0039	0.0771	0.0908	0.0082	0.0001	0.0908
PV-6	0.049	0.0024	0.0011	0.0493	0.006	0.0000	0.0000	0.0064	0.117	0.0137	0.0104	0.1170	0.1272	0.0162	0.0007	0.1272
PV-8	0.073	0.0053	0.0031	0.0727	0.011	0.0001	0.0000	0.0109	0.029	0.0008	0.0002	0.0290	0.0790	0.0062	0.0004	0.0790
PV-10	-0.109	0.0118	0.0157	0.1087	-0.043	0.0018	0.0027	0.0428	-0.290	0.0841	0.0929	0.2900	0.3126	0.0977	0.0452	0.3126
PV-9	-0.025	0.0006	0.0017	0.0249	-0.023	0.0005	0.0010	0.0233	-0.052	0.0027	0.0045	0.0519	0.0621	0.0039	0.0014	0.0621
PV-7	-0.015	0.0002	0.0010	0.0146	0.019	0.0003	0.0001	0.0185	-0.035	0.0012	0.0025	0.0350	0.0422	0.0018	0.0033	0.0422
PV-12	-0.007	0.0001	0.0006	0.0071	-0.022	0.0005	0.0009	0.0217	0.023	0.0005	0.0001	0.0230	0.0324	0.0010	0.0046	0.0324
PV-11	0.038	0.0014	0.0004	0.0378	0.004	0.0000	0.0000	0.0040	0.010	0.0001	0.0000	0.0100	0.0393	0.0015	0.0037	0.0393
Total (m)	0.017	0.052	0.051	0.109	0.009	0.030	0.030	0.064	0.015	0.112	0.116	0.290	0.1000	0.1267	0.0813	0.313

Cuadro A5. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 8 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.035	0.0013	0.0009	0.0354	0.058	0.0034	0.0027	0.0583	0.050	0.0025	0.0014	0.0500	0.0846	0.0072	0.0002	0.0846
PV-2	0.052	0.0027	0.0021	0.0516	-0.007	0.0000	0.0002	0.0070	0.139	0.0193	0.0160	0.1390	0.1484	0.0220	0.0023	0.1484
PV-3	-0.021	0.0004	0.0007	0.0209	-0.008	0.0001	0.0002	0.0077	0.121	0.0146	0.0118	0.1210	0.1230	0.0151	0.0005	0.1230
PV-4	0.006	0.0000	0.0000	0.0064	0.043	0.0018	0.0013	0.0429	-0.021	0.0004	0.0011	0.0210	0.0482	0.0023	0.0027	0.0482
PV-5	0.012	0.0001	0.0000	0.0119	0.040	0.0016	0.0011	0.0400	0.057	0.0033	0.0020	0.0570	0.0706	0.0050	0.0009	0.0706
PV-6	0.014	0.0002	0.0001	0.0138	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.107	0.0114	0.0090	0.1070	0.1078	0.0116	0.0001	0.1078
PV-8	0.033	0.0011	0.0008	0.0327	0.006	0.0000	0.0000	0.0058	0.029	0.0008	0.0003	0.0290	0.0441	0.0019	0.0031	0.0441
PV-10	-0.053	0.0028	0.0034	0.0529	-0.034	0.0012	0.0017	0.0344	-0.270	0.0729	0.0797	0.2700	0.2773	0.0769	0.0314	0.2773
PV-9	-0.017	0.0003	0.0005	0.0172	-0.014	0.0002	0.0004	0.0143	-0.072	0.0052	0.0071	0.0720	0.0754	0.0057	0.0006	0.0754
PV-7	-0.016	0.0003	0.0005	0.0161	0.007	0.0001	0.0000	0.0074	-0.025	0.0006	0.0014	0.0250	0.0307	0.0009	0.0048	0.0307
PV-12	-0.015	0.0002	0.0004	0.0155	-0.009	0.0001	0.0002	0.0089	0.023	0.0005	0.0001	0.0230	0.0291	0.0008	0.0050	0.0291
PV-11	0.034	0.0012	0.0008	0.0341	-0.006	0.0000	0.0001	0.0056	0.010	0.0001	0.0000	0.0100	0.0360	0.0013	0.0041	0.0360
Total (m)	0.005	0.030	0.030	0.053	0.006	0.027	0.027	0.058	0.012	0.105	0.109	0.270	0.0896	0.1121	0.0712	0.277

Cuadro A6. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 9 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}

PV-1	0.053	0.0028	0.0027	0.0526	0.062	0.0038	0.0040	0.0620	0.030	0.0009	0.0007	0.0299	0.0867	0.0075	0.0001	0.0867
PV-2	0.056	0.0032	0.0032	0.0565	-0.010	0.0001	0.0001	0.0104	0.099	0.0098	0.0092	0.0990	0.1144	0.0131	0.0015	0.1144
PV-3	-0.014	0.0002	0.0002	0.0143	-0.010	0.0001	0.0001	0.0098	0.141	0.0199	0.0190	0.1410	0.1421	0.0202	0.0043	0.1421
PV-4	-0.007	0.0001	0.0001	0.0071	0.041	0.0016	0.0017	0.0406	0.019	0.0004	0.0003	0.0190	0.0454	0.0021	0.0009	0.0454
PV-5	-0.001	0.0000	0.0000	0.0005	0.042	0.0018	0.0019	0.0421	0.037	0.0014	0.0011	0.0370	0.0560	0.0031	0.0004	0.0560
PV-6	-0.001	0.0000	0.0000	0.0011	0.013	0.0002	0.0002	0.0131	0.027	0.0007	0.0006	0.0270	0.0300	0.0009	0.0021	0.0300
PV-8	0.041	0.0017	0.0017	0.0409	-0.019	0.0004	0.0003	0.0188	-0.001	0.0000	0.0000	0.0010	0.0450	0.0020	0.0010	0.0450
PV-10	-0.074	0.0055	0.0055	0.0741	-0.058	0.0033	0.0032	0.0577	-0.180	0.0324	0.0336	0.1800	0.2030	0.0412	0.0161	0.2030
PV-9	-0.017	0.0003	0.0003	0.0172	-0.014	0.0002	0.0002	0.0143	-0.042	0.0018	0.0020	0.0421	0.0476	0.0023	0.0008	0.0476
PV-7	-0.037	0.0013	0.0013	0.0365	-0.007	0.0001	0.0000	0.0074	-0.045	0.0020	0.0023	0.0450	0.0584	0.0034	0.0003	0.0584
PV-12	-0.022	0.0005	0.0005	0.0222	-0.026	0.0007	0.0006	0.0262	-0.027	0.0007	0.0009	0.0270	0.0437	0.0019	0.0011	0.0437
PV-11	0.026	0.0007	0.0006	0.0255	-0.026	0.0007	0.0006	0.0261	-0.020	0.0004	0.0005	0.0200	0.0416	0.0017	0.0012	0.0416
Total (m)	0.000	0.037	0.038	0.074	-0.001	0.033	0.034	0.062	0.003	0.077	0.080	0.180	0.0762	0.0910	0.0521	0.203

Cuadro A7. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 10 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.048	0.0023	0.0024	0.0478	0.060	0.0036	0.0037	0.0602	0.000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0768	0.0059	0.0000	0.0768
PV-2	0.028	0.0008	0.0008	0.0280	-0.074	0.0054	0.0054	0.0736	0.109	0.0119	0.0132	0.1090	0.1345	0.0181	0.0036	0.1345
PV-3	-0.019	0.0004	0.0003	0.0193	-0.013	0.0002	0.0002	0.0127	0.081	0.0066	0.0076	0.0810	0.0842	0.0071	0.0001	0.0842
PV-4	-0.015	0.0002	0.0002	0.0152	0.032	0.0011	0.0011	0.0324	0.009	0.0001	0.0002	0.0090	0.0369	0.0014	0.0014	0.0369
PV-5	0.010	0.0001	0.0001	0.0101	0.050	0.0025	0.0025	0.0497	0.027	0.0007	0.0011	0.0270	0.0575	0.0033	0.0003	0.0575
PV-6	0.008	0.0001	0.0001	0.0082	0.011	0.0001	0.0001	0.0108	0.017	0.0003	0.0005	0.0170	0.0218	0.0005	0.0028	0.0218
PV-8	0.026	0.0007	0.0007	0.0265	-0.001	0.0000	0.0000	0.0012	0.039	0.0015	0.0020	0.0390	0.0472	0.0022	0.0008	0.0472
PV-10	-0.102	0.0104	0.0103	0.1021	-0.062	0.0038	0.0038	0.0619	-0.080	0.0064	0.0055	0.0801	0.1438	0.0207	0.0048	0.1438
PV-9	-0.008	0.0001	0.0000	0.0075	-0.005	0.0000	0.0000	0.0053	-0.122	0.0149	0.0135	0.1220	0.1224	0.0150	0.0023	0.1224
PV-7	-0.008	0.0001	0.0001	0.0085	0.010	0.0001	0.0001	0.0098	-0.095	0.0090	0.0079	0.0949	0.0958	0.0092	0.0004	0.0958
PV-12	-0.009	0.0001	0.0001	0.0094	-0.015	0.0002	0.0002	0.0151	-0.027	0.0007	0.0004	0.0270	0.0323	0.0010	0.0018	0.0323
PV-11	0.032	0.0011	0.0011	0.0324	0.003	0.0000	0.0000	0.0034	-0.030	0.0009	0.0006	0.0300	0.0443	0.0020	0.0009	0.0443
Total (m)	-0.001	0.037	0.038	0.102	0.000	0.038	0.039	0.074	-0.006	0.066	0.069	0.122	0.0748	0.0848	0.0417	0.144

Cuadro A8. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 11 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
PV-1	0.032	0.0010	0.0008	0.0316	0.069	0.0047	0.0031	0.0687	-0.020	0.0004	0.0017	0.0200	0.0782	0.0061	0.0003	0.0782
PV-2	0.041	0.0017	0.0015	0.0414	-0.009	0.0001	0.0005	0.0090	0.109	0.0119	0.0078	0.1090	0.1169	0.0137	0.0030	0.1169
PV-3	-0.019	0.0004	0.0005	0.0191	-0.015	0.0002	0.0008	0.0148	0.091	0.0083	0.0049	0.0910	0.0941	0.0089	0.0010	0.0941
PV-4	-0.016	0.0002	0.0003	0.0157	0.036	0.0013	0.0005	0.0360	-0.011	0.0001	0.0010	0.0110	0.0408	0.0017	0.0005	0.0408
PV-5	0.002	0.0000	0.0000	0.0021	0.056	0.0031	0.0018	0.0556	0.067	0.0045	0.0022	0.0670	0.0871	0.0076	0.0006	0.0871
PV-6	0.005	0.0000	0.0000	0.0050	0.012	0.0001	0.0000	0.0122	0.057	0.0033	0.0013	0.0570	0.0585	0.0034	0.0000	0.0585
PV-8	0.027	0.0007	0.0006	0.0273	-0.007	0.0000	0.0004	0.0069	0.079	0.0062	0.0034	0.0790	0.0838	0.0070	0.0005	0.0838
PV-10	-0.013	0.0002	0.0002	0.0127	0.016	0.0003	0.0000	0.0161	0.000	0.0000	0.0004	0.0000	0.0205	0.0004	0.0018	0.0205
PV-9	-0.018	0.0003	0.0004	0.0184	-0.003	0.0000	0.0002	0.0028	-0.042	0.0018	0.0039	0.0421	0.0460	0.0021	0.0003	0.0460
PV-7	-0.017	0.0003	0.0004	0.0167	0.023	0.0005	0.0001	0.0230	-0.075	0.0056	0.0092	0.0750	0.0802	0.0064	0.0003	0.0802
PV-12	-0.011	0.0001	0.0002	0.0111	-0.018	0.0003	0.0010	0.0183	-0.007	0.0000	0.0008	0.0069	0.0225	0.0005	0.0016	0.0225
PV-11	0.019	0.0004	0.0003	0.0188	-0.006	0.0000	0.0004	0.0063	0.000	0.0000	0.0004	0.0001	0.0198	0.0004	0.0018	0.0198
Total (m)	0.003	0.021	0.022	0.041	0.013	0.030	0.028	0.069	0.021	0.059	0.058	0.109	0.0624	0.0697	0.0324	0.117

9.2. PRECISIÓN CHICAHUAXTLA

En los siguientes cuadros se presentan los cuatro parámetros de error (ME, RMSE, SDE y Error Máximo) para el poblado de Chichahuaxtla por puntos de control (PC).

Cuadro A9. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	2.384	5.6835	4.9653	2.3840	3.559	12.6665	12.8994	3.5590	-0.482	0.2323	0.2915	0.4820	4.3107	18.5823	14.6388	4.3107
V2	0.087	0.0076	0.0047	0.0870	0.324	0.1050	0.0283	0.3240	0.174	0.0303	0.0135	0.1740	0.3779	0.1428	0.0114	0.3779
V3	0.147	0.0216	0.0001	0.1470	-0.071	0.0050	0.0514	0.0710	0.084	0.0071	0.0007	0.0840	0.1836	0.0337	0.0906	0.1836
V4	0.160	0.0256	0.0000	0.1600	-0.257	0.0660	0.1703	0.2570	0.035	0.0012	0.0005	0.0350	0.3048	0.0929	0.0324	0.3048
V5	0.054	0.0029	0.0103	0.0540	-0.217	0.0471	0.1389	0.2170	0.105	0.0110	0.0022	0.1050	0.2470	0.0610	0.0565	0.2470
V6	0.090	0.0081	0.0043	0.0900	-0.131	0.0172	0.0822	0.1310	0.139	0.0193	0.0066	0.1390	0.2111	0.0446	0.0748	0.2111
V7	0.099	0.0098	0.0032	0.0990	-0.233	0.0543	0.1511	0.2330	0.004	0.0000	0.0029	0.0040	0.2532	0.0641	0.0536	0.2532
V8	0.041	0.0017	0.0132	0.0410	-0.185	0.0342	0.1161	0.1850	0.075	0.0056	0.0003	0.0750	0.2038	0.0415	0.0789	0.2038

V9	0.102	0.0104	0.0029	0.1020	-0.188	0.0353	0.1181	0.1880	0.287	0.0824	0.0525	0.2870	0.3579	0.1281	0.0161	0.3579
V10	-0.037	0.0014	0.0371	0.0370	-0.185	0.0342	0.1161	0.1850	-0.096	0.0092	0.0237	0.0960	0.2117	0.0448	0.0745	0.2117
V12	-0.054	0.0029	0.0440	0.0540	-0.164	0.0269	0.1022	0.1640	-0.068	0.0046	0.0159	0.0680	0.1856	0.0344	0.0894	0.1856
V13	-0.050	0.0025	0.0423	0.0500	-0.225	0.0506	0.1449	0.2250	-0.076	0.0058	0.0179	0.0760	0.2427	0.0589	0.0585	0.2427
V14	0.015	0.0002	0.0198	0.0150	-0.266	0.0708	0.1778	0.2660	0.043	0.0018	0.0002	0.0430	0.2699	0.0728	0.0461	0.2699
V15	-0.034	0.0012	0.0360	0.0340	-0.230	0.0529	0.1488	0.2300	0.038	0.0014	0.0004	0.0380	0.2356	0.0555	0.0620	0.2356
V16	-0.030	0.0009	0.0345	0.0300	-0.230	0.0529	0.1488	0.2300	-0.044	0.0019	0.0104	0.0440	0.2361	0.0557	0.0618	0.2361
V17	0.003	0.0000	0.0233	0.0030	-0.355	0.1260	0.2608	0.3550	0.071	0.0050	0.0002	0.0710	0.3620	0.1311	0.0150	0.3620
V18	0.026	0.0007	0.0168	0.0260	-0.292	0.0853	0.2004	0.2920	0.097	0.0094	0.0015	0.0970	0.3088	0.0953	0.0309	0.3088
V19	-0.022	0.0005	0.0316	0.0220	-0.318	0.1011	0.2244	0.3180	0.000	0.0000	0.0034	0.0000	0.3188	0.1016	0.0275	0.3188
V20	0.060	0.0036	0.0092	0.0600	-0.275	0.0756	0.1855	0.2750	0.154	0.0237	0.0092	0.1540	0.3208	0.1029	0.0268	0.3208
V21	0.124	0.0154	0.0010	0.1240	-0.422	0.1781	0.3338	0.4220	0.435	0.1892	0.1422	0.4350	0.6186	0.3827	0.0179	0.6186
V22	0.105	0.0110	0.0026	0.1050	-0.323	0.1043	0.2292	0.3230	0.242	0.0586	0.0339	0.2420	0.4170	0.1739	0.0046	0.4170
Total (m)	0.156	0.526	0.515	2.384	-0.033	0.816	1.207	3.559	0.058	0.183	0.177	0.482	0.4847	0.9880	1.1897	4.311

Cuadro A10. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 4 (b) PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	-0.106	0.0112	0.0089	0.1060	0.017	0.0003	0.0040	0.0170	-0.052	0.0027	0.0037	0.0520	0.1193	0.0142	0.0022	0.1193
V2	-0.044	0.0019	0.0010	0.0440	-0.055	0.0030	0.0001	0.0550	-0.056	0.0031	0.0032	0.0560	0.0900	0.0081	0.0058	0.0900
V3	-0.082	0.0067	0.0049	0.0820	-0.132	0.0174	0.0074	0.1320	-0.136	0.0185	0.0005	0.1360	0.2065	0.0426	0.0016	0.2065
V4	0.064	0.0041	0.0058	0.0640	-0.135	0.0182	0.0079	0.1350	-0.285	0.0812	0.0296	0.2850	0.3218	0.1035	0.0243	0.3218
V5	-0.058	0.0034	0.0021	0.0580	-0.060	0.0036	0.0002	0.0600	-0.255	0.0650	0.0202	0.2550	0.2683	0.0720	0.0105	0.2683
V6	0.010	0.0001	0.0005	0.0100	0.036	0.0013	0.0067	0.0360	-0.161	0.0259	0.0023	0.1610	0.1653	0.0273	0.0000	0.1653
V7	-0.003	0.0000	0.0001	0.0030	-0.099	0.0098	0.0028	0.0990	-0.306	0.0936	0.0372	0.3060	0.3216	0.1034	0.0242	0.3216
V8	0.012	0.0001	0.0006	0.0120	-0.030	0.0009	0.0003	0.0300	-0.145	0.0210	0.0010	0.1450	0.1486	0.0221	0.0003	0.1486
V9	0.140	0.0196	0.0231	0.1400	0.007	0.0000	0.0028	0.0070	-0.073	0.0053	0.0016	0.0730	0.1580	0.0250	0.0001	0.1580
V10	-0.017	0.0003	0.0000	0.0170	-0.011	0.0001	0.0012	0.0110	-0.326	0.1063	0.0454	0.3260	0.3266	0.1067	0.0258	0.3266
V12	-0.081	0.0066	0.0048	0.0810	0.031	0.0010	0.0059	0.0310	-0.248	0.0615	0.0182	0.2480	0.2627	0.0690	0.0093	0.2627
V13	-0.044	0.0019	0.0010	0.0440	-0.012	0.0001	0.0011	0.0120	-0.206	0.0424	0.0086	0.2060	0.2110	0.0445	0.0020	0.2110
V14	0.003	0.0000	0.0002	0.0030	-0.065	0.0042	0.0004	0.0650	-0.047	0.0022	0.0044	0.0470	0.0803	0.0064	0.0074	0.0803
V15	-0.069	0.0048	0.0033	0.0690	-0.054	0.0029	0.0001	0.0540	0.028	0.0008	0.0199	0.0280	0.0920	0.0085	0.0055	0.0920
V16	0.007	0.0000	0.0004	0.0070	-0.077	0.0059	0.0010	0.0770	-0.084	0.0071	0.0008	0.0840	0.1142	0.0130	0.0027	0.1142

V17	0.005	0.0000	0.0003	0.0050	-0.077	0.0059	0.0010	0.0770	0.041	0.0017	0.0237	0.0410	0.0874	0.0076	0.0062	0.0874
V18	0.050	0.0025	0.0038	0.0500	-0.056	0.0031	0.0001	0.0560	-0.053	0.0028	0.0036	0.0530	0.0919	0.0084	0.0055	0.0919
V19	-0.043	0.0018	0.0010	0.0430	-0.014	0.0002	0.0010	0.0140	-0.110	0.0121	0.0000	0.1100	0.1189	0.0141	0.0022	0.1189
V20	0.000	0.0000	0.0001	0.0000	-0.042	0.0018	0.0000	0.0420	-0.026	0.0007	0.0076	0.0260	0.0494	0.0024	0.0136	0.0494
V21	-0.025	0.0006	0.0002	0.0250	-0.063	0.0040	0.0003	0.0630	0.155	0.0240	0.0718	0.1550	0.1692	0.0286	0.0000	0.1692
V22	0.031	0.0010	0.0018	0.0310	-0.073	0.0053	0.0007	0.0730	-0.028	0.0008	0.0072	0.0280	0.0841	0.0071	0.0067	0.0841
Total (m)	-0.012	0.056	0.056	0.140	-0.046	0.065	0.064	0.135	-0.113	0.166	0.125	0.326	0.1660	0.1871	0.1190	0.327

Cuadro A11. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 5 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	2.185	4.7742	4.2469	2.1850	3.256	10.6015	9.9102	3.2560	-0.322	0.1037	0.0940	0.3220	3.9344	15.4794	13.1029	3.9344
V2	0.039	0.0015	0.0073	0.0390	0.235	0.0552	0.0161	0.2350	0.314	0.0986	0.1085	0.3140	0.3941	0.1553	0.0063	0.3941
V3	0.010	0.0001	0.0130	0.0100	-0.057	0.0032	0.0272	0.0570	0.064	0.0041	0.0063	0.0640	0.0863	0.0074	0.0521	0.0863
V4	0.064	0.0041	0.0036	0.0640	-0.103	0.0106	0.0445	0.1030	-0.095	0.0090	0.0063	0.0950	0.1540	0.0237	0.0258	0.1540
V5	-0.056	0.0031	0.0325	0.0560	-0.058	0.0034	0.0275	0.0580	-0.045	0.0020	0.0009	0.0450	0.0923	0.0085	0.0494	0.0923
V6	0.022	0.0005	0.0104	0.0220	0.038	0.0014	0.0049	0.0380	-0.091	0.0083	0.0057	0.0910	0.1010	0.0102	0.0456	0.1010
V7	0.020	0.0004	0.0109	0.0200	-0.099	0.0098	0.0428	0.0990	-0.016	0.0003	0.0000	0.0160	0.1023	0.0105	0.0451	0.1023
V8	0.021	0.0004	0.0106	0.0210	-0.036	0.0013	0.0207	0.0360	-0.005	0.0000	0.0001	0.0050	0.0420	0.0018	0.0743	0.0420
V9	0.155	0.0240	0.0009	0.1550	-0.031	0.0010	0.0193	0.0310	0.207	0.0428	0.0495	0.2070	0.2605	0.0678	0.0029	0.2605
V10	0.029	0.0008	0.0091	0.0290	-0.052	0.0027	0.0256	0.0520	-0.056	0.0031	0.0016	0.0560	0.0817	0.0067	0.0542	0.0817
V12	-0.007	0.0000	0.0172	0.0070	-0.026	0.0007	0.0179	0.0260	-0.048	0.0023	0.0011	0.0480	0.0550	0.0030	0.0674	0.0550
V13	0.024	0.0006	0.0100	0.0240	-0.065	0.0042	0.0299	0.0650	0.054	0.0029	0.0048	0.0540	0.0878	0.0077	0.0514	0.0878
V14	0.053	0.0028	0.0051	0.0530	-0.081	0.0066	0.0357	0.0810	0.033	0.0011	0.0023	0.0330	0.1023	0.0105	0.0451	0.1023
V15	-0.026	0.0007	0.0226	0.0260	-0.087	0.0076	0.0380	0.0870	0.098	0.0096	0.0129	0.0980	0.1336	0.0178	0.0328	0.1336
V16	-0.004	0.0000	0.0164	0.0040	-0.069	0.0048	0.0313	0.0690	-0.064	0.0041	0.0024	0.0640	0.0942	0.0089	0.0486	0.0942
V17	0.025	0.0006	0.0098	0.0250	-0.090	0.0081	0.0392	0.0900	-0.009	0.0001	0.0000	0.0090	0.0938	0.0088	0.0487	0.0938
V18	0.070	0.0049	0.0029	0.0700	-0.093	0.0086	0.0404	0.0930	-0.093	0.0086	0.0060	0.0930	0.1490	0.0222	0.0274	0.1490
V19	-0.035	0.0012	0.0253	0.0350	-0.038	0.0014	0.0213	0.0380	-0.250	0.0625	0.0550	0.2500	0.2553	0.0652	0.0035	0.2553
V20	0.016	0.0003	0.0117	0.0160	-0.046	0.0021	0.0237	0.0460	-0.076	0.0058	0.0037	0.0760	0.0903	0.0081	0.0503	0.0903
V21	-0.025	0.0006	0.0223	0.0250	-0.135	0.0182	0.0590	0.1350	0.125	0.0156	0.0197	0.1250	0.1857	0.0345	0.0166	0.1857
V22	0.028	0.0008	0.0093	0.0280	-0.096	0.0092	0.0416	0.0960	-0.048	0.0023	0.0011	0.0480	0.1109	0.0123	0.0415	0.1109
Total (m)	0.124	0.479	0.474	2.185	0.108	0.716	0.978	3.256	-0.015	0.136	0.138	0.322	0.3146	0.8721	1.1238	3.934

Cuadro A12. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 6 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	2.125	4.52	4.05	2.1250	3.161	9.9919	9.3019	3.1610	-0.432	0.1866	0.1372	0.4320	3.8333	14.6942	12.3918	3.8333
2	0.007	0.00	0.01	0.0070	0.207	0.0428	0.0092	0.2070	0.244	0.0595	0.0934	0.2440	0.3201	0.1024	0.0000	0.3201
V3	-0.002	0.00	0.01	0.0020	-0.063	0.0040	0.0303	0.0630	-0.006	0.0000	0.0031	0.0060	0.0633	0.0040	0.0624	0.0633
V4	0.063	0.00	0.00	0.0630	-0.128	0.0164	0.0572	0.1280	-0.095	0.0090	0.0011	0.0950	0.1714	0.0294	0.0201	0.1714
V5	-0.054	0.00	0.03	0.0540	-0.086	0.0074	0.0388	0.0860	-0.065	0.0042	0.0000	0.0650	0.1206	0.0145	0.0371	0.1206
V6	0.010	0.00	0.01	0.0100	0.036	0.0013	0.0056	0.0360	-0.091	0.0083	0.0009	0.0910	0.0984	0.0097	0.0461	0.0984
V7	0.020	0.00	0.01	0.0200	-0.099	0.0098	0.0441	0.0990	-0.036	0.0013	0.0007	0.0360	0.1072	0.0115	0.0424	0.1072
V8	0.021	0.00	0.01	0.0210	-0.036	0.0013	0.0216	0.0360	-0.035	0.0012	0.0007	0.0350	0.0544	0.0030	0.0669	0.0544
V9	0.155	0.02	0.00	0.1550	-0.031	0.0010	0.0202	0.0310	0.207	0.0428	0.0721	0.2070	0.2605	0.0678	0.0028	0.2605
V10	0.024	0.00	0.01	0.0240	-0.042	0.0018	0.0234	0.0420	-0.096	0.0092	0.0012	0.0960	0.1075	0.0116	0.0423	0.1075
V12	-0.020	0.00	0.02	0.0200	0.006	0.0000	0.0110	0.0060	-0.088	0.0077	0.0007	0.0880	0.0904	0.0082	0.0496	0.0904
V13	0.029	0.00	0.01	0.0290	-0.031	0.0010	0.0202	0.0310	0.024	0.0006	0.0073	0.0240	0.0488	0.0024	0.0699	0.0488
V14	0.046	0.00	0.00	0.0460	-0.034	0.0012	0.0211	0.0340	0.003	0.0000	0.0042	0.0030	0.0573	0.0033	0.0654	0.0573
V15	-0.047	0.00	0.03	0.0470	-0.066	0.0044	0.0314	0.0660	0.078	0.0061	0.0195	0.0780	0.1125	0.0126	0.0403	0.1125
V16	-0.019	0.00	0.02	0.0190	-0.037	0.0014	0.0219	0.0370	-0.164	0.0269	0.0105	0.1640	0.1692	0.0286	0.0207	0.1692
V17	0.017	0.00	0.01	0.0170	-0.088	0.0077	0.0396	0.0880	-0.079	0.0062	0.0003	0.0790	0.1195	0.0143	0.0375	0.1195
V18	0.049	0.00	0.00	0.0490	-0.059	0.0035	0.0289	0.0590	-0.203	0.0412	0.0200	0.2030	0.2170	0.0471	0.0092	0.2170
V19	-0.035	0.00	0.02	0.0350	-0.038	0.0014	0.0222	0.0380	-0.250	0.0625	0.0355	0.2500	0.2553	0.0652	0.0033	0.2553
V20	-0.005	0.00	0.01	0.0050	-0.050	0.0025	0.0260	0.0500	-0.126	0.0159	0.0042	0.1260	0.1357	0.0184	0.0315	0.1357
V21	-0.050	0.00	0.03	0.0500	-0.110	0.0121	0.0489	0.1100	-0.005	0.0000	0.0032	0.0050	0.1209	0.0146	0.0369	0.1209
V22	0.015	0.00	0.01	0.0150	-0.079	0.0062	0.0361	0.0790	-0.078	0.0061	0.0003	0.0780	0.1120	0.0125	0.0404	0.1120
Total (m)	0.112	0.466	0.464	2.125	0.111	0.694	0.947	3.161	-0.062	0.154	0.144	0.432	0.3131	0.8501	1.0920	3.833

Cuadro A13. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 8 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	1.280	1.6384	1.4918	1.2800	2.193	4.8092	4.5580	2.1930	-0.272	0.0740	0.0388	0.2720	2.5537	6.5216	5.3034	2.5537
V2	-0.060	0.0036	0.0141	0.0600	0.016	0.0003	0.0018	0.0160	0.084	0.0071	0.0253	0.0840	0.1045	0.0109	0.0214	0.1045

V3	-0.066	0.0044	0.0155	0.0660	-0.086	0.0074	0.0207	0.0860	-0.076	0.0058	0.0000	0.0760	0.1324	0.0175	0.0140	0.1324
V4	0.067	0.0045	0.0001	0.0670	-0.109	0.0119	0.0279	0.1090	-0.035	0.0012	0.0016	0.0350	0.1326	0.0176	0.0140	0.1326
V5	-0.054	0.0029	0.0127	0.0540	-0.064	0.0041	0.0149	0.0640	-0.055	0.0030	0.0004	0.0550	0.1002	0.0100	0.0227	0.1002
V6	0.010	0.0001	0.0024	0.0100	0.036	0.0013	0.0005	0.0360	-0.061	0.0037	0.0002	0.0610	0.0715	0.0051	0.0321	0.0715
V7	0.006	0.0000	0.0028	0.0060	-0.091	0.0083	0.0222	0.0910	0.004	0.0000	0.0062	0.0040	0.0913	0.0083	0.0255	0.0913
V8	0.021	0.0004	0.0014	0.0210	-0.036	0.0013	0.0088	0.0360	0.025	0.0006	0.0100	0.0250	0.0486	0.0024	0.0409	0.0486
V9	0.141	0.0199	0.0068	0.1410	-0.032	0.0010	0.0081	0.0320	0.207	0.0428	0.0795	0.2070	0.2525	0.0638	0.0000	0.2525
V10	0.004	0.0000	0.0030	0.0040	-0.013	0.0002	0.0050	0.0130	-0.166	0.0276	0.0083	0.1660	0.1666	0.0277	0.0071	0.1666
V12	-0.051	0.0026	0.0120	0.0510	0.007	0.0000	0.0026	0.0070	-0.178	0.0317	0.0106	0.1780	0.1853	0.0343	0.0043	0.1853
V13	-0.037	0.0014	0.0091	0.0370	-0.040	0.0016	0.0096	0.0400	-0.126	0.0159	0.0026	0.1260	0.1373	0.0188	0.0129	0.1373
V14	0.018	0.0003	0.0016	0.0180	-0.059	0.0035	0.0137	0.0590	-0.087	0.0076	0.0001	0.0870	0.1066	0.0114	0.0208	0.1066
V15	-0.048	0.0023	0.0114	0.0480	-0.063	0.0040	0.0147	0.0630	-0.022	0.0005	0.0028	0.0220	0.0822	0.0068	0.0284	0.0822
V16	-0.026	0.0007	0.0072	0.0260	-0.046	0.0021	0.0108	0.0460	-0.204	0.0416	0.0167	0.2040	0.2107	0.0444	0.0016	0.2107
V17	0.017	0.0003	0.0017	0.0170	-0.088	0.0077	0.0213	0.0880	-0.089	0.0079	0.0002	0.0890	0.1263	0.0160	0.0155	0.1263
V18	0.057	0.0032	0.0000	0.0570	-0.071	0.0050	0.0167	0.0710	-0.183	0.0335	0.0117	0.1830	0.2044	0.0418	0.0022	0.2044
V19	-0.030	0.0009	0.0079	0.0300	-0.025	0.0006	0.0069	0.0250	-0.230	0.0529	0.0241	0.2300	0.2333	0.0544	0.0003	0.2333
V20	-0.009	0.0001	0.0046	0.0090	-0.035	0.0012	0.0087	0.0350	-0.096	0.0092	0.0004	0.0960	0.1026	0.0105	0.0220	0.1026
V21	-0.038	0.0014	0.0093	0.0380	-0.091	0.0083	0.0222	0.0910	0.055	0.0030	0.0169	0.0550	0.1129	0.0128	0.0190	0.1129
V22	0.029	0.0008	0.0009	0.0290	-0.084	0.0071	0.0202	0.0840	-0.068	0.0046	0.0000	0.0680	0.1119	0.0125	0.0193	0.1119
Total (m)	0.059	0.284	0.284	1.280	0.058	0.482	0.662	2.193	-0.075	0.133	0.113	0.272	0.2508	0.5752	0.7153	2.554

Cuadro A14. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 10 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	-0.381	0.1452	0.1254	0.3810	0.003	0.0000	0.0021	0.0030	0.038	0.0014	0.0107	0.0380	0.3829	0.1466	0.0553	0.3829
V2	0.092	0.0085	0.0141	0.0920	-0.037	0.0014	0.0000	0.0370	0.144	0.0207	0.0438	0.1440	0.1748	0.0306	0.0007	0.1748
V3	0.021	0.0004	0.0023	0.0210	-0.105	0.0110	0.0038	0.1050	-0.096	0.0092	0.0009	0.0960	0.1438	0.0207	0.0000	0.1438
V4	-0.020	0.0004	0.0000	0.0200	-0.109	0.0119	0.0043	0.1090	-0.125	0.0156	0.0036	0.1250	0.1671	0.0279	0.0004	0.1671
V5	-0.021	0.0004	0.0000	0.0210	-0.060	0.0036	0.0003	0.0600	-0.095	0.0090	0.0009	0.0950	0.1143	0.0131	0.0011	0.1143
V6	-0.011	0.0001	0.0003	0.0110	0.042	0.0018	0.0073	0.0420	-0.101	0.0102	0.0013	0.1010	0.1099	0.0121	0.0014	0.1099
V7	-0.039	0.0015	0.0001	0.0390	-0.089	0.0079	0.0021	0.0890	-0.066	0.0044	0.0000	0.0660	0.1175	0.0138	0.0009	0.1175
V8	-0.022	0.0005	0.0000	0.0220	-0.041	0.0017	0.0000	0.0410	-0.055	0.0030	0.0001	0.0550	0.0720	0.0052	0.0057	0.0720
V9	-0.007	0.0000	0.0004	0.0070	-0.009	0.0001	0.0012	0.0090	0.237	0.0562	0.0914	0.2370	0.2373	0.0563	0.0080	0.2373

V10	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.013	0.0002	0.0009	0.0130	-0.146	0.0213	0.0065	0.1460	0.1466	0.0215	0.0000	0.1466
V12	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	0.007	0.0000	0.0025	0.0070	-0.158	0.0250	0.0086	0.1580	0.1582	0.0250	0.0001	0.1582
V13	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.040	0.0016	0.0000	0.0400	-0.096	0.0092	0.0009	0.0960	0.1040	0.0108	0.0019	0.1040
V14	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.059	0.0035	0.0002	0.0590	-0.027	0.0007	0.0015	0.0270	0.0649	0.0042	0.0069	0.0649
V15	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.063	0.0040	0.0004	0.0630	-0.042	0.0018	0.0005	0.0420	0.0757	0.0057	0.0052	0.0757
V16	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.046	0.0021	0.0000	0.0460	-0.164	0.0269	0.0097	0.1640	0.1703	0.0290	0.0005	0.1703
V17	0.000	0.0000	0.0007	0.0000	-0.088	0.0077	0.0020	0.0880	-0.069	0.0048	0.0000	0.0690	0.1118	0.0125	0.0013	0.1118
V18	-0.017	0.0003	0.0001	0.0170	-0.031	0.0010	0.0002	0.0310	-0.173	0.0299	0.0116	0.1730	0.1766	0.0312	0.0008	0.1766
V19	-0.035	0.0012	0.0001	0.0350	0.002	0.0000	0.0021	0.0020	-0.280	0.0784	0.0461	0.2800	0.2822	0.0796	0.0180	0.2822
V20	-0.033	0.0011	0.0000	0.0330	-0.033	0.0011	0.0001	0.0330	-0.086	0.0074	0.0004	0.0860	0.0978	0.0096	0.0025	0.0978
V21	-0.042	0.0018	0.0002	0.0420	-0.075	0.0056	0.0010	0.0750	0.045	0.0020	0.0122	0.0450	0.0970	0.0094	0.0026	0.0970
V22	-0.049	0.0024	0.0005	0.0490	-0.065	0.0042	0.0005	0.0650	-0.058	0.0034	0.0001	0.0580	0.0999	0.0100	0.0023	0.0999
Total (m)	-0.027	0.088	0.086	0.381	-0.043	0.058	0.053	0.109	-0.065	0.127	0.112	0.280	0.1478	0.1654	0.1026	0.383

Cuadro A15. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 12 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	Emax	ME	RMSE	SDE	Emax	ME	RMSE	SDE	Emax	ME	RMSE	SDE	Emax
V1	-0.370	0.1372	0.1279	0.3704	0.019	0.0004	0.0012	0.0191	-0.062	0.0038	0.0000	0.0620	0.3760	0.1414	0.0578	0.3760
V2	0.044	0.0020	0.0033	0.0445	-0.030	0.0009	0.0002	0.0296	0.154	0.0237	0.0461	0.1540	0.1630	0.0266	0.0007	0.1630
V3	-0.044	0.0019	0.0010	0.0437	-0.107	0.0115	0.0083	0.1072	-0.036	0.0013	0.0006	0.0360	0.1212	0.0147	0.0002	0.1212
V4	0.046	0.0021	0.0035	0.0460	-0.086	0.0073	0.0048	0.0857	-0.045	0.0020	0.0002	0.0450	0.1072	0.0115	0.0008	0.1072
V5	-0.056	0.0031	0.0018	0.0556	0.016	0.0003	0.0010	0.0159	-0.045	0.0020	0.0002	0.0450	0.0733	0.0054	0.0039	0.0733
V6	0.010	0.0001	0.0005	0.0099	0.036	0.0013	0.0028	0.0364	-0.021	0.0004	0.0016	0.0209	0.0431	0.0019	0.0086	0.0431
V7	-0.028	0.0008	0.0002	0.0278	-0.075	0.0057	0.0035	0.0754	-0.026	0.0007	0.0012	0.0260	0.0845	0.0071	0.0026	0.0845
V8	0.008	0.0001	0.0004	0.0079	-0.042	0.0018	0.0007	0.0423	-0.025	0.0006	0.0013	0.0250	0.0498	0.0025	0.0074	0.0498
V9	0.113	0.0127	0.0157	0.1127	0.040	0.0016	0.0031	0.0397	0.146	0.0212	0.0426	0.1455	0.1883	0.0355	0.0028	0.1883
V10	0.082	0.0067	0.0090	0.0820	0.069	0.0047	0.0072	0.0688	-0.166	0.0276	0.0111	0.1660	0.1976	0.0390	0.0038	0.1976
V12	0.056	0.0031	0.0047	0.0556	0.021	0.0004	0.0014	0.0212	-0.178	0.0317	0.0137	0.1780	0.1877	0.0352	0.0027	0.1877
V13	-0.013	0.0002	0.0000	0.0127	0.026	0.0007	0.0018	0.0265	-0.106	0.0112	0.0020	0.1060	0.1100	0.0121	0.0007	0.1100
V14	0.029	0.0008	0.0018	0.0291	-0.029	0.0008	0.0002	0.0291	-0.037	0.0014	0.0006	0.0370	0.0553	0.0031	0.0064	0.0553
V15	-0.042	0.0018	0.0009	0.0423	-0.023	0.0005	0.0001	0.0233	-0.052	0.0027	0.0001	0.0520	0.0710	0.0050	0.0042	0.0710
V16	0.007	0.0000	0.0004	0.0066	-0.019	0.0003	0.0000	0.0185	-0.184	0.0339	0.0152	0.1840	0.1851	0.0343	0.0024	0.1851
V17	-0.015	0.0002	0.0000	0.0148	-0.019	0.0004	0.0000	0.0191	-0.059	0.0035	0.0000	0.0590	0.0637	0.0041	0.0052	0.0637

V18	0.032	0.0010	0.0020	0.0317	-0.040	0.0016	0.0006	0.0397	-0.195	0.0379	0.0179	0.1946	0.2011	0.0405	0.0043	0.2011
V19	-0.050	0.0025	0.0014	0.0503	0.003	0.0000	0.0004	0.0027	-0.270	0.0729	0.0438	0.2701	0.2747	0.0755	0.0193	0.2747
V20	0.025	0.0006	0.0015	0.0254	-0.032	0.0010	0.0002	0.0317	-0.106	0.0112	0.0021	0.1061	0.1136	0.0129	0.0005	0.1136
V21	-0.079	0.0063	0.0044	0.0794	-0.052	0.0027	0.0013	0.0516	0.085	0.0072	0.0212	0.0850	0.1272	0.0162	0.0001	0.1272
V22	-0.022	0.0005	0.0001	0.0222	-0.016	0.0003	0.0000	0.0159	-0.048	0.0023	0.0002	0.0480	0.0552	0.0030	0.0065	0.0552
Total (m)	-0.013	0.094	0.095	0.370	-0.016	0.046	0.059	0.107	-0.061	0.119	0.105	0.270	0.1356	0.1585	0.1132	0.376

Cuadro A16. Residuales y errores en metros para el MDT referenciado con 14 PC.

PUNTOS	X				Y				Z				Plano (X, Y, Z)			
	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}	ME	RMSE	SDE	E _{max}
V1	-0.365	0.1332	0.1260	0.3650	0.036	0.0013	0.0028	0.0360	-0.062	0.0038	0.0004	0.0620	0.3720	0.1384	0.0547	0.3720
V2	0.029	0.0008	0.0015	0.0290	-0.026	0.0007	0.0001	0.0260	0.134	0.0180	0.0471	0.1340	0.1395	0.0195	0.0000	0.1395
V3	-0.027	0.0007	0.0003	0.0270	-0.078	0.0061	0.0038	0.0780	-0.036	0.0013	0.0022	0.0360	0.0900	0.0081	0.0023	0.0900
V4	0.032	0.0010	0.0018	0.0320	-0.068	0.0046	0.0026	0.0680	-0.085	0.0072	0.0000	0.0850	0.1135	0.0129	0.0006	0.1135
V5	-0.038	0.0014	0.0008	0.0380	-0.020	0.0004	0.0000	0.0200	-0.085	0.0072	0.0000	0.0850	0.0952	0.0091	0.0018	0.0952
V6	0.010	0.0001	0.0004	0.0100	0.036	0.0013	0.0028	0.0360	-0.101	0.0102	0.0003	0.1010	0.1077	0.0116	0.0009	0.1077
V7	0.008	0.0001	0.0003	0.0080	-0.056	0.0031	0.0015	0.0560	-0.016	0.0003	0.0045	0.0160	0.0588	0.0035	0.0063	0.0588
V8	0.008	0.0001	0.0003	0.0080	-0.042	0.0018	0.0006	0.0420	-0.075	0.0056	0.0001	0.0750	0.0863	0.0075	0.0027	0.0863
V9	0.149	0.0222	0.0253	0.1490	0.015	0.0002	0.0010	0.0150	0.077	0.0059	0.0256	0.0770	0.1684	0.0284	0.0009	0.1684
V10	0.082	0.0067	0.0085	0.0820	0.069	0.0048	0.0073	0.0690	-0.196	0.0384	0.0128	0.1960	0.2234	0.0499	0.0073	0.2234
V12	0.056	0.0031	0.0044	0.0560	0.021	0.0004	0.0014	0.0210	-0.178	0.0317	0.0090	0.1780	0.1878	0.0353	0.0025	0.1878
V13	-0.013	0.0002	0.0000	0.0130	0.026	0.0007	0.0018	0.0260	-0.146	0.0213	0.0040	0.1460	0.1489	0.0222	0.0001	0.1489
V14	0.008	0.0001	0.0003	0.0080	-0.031	0.0010	0.0002	0.0310	-0.067	0.0045	0.0003	0.0670	0.0743	0.0055	0.0041	0.0743
V15	-0.042	0.0018	0.0010	0.0420	-0.023	0.0005	0.0000	0.0230	-0.072	0.0052	0.0001	0.0720	0.0865	0.0075	0.0027	0.0865
V16	0.007	0.0000	0.0003	0.0070	-0.019	0.0004	0.0000	0.0190	-0.174	0.0303	0.0083	0.1740	0.1752	0.0307	0.0014	0.1752
V17	-0.015	0.0002	0.0000	0.0150	-0.019	0.0004	0.0000	0.0190	-0.079	0.0062	0.0000	0.0790	0.0826	0.0068	0.0031	0.0826
V18	0.032	0.0010	0.0018	0.0320	-0.040	0.0016	0.0005	0.0400	-0.203	0.0412	0.0144	0.2030	0.2094	0.0438	0.0051	0.2094
V19	-0.025	0.0006	0.0002	0.0250	0.007	0.0000	0.0006	0.0070	-0.200	0.0400	0.0137	0.2000	0.2017	0.0407	0.0040	0.2017
V20	-0.024	0.0006	0.0002	0.0240	-0.038	0.0014	0.0005	0.0380	-0.096	0.0092	0.0002	0.0960	0.1060	0.0112	0.0010	0.1060
V21	-0.079	0.0062	0.0047	0.0790	-0.052	0.0027	0.0012	0.0520	-0.025	0.0006	0.0034	0.0250	0.0978	0.0096	0.0016	0.0978
V22	-0.005	0.0000	0.0000	0.0050	-0.048	0.0023	0.0010	0.0480	-0.058	0.0034	0.0006	0.0580	0.0755	0.0057	0.0039	0.0755
Total (m)	-0.010	0.093	0.094	0.365	-0.017	0.041	0.052	0.078	-0.083	0.118	0.086	0.203	0.1381	0.1555	0.0986	0.372

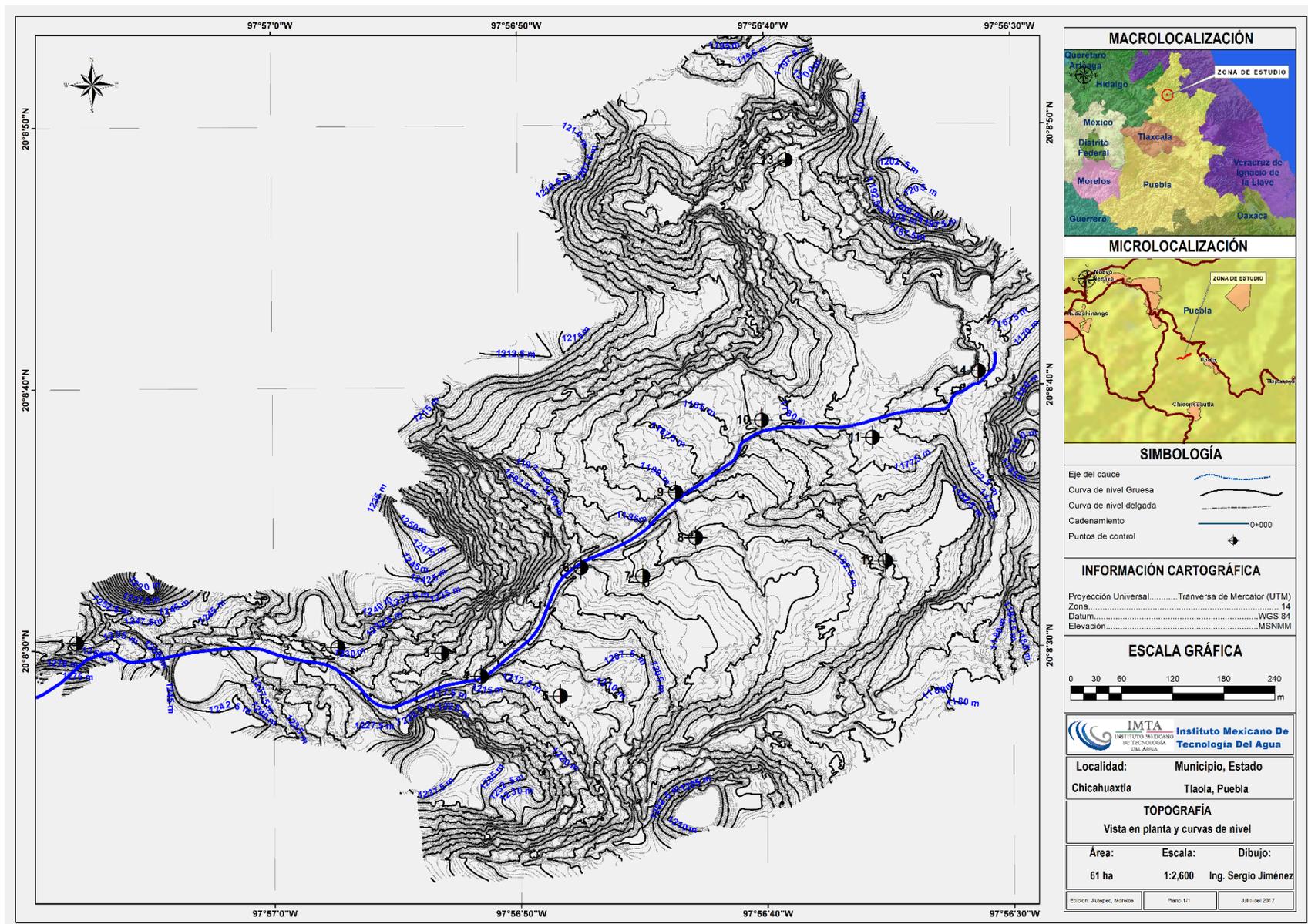


Figura A-2: Plano de vista en planta para el poblado de Chicahuaxtla

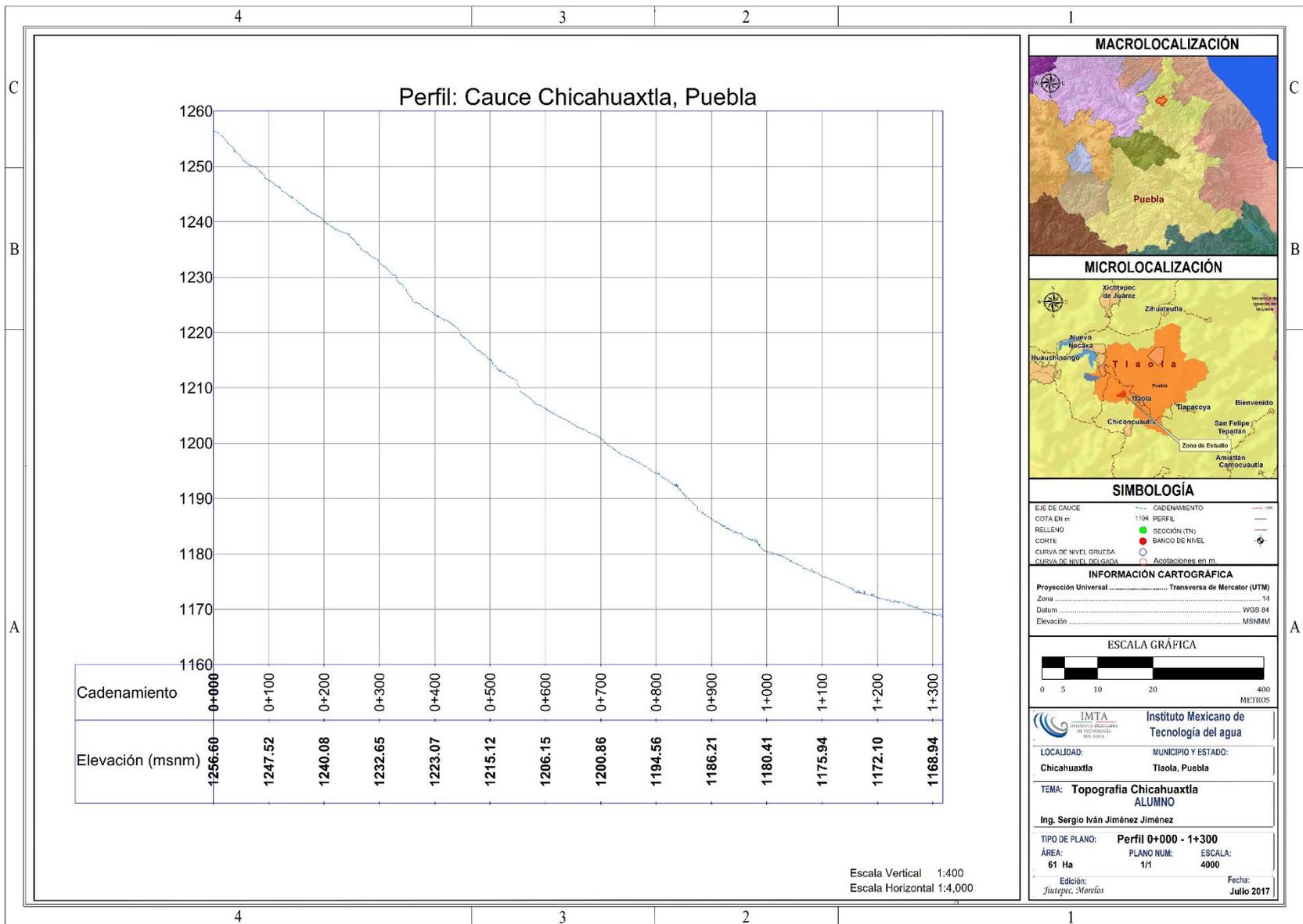


Figura A-3: Plano de vista en perfil para el poblado de Chicahuaxtla