



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DETERMINACIÓN DE ÁREAS DE PELIGROSIDAD POR  
INUNDACIÓN EN BARRIO 18 DE LA DELEGACIÓN  
XOCHIMILCO MEDIANTE IMÁGENES OBTENIDAS CON  
VEHÍCULO AÉREO NO TRIPULADO (VANT) PARA MITIGAR  
DAÑOS**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Geomática**

**P R E S E N T A**

Amalia Elizabeth Macías Rojas

**DIRECTOR DE TESIS**

M.I. Adolfo Reyes Pizano



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024**

# ÍNDICE

## HIPÓTESIS

## OBJETIVO

## INTRODUCCIÓN

### I- ANTECEDENTES

- a. Ubicación geográfica
- b. Descripción geográfica
- c. Cuerpos de agua
- d. Eventos históricos de inundaciones
- e. Crecimiento urbano y uso de suelo
- f. Población y vivienda
- g. Legislación relacionada a los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)

### II- EQUIPO

- a. Estación Total
- b. Receptor para Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS)
- c. Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT)
- d. Software y hardware

### III- APOYO TERRESTRE

- a. Marcas en el terreno
- b. Apoyo horizontal
  - i. Posicionamiento estático rápido relativo
  - ii. Propagación de coordenadas
  - iii. Método Diferencial (DGPS) en Tiempo Real (RTK, por sus siglas en inglés).
- c. Apoyo vertical con Estación Total

### IV- LEVANTAMIENTO CON VANT

- a. Plan de vuelo
- b. Calibración de la cámara

- c. GPS montado en VANT
  - d. Recomendaciones
- V- POST-PROCESO
  - a. Procesamiento de las imágenes obtenidas con VANT
  - b. Modelo Digital de Elevación (MDE).
  - c. Modelo Digital de Superficie (MDS) y Modelo Digital de Terreno (MDT).
  - d. Ortomosaico
- VI- ÁREAS DE PELIGROSIDAD POR INUNDACIÓN
  - a. Análisis hidrológico
  - b. Determinación de las zonas de peligro
  - c. Posibles acciones para la mitigación
- VII- CONCLUSIONES
- BIBLIOGRAFÍA
- GLOSARIO

## **Hipótesis**

En el barrio 18 se inundan debido a que es una zona más baja que la que le rodea.

## **Objetivo**

Desarrollar los estudios topográficos pertinentes que ayuden a conocer y determinar la problemática por la que se generan inundaciones en el área de estudio, con el fin de poder Exponer a la comunidad que habita el Barrio 18 en Xochimilco su situación geográfica que es una de las razones más fuertes por la que prácticamente cada año se han inundado, y proponer algunas medidas para mitigar los daños.

Realizar un proyecto, con aporte social, para demostrar algunos de los conocimientos en Geomática adquiridos.



*Ilustración 1 "Plano General de la Ciudad de México, levantado por el Teniente Coronel de Dragones Don Diego García Conde en el año de 1795 y grabado en 1807 por orden de la misma nobilísima Ciudad". Fuente: (Prieto, 2016)*



*Ilustración 2 Imagen tomada con el satélite Sentinel-2A, fuente: Agencia Espacial Europea (ESA, 2015).*

---

*Hermosa evolución de la cartografía en el mundo.*

---

## Introducción

La topografía es una ciencia y arte antiquísima que busca representar la configuración, forma y extensión de cierta porción terrestre; emerge por la importancia de su función en la vida cotidiana del hombre para cubrir la necesidad de pertenencia territorial lo que ha permitido mantener vivas estas prácticas e implementar nuevas técnicas y tecnologías para minimizar consumo de recursos y obtener información veraz y expedita. La topografía en conjunto con otras disciplinas como la fotogrametría han sido útiles para mejorar técnicas de recolección de datos geográficos, gracias a los avances tecnológicos considerablemente grandes a lo largo de los años, desde la fundación de la fotogrametría digital y ahora la implementación del uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) han venido a revolucionar las técnicas de la fotogrametría aunque nunca la esencia.

Los VANT han sido adaptados para realizar levantamientos topográficos utilizando como bases la fotogrametría y la topografía a una escala donde es posible visualizar mayor detalle; a pesar de ser una tecnología todavía en desarrollo, los productos que se pueden obtener gracias, no sólo a los VANT, sino al software desarrollado para el uso de la fotogrametría y nuevos sensores que hay en el mercado: térmicos, multiespectrales, RGB, tecnología LIDAR, etc. Cuyos sensores abren brecha para realizar Percepción Remota, de hecho, empresas que se dedican al desarrollo de software para imágenes satelitales han creado módulos para procesamiento de imágenes recabadas con drones; tal es el caso de ENVI.

La utilización de los VANT en fotogrametría se ha hecho asequible a los usuarios, se emplea en inspección, monitoreo, actualización de datos y estudios preliminares de algún

proyecto. Es una tecnología prometedora, a fecha de este documento, hace falta desarrollo para lograr la precisión que el topógrafo persigue.

## I. Antecedentes

### a. Ubicación Geográfica.

El barrio 18 forma parte de la alcaldía Xochimilco en la Ciudad de México, se encuentra delimitado por un polígono irregular.



Coordenadas extremas:

19°16'50.56"N, 99° 7'0.19"O

y 19°16'30.08"N, 99° 7'8.94"O

19°17'7.07"N, 99° 6'21.93"O

y 19°16'56.62"N, 99°6'21.54"O

Altitud promedio: 2,232msnm

Colinda al este con la pista olímpica

“Virgilio Uribe”; al norte con un

vaso de regulación; en el oeste se

*Ilustración 3* En rojo se encuentra la colonia Barrio 18 de acuerdo a (GOOGLEMAPS, 2020).

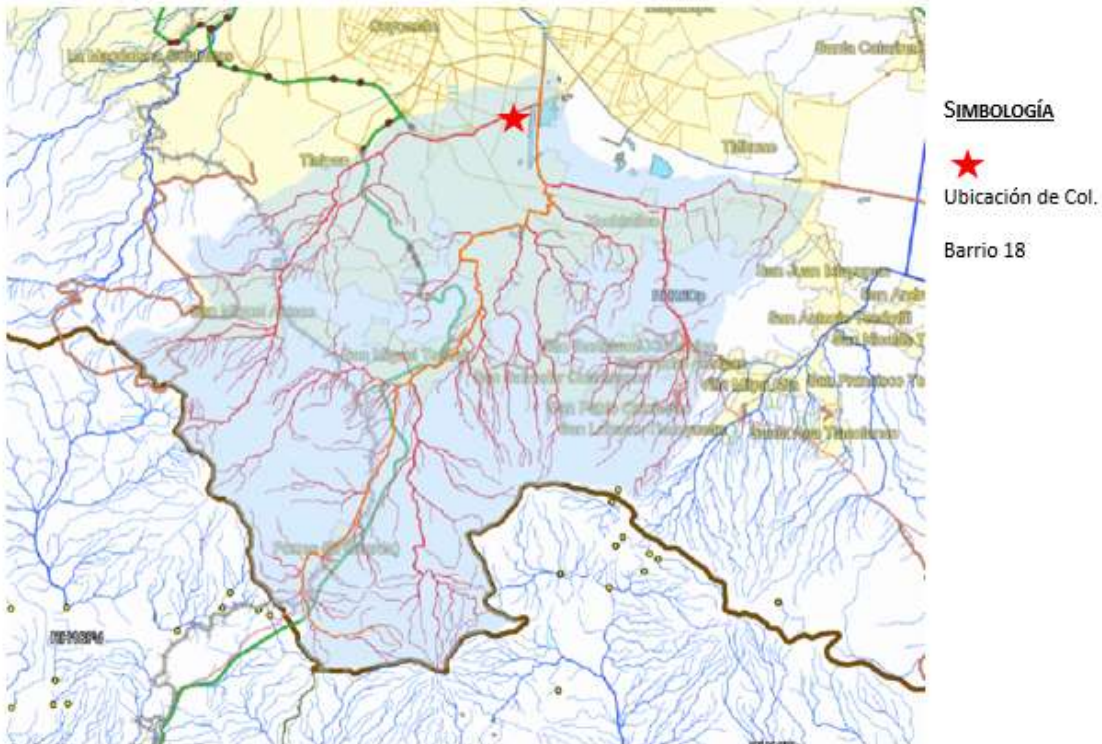
encuentra la colonia San Lorenzo, la Cebada y al sur colinda con la zona chinampera.



***b. Descripción Geográfica.***

La ciudad de México se encuentra ubicada en la cuenca endorreica del Valle de México, que por definición es un terreno llano de nivel más bajo que el que lo rodea, al estar cercado por montañas, de entrada, ya representa un problema bastante notable para la ciudad. Si se hace un acercamiento al sur de un mapa de la Ciudad de México se localiza la delegación Xochimilco, un terreno plano de origen lacustre correspondiente al antiguo lago Xochimilco dentro de esta delegación se encuentra la colonia Barrio 18.

Un mapa con una escala apropiada mostrará la subcuenca colectora del agua que después de precipitar escurrirá por el relieve hasta su salida al noreste del barrio 18 como se describe en la ilustración 4.



*Ilustración 4 Subcuenca que afecta al Barrio 18 (SIATL, 2020).*

*c. Cuerpos de agua.*

El único cuerpo de agua que se encuentra en el Barrio 18 es la pista olímpica “Virgilio Uribe” el agua que la conforma es extraída de los pozos profundos del lago de Xochimilco. Las excavaciones comenzaron en 1967; mide 2,200 metros de longitud por 125 metros de ancho y apenas 2 metros de profundidad. Se encuentra totalmente cubierta por arcilla impermeabilizante de 30 centímetros de espesor según el portal de Edificios de México (EDEMEX, 2020).

*d. Eventos históricos de inundaciones.*

El arquitecto Legorreta (2006) llevó a cabo una completa investigación sobre el agua en la Ciudad de México donde demuestra que en este territorio se tienen registrados eventos de inundaciones desde antes de la llegada de los españoles, cuando gobernaba el quinto rey tlatoani Moctezuma Ilhuicamina pidió consejo a Nezahualcóyotl quien propuso el erguimiento de una cerca de madera y piedra para evitar la inundación a la gran Tenochtitlan siendo funcional hasta la llegada de Hernán Cortés quienes durante las guerras rompieron esa pared de piedras y poco tiempo después la ciudad se vio afectada, éstos al no conocer el lugar e ignorando la hidrografía del mismo siguieron construyendo sin tomar en cuenta el curso natural del agua de la zona, la cual, como era de esperarse, no tardó en buscar su propio cause y en 1553 tenían un desbordamiento del lago de Texcoco, desde entonces se ha intentado mitigar con diferentes obras ingenieriles: Túnel de Huehuetoca y Tajo de Nochistongo; el gran canal de desagüe y el drenaje profundo. Éstos han servido temporalmente pero no han logrado erradicar el problema, lejos de ello, han propiciado inundaciones en la gran metrópoli debido a su crecimiento poblacional, paradójicamente requiere de más agua potable, y ha sido

necesario modificar y ampliar la red de drenaje a lo largo de la historia, si la ciudad continua en ascenso poblacional todavía se requerirá más atención y obras públicas para “contener” el fenómeno natural.

Un factor importante a considerar en las inundaciones es la pavimentación de los que fueran los canales de la ciudad de México, así como sus caminos. Por la poca filtración para recargar el acuífero, como consecuencia, se provocan hundimientos socavones y encharcamientos en diferentes puntos de la ciudad y da pie a socavones debido a que el subsuelo se seca (UNESCO, 2006).

En los mapas antiguos de la Ciudad de México se revela que gran parte de Xochimilco, primitivamente, era un lago. A medida que creció la población en la zona no se optó por pavimentar todo, se fueron creando canales cual si fueran avenidas o calles. En la actualidad, una gran parte de este territorio conserva estos canales contando con 11 embarcaderos.

El barrio 18 que se encuentra dentro de la zona lacustre, ha sido catalogado como zona susceptible de inundación según la Gaceta Oficial del Distrito Federal (GDF, 2005)

*e. Crecimiento urbano y uso de suelo.*

El barrio 18 fue erguido aproximadamente en 1996 (Quintero, 2011) De acuerdo al Programa Delegacional de Desarrollo Urbano (GDF, 2005) existen fraccionamientos clandestinos que se encuentran a las orillas del barrio, sin importar que hayan sido decretadas como áreas de reserva ecológica. Los vecinos reportan que los líderes de los asentamientos irregulares están solapados por la delegación con fines electorales (El Universal, 2013).

Dichos asentamientos se encuentran señalados en la quinta ilustración.



Ilustración 5 Ortomosaico que muestra con un zoom los asentamientos irregulares de la zona. Fuente propia.

Cabe mencionar que el uso de suelo para esta zona es exclusivamente habitacional (h), no obstante, no siempre es respetado.

**f. Población y vivienda.**

Según el XII censo general de población y vivienda 2010 que realiza el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) cada diez años:

Existe un total de viviendas que asciende a 1,851 unidades, de las cuales están habitadas 1,639 traducido a porcentaje: 88.5% de las viviendas se encuentran habitadas.

Tabla 1 Características de viviendas particulares habitadas.

Servicios básicos	Porcentaje de viviendas que cuentan con el servicio
Viviendas particulares habitadas con piso de cemento o firme	90.8%
Viviendas particulares habitadas que tienen luz eléctrica.	92.9%
Viviendas particulares habitadas que tienen disponibilidad de agua entubada	91.7%
Viviendas particulares habitadas que tienen drenaje	91.6%
Viviendas particulares habitadas que tienen excusado	91.4%

Incluye a las viviendas particulares sin información de ocupantes (INEGI, 2010).

La población total que habita en el Barrio 18 a fecha del censo es de 6,083.

Tabla 2 De Población

Población	Porcentaje de población que ronda en el intervalo de edad especificada
Población de 0 a 14 años	20.90%
Población de 15 a 29 años	23.40%
Población de 30 a 59 años	43.30%
Población de 60 y más años	6.20%
Población con discapacidad	1.26%

El 87.6% de la población de la localidad no especificó su edad 2010, INEGI. Se incluye a todas aquellas que no especificaron su edad (INEGI, 2010).

**g. Legislación relacionada a los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)**

Existe una serie de reglamentos y normas que regulan el uso de los Vehículos Aéreos No Tripulados, así como Normas Técnicas para trabajos específicos, el usuario tiene la obligación de conocer esta información.

El 14 de noviembre de 2019 se publicó en el Diario Oficial la Norma Oficial Mexicana NOM-107-SCT3-2019 en la que participa una gran diversidad de instituciones; establece los requerimientos para operar un sistema de aeronave piloteada a distancia (RPAS), como también se conoce a los VANT, en el espacio aeromexicano. Esta información va dirigida tanto a fabricantes, armadores, operadores, importadores y comercializadores, y, no aplica para operaciones militares y vuelos en espacios cerrados.

PESO MÁXIMO DE DESPEGUE		USO	Cumplimiento al Numeral de la presente Norma Oficial Mexicana
Igual o menor a 2 Kg	RPAS Micro	Recreativo	4.10, 4.11 y 5.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 5.1, 5.2 y 8*
Mayor a 2 kg y hasta 25 Kg	RPAS Pequeño	Recreativo	4.10, 4.11 y 6.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 6.2 y 8*
Mayor a 25 kg	RPAS Grande	Recreativo	4.10, 4.11 y 7.1.
		Privado No comercial o Comercial	4.10, 4.11, 7.2 y 8*

Ilustración 6 Clasificación de sistemas de Aeronaves pilotadas a distancia

En la ilustración 6 se muestra la clasificación de acuerdo al peso para poder saber cuáles son los numerales que aplican a cada caso. Por ejemplo, en general:

- Se puede operar a 9.2 Km lejos de cualquier aeródromo
- A 0.9 km lejos de cualquier helipuerto
- Lo principal es mantener la seguridad de todas las personas
- No pilotear en ares prohibidas, restringidas o peligrosas
- Se necesita autorización especial para vuelos nocturnos
- No pilotear más de una aeronave al mismo tiempo
- El operador es responsable del uso que se le de a la información

Se requiere realizar un trámite para obtener la autorización de operador y obtener un folio de registro cuando el vehículo pese igual o más de 250 gr.

## **II. Equipo**

### ***a. Estación total.***

La empresa Trimble sacó al mercado la primer Estación total (ET) en el año 1971, modelo GEODIMETER. La ET ha logrado reemplazar en gran medida al tránsito y teodolito porque es capaz de medir ángulos y distancias con una muy buena precisión en un lapso de tiempo considerablemente más corto en comparación a un levantamiento donde se involucre cinta y cualquier otro instrumento que solo mida ángulos, sin embargo, es necesario señalar que no por haber sustituido a los instrumentos más viejos signifique que son mejores en todo o para todo, es de conocimiento técnico que los teodolitos T2 bien calibrados siguen siendo irremplazables en cuanto a la precisión de ángulos se refiere.

Desde teodolitos electrónicos simples hasta estaciones totales robóticas; con estos instrumentos es posible obtener el cálculo en pantalla en tiempo real. La Estación Total se emplea en trabajos cuyos requerimientos sea conocer con cierta precisión la forma de una porción terrestre y sus medidas (altimétricas y planimétricas), cuya precisión depende del instrumento, sí, pero sobre todo del método y la técnica.

Este instrumento está compuesto<sup>1</sup> básicamente por:

- Instrumento medidor de distancia o distanciómetro
- Componente medidor de ángulo electrónico
- Microprocesador

Las partes que conforman la Estación total son las siguientes:



Ilustración 7 Imagen editada. Fuente: (GEOHIDROTEC, 2020)

<sup>1</sup> Las Estaciones Totales más sofisticadas son robóticas e integradas con GPS.

En este proyecto se utilizó una Estación total de la marca Topcon modelo-gpt3005lw con las siguientes características (GEOHIDROTEC, 2020):

- Precisión Angular: 5"
- Resolución Angular de Pantalla: configurable a 1" a 5"
- Memoria Interna: 8,000 puntos aproximadamente.
- Alcance Longitudinal: Con un Prisma circular 3000 m.
- Alcance Longitudinal sin Prisma: de 1.5 a 250 m
- Largo Alcance Longitudinal sin Prisma : de 5 a 1200 m
- Precisión Lineal con/sin prisma :  $\pm (3\text{mm} + 2\text{ppmxD})$
- Aumento de Anteojo : 30X
- Plomada láser en alidada: Incluida y exclusivo de Topcon.
- Duración de la Batería: Aprox. 8 h
- Peso con Base Nivelante y Batería: 5.10 Kg.
- Alimentación Interna o Externa : Opción Incluida
- Conexión para Libreta Electrónica: Posibilidad de Usar Colector de Datos.
- Temperatura de Operación : -20 a +50 grados

El telescopio es una parte importante de la ET, cuando la estación se encuentra nivelada define la línea de colimación siendo la referencia dentro del telescopio que el observador usa para visar puntos del terreno, conecta el centro óptico del lente “objetivo” y la intersección del punto de mira de la retícula para visar un punto e ingresarlo en su memoria automáticamente o aceptado por el operador. El telescopio puede ser girado y rotado, es decir, en su eje horizontal y su eje vertical para poder apuntar la mira en cualquier azimut con cualquier pendiente resultando esencial para la observación de ángulos.



Las características particulares dependen mucho del modelo y marca de cada Estación Total, en promedio el distanciómetro integrado alcanza hasta 4 km de longitud para ser observada con un prisma que acompaña a la estación o por reflectores ideales para cuando el prisma resulta incómodo, existen en el mercado Estaciones Totales que además de poder utilizar prismas también pueden ser configuradas en modo rebote; la señal enviada regresa después de tocar la primer cosa sólida que se encuentre en su camino.

***b. Receptor para Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS).***

Durante los años 70s nace un nuevo enfoque de la topografía y revoluciona los métodos geodésicos, el Sistema de Posicionamiento Global (GPS). El sistema fue creado por tecnología militar en la época de la guerra fría y fue liberada para uso civil por el presidente en turno Ronald Reagan. Es una tecnología que depende de señales enviadas por constelaciones de satélites, la primera constelación que se desarrolló para posicionamiento fue la llamada GPS, y, tiempo después, otros países desarrollaron sus propias constelaciones. Lamentablemente México no es uno de ellos.

Actualmente, los receptores en el mercado no solo utilizan la constelación GPS y es esa la razón por la que ahora son llamados Receptores GNSS que se caracterizan por tomar en cuenta otras constelaciones (BDS, GLONASS, Galileo, Michibiki, SBAS, etc.) que depende de que el diseñador del equipo las contemple y del lugar donde se realiza el levantamiento debido a que no es posible captar todas las constelaciones porque algunas son locales. El sistema puede operar de día y noche sin importar las condiciones climáticas y no requiere tener línea de visión entre un receptor y otro porque funciona con señales Doppler que son transmitidas desde los satélites que orbitan en el espacio, los cambios de estas señales están en

función de la distancia entre el receptor en tierra y los satélites en órbita y de su dirección de movimiento; con datos precisos de la posición orbital del satélite y la sincronización precisa de las observaciones es posible determinar las posiciones de las estaciones receptoras (Ghilani & Wolf, 2012).

Las partes que conforman el sistema GNSS son las siguientes:

- *El segmento espacial.* Que consiste en una constelación nominal de 24 satélites que se encuentran en órbita a 20,200 km de la superficie de la tierra formando seis planos espaciados a intervalos de 60° alrededor del ecuador con cuatro satélites como repuestos; con el fin de que exista una cobertura satelital de 24 horas.
- *El segmento de control.* Es una estación de monitoreo que se encarga de rastrear las posiciones de cada satélite todo el tiempo, se hacen las correcciones de posición y son cargadas al satélite para que el usuario pueda predecir la posición de los satélites y sus sesgos de reloj.
- *El segmento de usuario.* El equipo del usuario, que es conformado por dos receptores a quienes se les proporciona a través de diferentes frecuencias las señales de los satélites para que calculen la posición y la hora precisa (Ghilani & Wolf, 2012).



Ilustración 8 Imagen que describe los tres segmentos espaciales. Fuente (Suárez, 2020)

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) tiene a su respaldo un receptor GNSS de la marca South, modelo Galaxy G1 con las siguientes especificaciones

(Alfa Topografía, 2017)

- 220 canales, BDS, GPS, GLONASS, SBAS, Galileo, QZSS, WASS, MSAS, EGNOS, GAGAN.
- 1 puerto antena – enlace datos/radio
- Slot SIM card
- Radio interno integrado recibe y transmite 0.5W/2W
- Radio externo transmite 5W y 25W
- Doble módulo bluetooth estándar 4.0 soporta conexión IOS y Android
- 4GB de memoria interna, más de 3 años de observación
- Formato de data diferencial CMR+, CMRx, RTCM 2.1
- Precisión de posicionamiento:

*Tabla 3 Precisión de receptor GNSS*

Código diferencial GNSS	GNSS estático	Red RTK
Horizontal $\pm 0.25$ m + 1ppm	Horizontal $\pm 2.5$ mm + 0.5ppm	Horizontal $\pm 8$ mm + 0.5ppm
Vertical $\pm 0.5$ m + 1ppm	Vertical $\pm 5$ mm + 0.5ppm	Vertical $\pm 15$ mm + 0.5ppm
Precisión SBAS típicamente < 5m 3DRMS	Tiempo real cinemático	Tiempo inicialización RTK: 2 – 8s
	Horizontal $\pm 8$ mm + 1ppm	
	Línea base < 30 km	
	Vertical $\pm 15$ mm + 1ppm	

*Respecto a tres métodos diferentes.*

- Duración de batería 7h (estático); 5h (modo base); 6h (modo rover)

Los componentes de un GNSS básicos son:



Ilustración 8 Estación Receptora GNSS South Galaxy G1. Fuente (SOUTH, 2015)

1 Rover

5 Radio

2 Controladora

6 Radio antena

3 Base

7 Tripie

4 Base para receptor con burbujas

8 Batería

niveladoras

**c. Vehículo Aéreo no Tripulado (VANT).**

Se entiende por Vehículo Aéreo No Tripulado al sistema que es capaz de realizar una misión sin necesidad de una persona que lo monte, sin embargo, se requiere al menos de un humano que controle remotamente el ciclo de vuelo que el robot tenga destinado a efectuar.

Para el uso de topografía hay dos tipos de VANT que se utilizan, teniendo pros y contras a la hora de escoger uno.

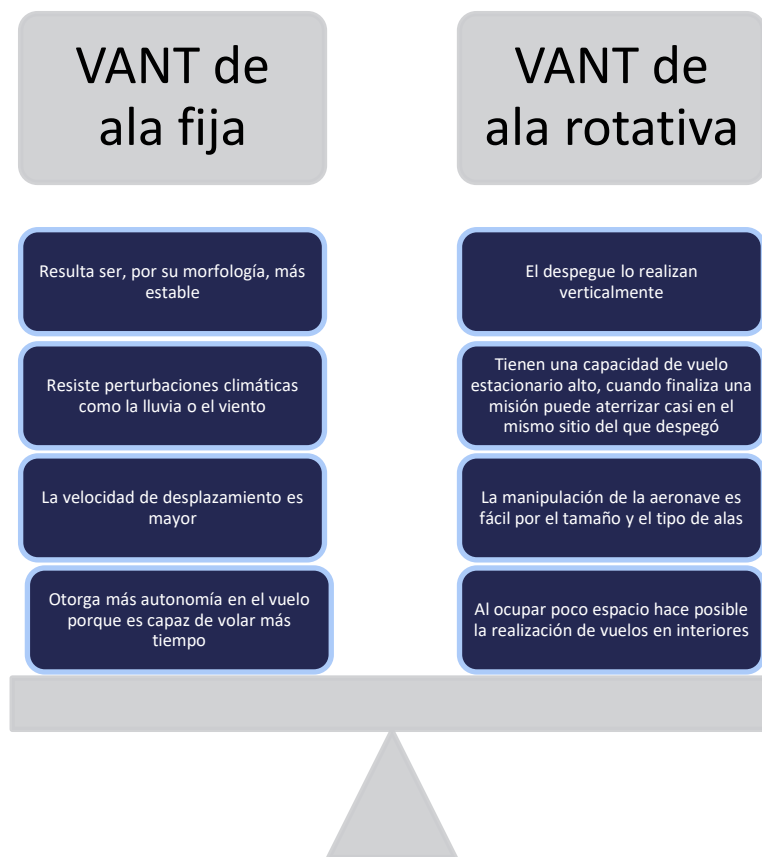


Ilustración 9 Diferencia entre dos tipos de VANT. Fuente: propia.

Aunque el uso del VANT tipo helicóptero no desmerita y se emplea mucho porque además resulta menos costoso que los de ala fija, tomando en cuenta las características generales de ambos, el de ala fija resulta mejor para estudios topográficos de grandes extensiones (Barrientos , y otros, 2007)

En este proyecto se utilizó un VANT de ala rotativa fabricado por DJI de nombre Phantom4 a continuación se hace mención de sus especificaciones.



*Ilustración 10 Fuente (DJI, 2016).*

- Peso total: 1,380 g
- Velocidad de ascenso máximo: 6 m/s
- Velocidad de descenso máximo: 4 m/s
- Velocidad máxima: 72 km/h
- Ángulo de inclinación máximo: 42°
- Altura máxima de servicio msnm 6,000 m
- Resistencia máxima al viento 10 m/s

- Tiempo máximo de vuelo 28 min. Aprox. Vertical  $\pm 0.1$  m con posicionamiento visual o  $\pm 0.5$  m con posicionamiento por GPS
- Rango de temperatura de funcionamiento  $0^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  ➤ Soporte de dispositivos móviles: tableta o teléfono móvil
- Sistemas de posicionamiento por satélite: GPS y GLONASS ➤ Capacidad de batería 5,350 mAh
- Fabricante: DJI ➤ Sensor de cámara de 12.4 pixeles efectivos
- Estabilización de 3 ejes (inclinación, balanceo, desvío) ➤ Tamaño de imagen 4000 x 3000
- Rango de precisión de vuelo estacionario: Horizontal  $\pm 0.3$  m con posicionamiento visual o  $\pm 1.5$  m con posicionamiento por GPS ➤ Sensor 1/2.3" CMOS
- Objetivo FOV  $94^{\circ}$  20 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2.8 enfoque a  $\infty$

#### ***d. Software y hardware.***

Uno de los rubros más importantes es éste, debido a que en la actualidad casi todos los procesos son automatizados se vuelve esencial contar con un ordenador de escritorio o portátil potente, así como programas especializados para el campo de la Geomática. En este apartado se describen los softwares y el hardware que se utilizó para el proyecto haciendo mención a las ventajas y desventajas que tienen estos softwares ante otros.

## *Software.*

### GNSS Solutions.

Es un programa que sirve para la resolución de ambigüedades de datos crudos que se obtienen con receptores GNSS, existen múltiples programas en el mercado, la obtención de uno de ellos varía por el distribuidor donde haya sido adquirido el receptor, normalmente a la compra del equipo GNSS se adquiere adjuntamente un disco con los softwares que requiere para su completa utilización. Los resultados llegan a variar de un programa con respecto a otro, sin embargo, la variación debe ser mínima, siempre y cuando, no se hayan presentado equivocaciones al momento de la toma de datos.

Como dato curioso: hubo un acontecimiento que presencié al realizar esta tesis conocido como “Evento GPS Rollover”; Homeland Security de los Estados Unidos (Homeland Security, 2019) emitió un “Memorándum para uso de propietarios y operadores que utilizan GPS para obtener el “Tiempo Universal Coordinado” (UTC, por sus siglas en inglés) donde se explica por qué se produce la “vuelta al contador” el contador de semanas GPS solamente puede almacenar diez números binarios, es decir, de 0 a 1023 semanas. Este suceso ocurre cada 19.6 años y a la fecha únicamente ha sucedido dos veces. El memorándum revela información que los que nos iniciamos en el mundo del GNSS pudiéramos no conocer. El tiempo GPS se basa en la ponderación promedio de los satélites y los relojes de las estaciones terrestres; un error de nanosegundos de tiempo GPS equivale a 30 cm de error de posición rango, este evento se refiere a el reinicio del contador de las semanas GPS (parámetro WN, por sus siglas en inglés) que es un parámetro de 10 bits con un rango válido de 0 a 1023 semanas y es la razón de las 1024 semanas que se requieren para el



restablecimiento del contador. El documento oficial sugiere la revisión de la dependencia del receptor para obtener el UTC ya que puede presentar problemas y no necesariamente el día 6 de abril porque depende de cómo fue programado por el fabricante, entonces es importante conocer este dato para no realizar erróneamente un trabajo y no poder encontrar la razón del error. En este caso la consecuencia repercutió en la discontinuidad del software GNSS Solutions pues el software ya no es capaz de resolver ambigüedades, el distribuidor proporcionó el nuevo software que lleva por nombre Oficina de Geomática South (SGO, por sus siglas en inglés).

Las ambigüedades de los datos de este proyecto se resolvieron antes de que ocurriera el evento.

#### Pix4Dmapper

Actualmente, existen en el mercado múltiples programas para la manipulación de imágenes recabadas con VANT, éstos se clasifican de acuerdo a las necesidades del usuario; en lo que aquí respecta interesan los softwares con una finalidad cartográfica. Para la elección de un programa cartográfico pueden tomarse en cuenta diversos factores que responden a los siguientes cuestionamientos: ¿Qué tipo de levantamiento cartográfico es el que se va a realizar?; ¿Cuál es el presupuesto destinado al software?; ¿Qué demanda va a tener el programa?; ¿Quién o quiénes lo van a usar?; ¿Qué tan especializado se requiere para el proyecto?

De acuerdo a las referencias de los usuarios existen programas con mejor algoritmo que otros: con más soporte técnico, más amigables para personas que no son especialistas, algunos más baratos con respecto a otros, algunos más especializados que otros, etc.

CENAPRED cuenta con una licencia permanente de Pix4D mapper, esta licencia puede adquirirse por un mes, por un año o de manera perpetua e inclusive es posible descargar una versión de prueba que tiene una duración de 15 días con la que se puede procesar datos y obtener insumos.

. En cuanto a costo es uno de los más altos del mercado, no obstante, ofrece a cambio soporte técnico de calidad, una plataforma amigable y los resultados que se obtienen con este programa son buenos y han ido mejorando en cada actualización. Los programadores se retroalimentan de la experiencia y pruebas de la multitud de usuarios profesionales quienes manifiestan sus inquietudes e ideas ayudando a mejorar la tecnología y las técnicas.

Los requerimientos del hardware para utilizar este software dependen del número de imágenes que se tengan por procesar (PIX4D, 2011):

- Windows 7, 8, 10, Server 2008, Server 2012, 64 bits
- CPU (Intel i5/ i7/ Xeon) recomendado
- Cualquier GPU que sea compatible con OpenGL 3.2. (Tarjeta gráfica integrada Intel HD 4000 o mayor).
  - Para proyectos pequeños (menos de 100 imágenes de 14 MP): 4 GB RAM, 10 GB HDD de espacio libre
  - Proyectos medianos (entre 100 and 500 imágenes de 14 MP): 8 GB RAM, 20 GB HDD de espacio libre
  - Grandes proyectos (entre 500 and 2000 imágenes de 14 MP): 16 GB RAM, 40 GB HDD de espacio libre

- Proyectos más grandes (arriba de 2000 imágenes de 14 MP): 16 GB RAM, 80 GB HDD de espacio libre

### ArcMap

Es una plataforma para crear, visualizar, explorar, organizar, analizar, procesar datos y generar Sistemas de Información Geográfica (SIG). El software es muy amigable, así como eficiente, y CENAPRED cuenta con licencias para las máquinas en las que trabaja el personal dedicado al SIG. En caso de no contar con una licencia (dado que son caras), existen en el mercado programas de uso libre como QGIS, el cual, de acuerdo al reporte de los usuarios, es una plataforma eficiente porque constantemente retroalimentan y ayudan al mejoramiento y mantenimiento de éste.

### *Hardware.*

A pesar de que las imágenes recabadas con VANT son menos pesadas que las obtenidas con aeronaves tripuladas es indispensable tener a la mano un computador potente, dependerá del número de imágenes con las que cuente el proyecto.

En este proyecto son 517 imágenes; es un tipo “proyecto grande”, en las recomendaciones del software (página anterior) se hace mención a estas especificaciones mencionando que se requiere al menos 16 GB RAM, 40 GB HDD de espacio libre.

Según lo recomendado por el soporte técnico de Pix4D el ordenador que se utilizó para este proyecto fue de 32GB de RAM con 60 GB HDD de espacio libre.

### **III. Apoyo terrestre**

#### ***a. Marcas en el terreno***

En principio la fotogrametría siempre ha utilizado, sin posibilidad de omisión, apoyo terrestre para las fotografías y/o imágenes, tanto para corregir errores como para dar referencia a las mismas, por principio, en terrenos accidentados es imperante cuidar en dónde se colocan marcas y el número de éstas.

Las marcas en el terreno deben ser lo suficientemente grandes para visualizarse sin confundirse en la imagen y contrastantes para poderla encontrar con facilidad, aunado a esto, es imprescindible que la brigada topográfica, encargada de marcar y tomar los datos del terreno, haga una memoria fotográfica en campo de más de un ángulo de visión de cada marca con un número de identificación para evitar equivocaciones en gabinete, estas marcas serán los Puntos de Control (PC) para el trabajo y deben ser perfectamente identificables en las imágenes.

En el caso de este proyecto se pintaron las marcas con un molde y pintura de aceite Como se muestra en la ilustración 11.



*Ilustración 11* Marca en terreno que simboliza el Punto de Control Nº. 1. Fuente: propia.

El tipo de marca, es decir, la forma de la marca puede variar. En este caso fueron dos triángulos equiláteros encontrados por uno de sus vértices. Se pintaron directamente en el piso con aerosol en lugares donde fue posible porque a veces fue más fácil pintarlas con brocha debido al tipo de suelo o con cal en lugares como tierra o pasto, sin embargo, está en función de la creatividad; muchas veces se ponen lonas con marcas impresas para darle más de un uso o porque en ciertos lugares no está permitido rayar, es importante fijarlas.

Para saber el tamaño que deberán tener estas marcas se toma en cuenta la distancia de muestreo (GSD, por sus siglas en inglés)<sup>2</sup>

Si el GSD que se requiere según los alcances del proyecto es de 5 cm, entonces, se entiende que el pixel representa 5 cm x 5 cm en el terreno, sin embargo, en un solo pixel es imposible reconocer la marca, si en cambio se junta el área de 4 pixeles, por ejemplo, será más fácil visualizarla como un punto en la imagen. Este ejercicio resulta importante porque también cabe la posibilidad de pintar una marca demasiado grande que cuando se realice el proceso de georreferenciación la marca podrá verse tan grande que se vuelve impreciso localizar el centro de la marca, básicamente es un tema de escalas.

#### ***b. Apoyo horizontal.***

El apoyo horizontal se realizó con un receptor GNSS de la marca South para obtener una georreferenciación precisa de las imágenes que se han obtenido con el VANT, utilizando el método de posicionamiento estático rápido relativo y el método de Posicionamiento en

---

<sup>2</sup> Véase capítulo IV, inciso a., punto 1: Cálculo del GSD y altura de vuelo

Tiempo Real (RTK por sus siglas en inglés). A continuación, se describen cada uno de los métodos.

*i. Posicionamiento estático rápido relativo.*

Es un sub-método del Posicionamiento estático relativo que consiste en la utilización de técnicas para la rápida resolución de ambigüedades, para una mejor precisión y minimización de tiempos es preferible contar con receptores de doble frecuencia y una muy buena geometría satelital. El procesamiento de un vector de línea base requiere que las fases se observen simultáneamente en ambos puntos de la línea base. Originalmente, el posicionamiento relativo solo era posible mediante el procesamiento posterior de los datos.

Es indispensable una vista relativamente libre al cielo de los puntos que interesan levantar para que la señal de los satélites sea óptima a los receptores. Se trata de recabar datos crudos de satélites en órbita con uno o más receptores por un cierto periodo de tiempo que está en función de la longitud de la línea base, esto es, la distancia que existe entre el receptor centrado en el punto por asignar coordenadas y el receptor fijo de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) del INEGI; como mínimo se requieren 4 satélites visibles a la hora de observación.

Si la línea base entre los observadores es menor a 20 Km se pueden lograr precisiones milimétricas según la U. S. Federal Geodetic Control Subcommittee (FGCS, por sus siglas en inglés). El receptor debe permanecer recibiendo datos crudos 10 minutos como mínimo y en condiciones excelentes, siempre y cuando la línea base no exceda 20 Km con posibilidad de añadir 1 o 2 minutos por kilómetro adicional, si las mejores condiciones no se cumplen al

momento de medición será necesario compensar con tiempo en sitio (Hofman-Wellenhof, Lichtenegger, & Collins, 1997).

Con el fin de minimizar errores y evitar volver a campo por falta de datos precisos, se realizó un levantamiento de una línea base dentro del Barrio 18 en las siguientes localizaciones, que fueron los puntos más libres a los que se tuvo acceso:



*Ilustración 12 Bases señaladas con un ancla color azul, terreno plano. Imagen editada extraída de (Google Earth, 2020).*



*Ilustración 13 Configuración de la "Base 1"*

Se dejaron los receptores recolectando datos crudos aproximadamente dos horas porque la zona es plana y los mejores claros tienen vegetación alta, aunque no densa, posteriormente en gabinete se realizó el post-proceso para obtener las coordenadas precisas.

Parámetros de entrada al software GNSS Solutions:

- Sistema de referencia WGS 84
- Zona horaria (UTC-06:00) Guadalajara, Ciudad de México, Monterrey
- Unidades en metros
- Efemérides precisas que el software descarga de internet automáticamente del archivo 000000000000000000 (CDDIS, por sus siglas en inglés)

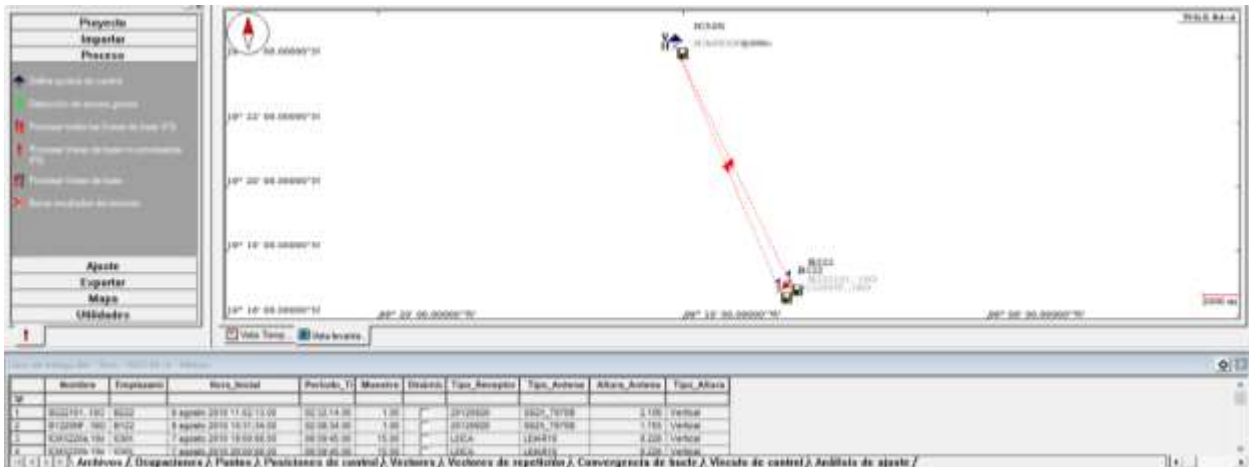


Ilustración 14 Ingreso de datos crudos de dos receptores que se encuentran unidos por un vector indicando que recabaron información con tiempo traslapado. El punto de control está representado con un triángulo azul, las banderillas son los receptores. Fuente propia.

En la ilustración 14 se establece el punto de control, para este caso se ha seleccionado de la lista que provee INEGI el de Ciudad de México por su cercanía con los puntos tomados para los que es necesario fijar coordenadas.

El post-proceso es relativamente simple, la interfaz del software lleva de la mano al usuario entendido del tema; se establece el punto de control (no confundir estos puntos de



control con los que más adelante se especificarán para el post-proceso de las imágenes recabadas con VANT). Las antenas fijas conocidas en conjunto como RGNA, véase ilustración 15, están almacenando datos las 24 horas del día desde 1993 las coordenadas resultado son muy precisas y se consideran fijas. De su mantenimiento y registro de información se encarga INEGI, y, es en su plataforma, donde se descargan los datos de estas antenas de acuerdo a la hora y el día en que se mantuvo a los receptores acumulando datos de satélites.



Ilustración 15 Recuadros grises señalan la RGNA. Fuente: (INEGI, 2020)

Se obtuvieron los siguientes resultados después del post-proceso:

<b>Puntos registrados</b>				
Nombre	Componentes		95% Error	Estado
B122	Long.	99° 06' 50.20949"W	0.004	Ajustado
	Lat.	19° 16' 46.32983"N	0.003	Ajustado
	Altura elipse	2227.241	0.006	Ajustado
	Descripción	B122		
B222	Long.	99° 06' 29.89027"W	0.004	Ajustado
	Lat.	19° 17' 02.00356"N	0.003	Ajustado
	Altura elipse	2226.559	0.006	Ajustado
	Descripción	B222		

Ilustración 16 Coordenadas de las bases 1 y 2 ajustadas utilizando el software GNSS Solutions. Fuente: Informe arrojado por GNSS Solutions.

El programa entrega latitud, longitud y altura sobre el elipsoide, no obstante, se requiere conocer la altura ortométrica, es preciso un geoides.

Geoide Gravimétrico Mexicano 2010 (GGM10).

El Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2020) cuenta con un archivo tipo raster de 2.5 minutos de arco en su resolución (4.5 km aprox.), los valores del GGM oscilan entre -48 y 6 metros en relación al elipsoide de referencia. En comparativa con otros modelos como EGM96, MEX97, GGM06, EGM2008, el GGM10 resulta ser mejor por su alta resolución y exactitud que ha ido mejorando con relación a otras versiones del mismo. Está asociado al marco de referencia oficial vigente ITRF08, época 2010.0

La exactitud absoluta está estimada en 20 cm (error medio cuadrático) con variaciones regionales.

El receptor GNSS proporciona la altura sobre el elipsoide o altura geodésica ( $h$ ) y conociendo la altura geoidal u ondulación del geoide ( $N$ ) se puede calcular la altura ortométrica ( $H$ ) como se puede ver en la siguiente ilustración.

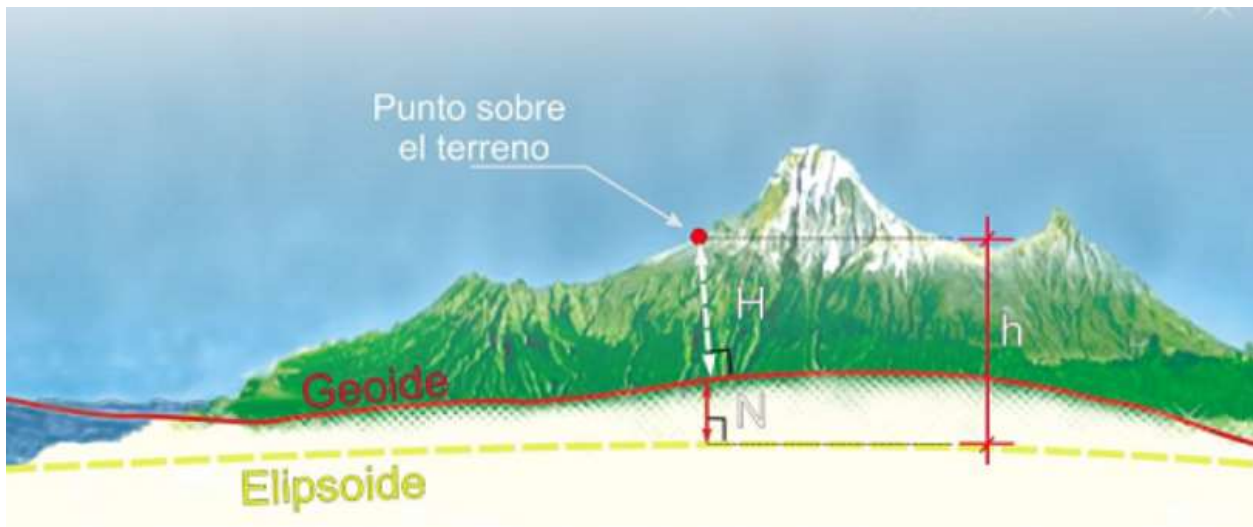


Ilustración 17 Fuente: (INEGI, 2020).

INEGI pone a disposición una plataforma donde es posible calcular la altura ortogonal de cualquier punto, una lista de puntos o toda una malla de puntos, también se puede descargar un software para los mismos fines si el trabajo es copioso. Las alturas ortogonales de las bases en cuestión son las siguientes:

Para “BASE1”: 2,232.57 msnm

Para “Base2”: 2,231.84 msnm

Hasta este apartado se ha completado el método de posicionamiento estático rápido relativo, se obtuvieron las tres coordenadas de cada una de las bases establecidas en campo. Más adelante se retomarán estos datos.

Mucho se ha hablado de que la precisión de los Puntos de Control (PC) para las imágenes que se obtienen con VANT mejoran cuando se realiza un levantamiento con Estación Total en comparación con un levantamiento RTK pero usando ésta no se ahorra tiempo ni recursos, además, es de súbita importancia conocer cómo es que debería realizarse ese levantamiento; utilizar el método de propagación de coordenadas se vuelve un absurdo por la baja precisión que se alcanza. Para un cierre de poligonal con este método es muy difícil y muy poco probable que se alcance la tolerancia permitida.

Con fines demostrativos se presenta a continuación un levantamiento por el método de propagación de coordenadas para determinar la precisión y sostener lo que se enunció anteriormente.

ii. *Propagación de coordenadas.*

Método poco preciso que proporciona coordenadas del punto al que se visa con respecto de las coordenadas de origen que proporciona el usuario. La máquina calcula con trigonometría las coordenadas del punto donde se encuentra el prisma con el ángulo horizontal y el vertical, así como la distancia calculada por el tiempo que tarda en regresar el láser que es enviado al prisma, a través de la relación física de velocidad por tiempo, sin embargo, este método tiene el inconveniente de que es imposible conocer, ya estando en gabinete, cuáles son los errores de los puntos levantados (Abreco, 2019). Ejemplo:

Por el método de propagación de coordenadas se obtuvieron los siguientes puntos:

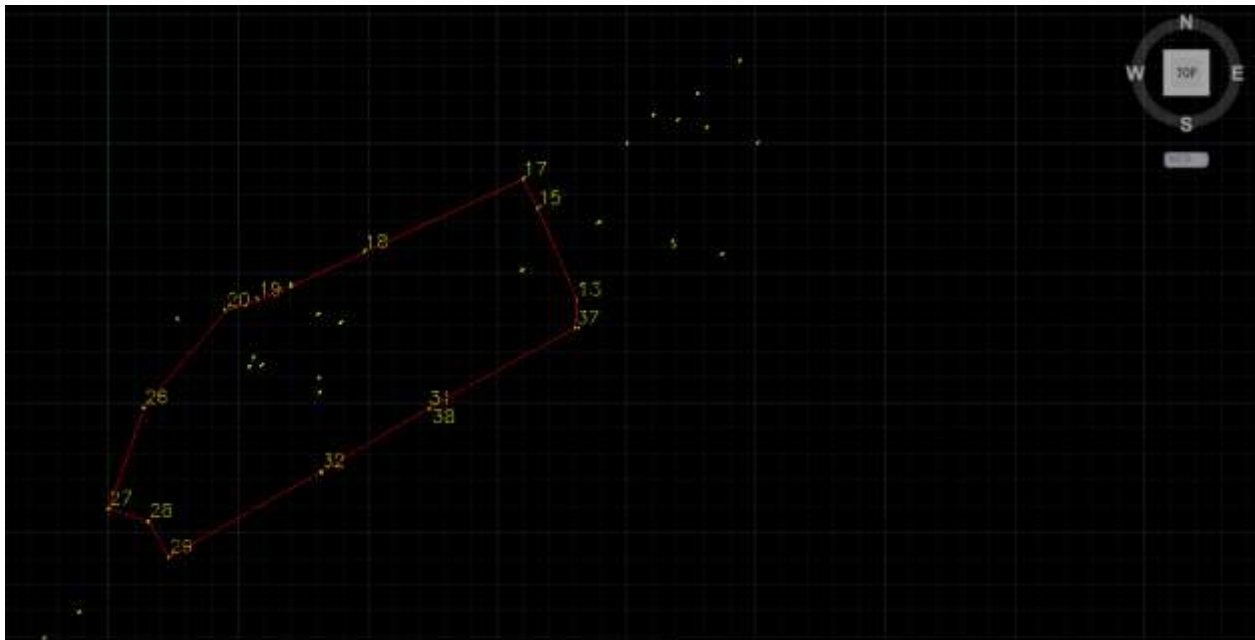


Ilustración 18 Visualización de Archivo CAD de poligonal creada por las coordenadas de la tabla 4. Fuente propia.

Tabla 4 Puntos de Estación total.

ID	X	Y	Z
1	1000	3000	100
2	1051.377	3054.551	99.197
3	1097.798	3045.283	99.026
4	1252.085	3000.897	99.084
5	1135.868	3095.419	98.88
6	1217.918	3159.105	99.709
7	1254.898	3271.79	99.17
8	1154.477	3030.921	99.885
9	1088.291	2810.508	99.177
10	1089.447	2800.041	99.258
11	1182.766	2784.86	99.597
12	944.539	2846.511	99.057
13	904.654	2698.144	99.099
14	912.579	2727.62	99.159
15	828.091	2874.973	98.962
16	796.304	2754.103	99.095
17	799.943	2931.551	98.674
18	493.172	2790.287	98.948

19	287.361	2698.763	99.102
20	226.178	2677.668	99.38
20.5-	133.4832	2660.8785	103.794
21	278.652	2586.736	98.961
22	269.222	2567.218	99.09
23	293.379	2571.432	98.922
24	403.527	2546.402	99.168
25	405.373	2518.144	99.875
26 Base 1	68.402	2490.693	99.695
27	-0.477	2295.386	100.449
28	77.026	2271.196	99.71
29	115.865	2202.412	100.088
30	-59.583	2093.794	101.4
31-	617.206	2488.954	99.326
32	409.714	2367.128	99.72
33	-126.697	2043.692	101.7
34	351.986	2724.143	99.3
35	402.499	2670.248	99.19
36	446.257	2653.127	98.919
37	901.416	2644.228	99.207
38	617.1888	2489.1661	99.423

Los números coloreados en verde son los vértices que conforman la poligonal cerrada, los de color cian son los PC RTK (página 39 tabla 6) y los renglones en amarillo son las coordenadas iniciales y finales de la poligonal. Fuente propia.

Coordenadas arbitrarias.

Haciendo una comparativa de coordenadas entre el punto 31 y el 38 se tienen las siguientes coordenadas:

ID	x	y	z
31	617.206	2,488.954	99.326
38	617.1888	2,489.1661	99.423

Diferencias: X: 0.0172; Y: 0.2121 Z: 0.097

Como puede observarse, existen errores que llevan a que los valores de los puntos 31 y 38 no tengan las mismas coordenadas, sin embargo, se generará una regresión de cálculos con las coordenadas conocidas para llegar a un cuadro de construcción y poder trabajar con ángulos y distancias, para determinar cuál es la precisión que se logró.

A continuación, se muestra el cuadro de construcción que se obtuvo con regresión de cálculos a través de fórmulas para conocer rumbos y distancias.

Tabla 5 Cuadro de construcción de poligonal de apoyo.

Vértice	Coordenadas		Diferencia entre coordenadas		Distancia	Estacion	PV	Rumbos	Dirección	Proyecciones sin corregir				Correcciones				Proyecciones corregidas				Vértice	Rumbos corregidos	Coordenadas					
	x	y	x	y						N	S	E	W	y	x	N	S	E	W	x	y								
31	617.206	2488.954				31	32	1.03988943	SW	*	121.826	*	207.492	0.01772162	0.001971443	*	121.843722	*	207.490029	31	1.03980402	617.206	2488.954						
32	409.714	2367.128	207.492	121.826	240.612768	32	29	1.05989214	SW	*	164.716	*	293.849	0.02396069	0.002791947	*	164.739961	*	293.846208	32	1.0598106	409.714	2367.128						
29	115.865	2202.412	293.849	164.716	336.865842	29	28	0.51402246	NW	68.784	*	*	38.839	0.01000578	0.000369021	*	*	38.838631	29	0.51428002	115.865	2202.412							
28	77.026	2271.196	38.839	-68.784	78.9918134	28	27	1.26826047	NW	24.19	*	*	77.503	0.00351884	0.000736379	24.1864812	*	*	77.5022636	28	1.26830587	77.026	2271.196						
27	-0.477	2295.386	77.503	-24.19	81.1903388	27	26	0.33905182	NE	195.307	*	68.879	*	0.02841066	0.00065444	195.278589	*	68.8796544	*	0.33946405	-0.477	2295.386							
26	68.402	2490.693	-68.879	-195.307	207.096936	26	20	0.7009039	NE	186.975	*	157.776	*	0.02719863	0.001499077	186.947801	*	157.777499	*	0.70107627	68.402	2490.693							
20	226.178	2677.668	-157.776	-186.975	244.648558	20	19	1.23877464	NE	21.095	*	61.183	*	0.00306862	0.000581318	21.0919314	*	61.1835813	*	1.23882479	226.178	2677.668							
19	287.361	2698.763	-61.183	-21.095	64.7175286	19	18	1.15235923	NE	91.524	*	205.811	*	0.01331369	0.001955471	91.5106863	*	205.812955	*	1.15242392	287.361	2698.763							
18	493.172	2790.287	-205.811	-91.524	225.243891	18	17	1.13925587	NE	141.264	*	306.771	*	0.0205492	0.002914722	141.243451	*	306.773915	*	1.13932285	493.172	2790.287							
17	799.943	2931.551	-306.771	-141.264	337.73357	17	15	0.46165191	SE	*	56.578	28.148	*	0.00823021	0.000267443	*	56.5862302	28.1482674	*	0.46135944	799.943	2931.551							
15	828.091	2874.973	-28.148	56.578	63.1931957	15	13	0.40860831	SE	*	176.829	76.563	*	0.02572273	0.000727448	*	176.854723	76.5637274	*	0.40827222	828.091	2874.973							
13	904.654	2698.144	-76.563	176.829	192.692471	13	37	0.05998434	SW	*	53.916	*	3.238	0.00784298	3.07652E-05	*	53.923843	*	3.23796923	13	0.05751125	904.654	2698.144						
37	901.416	2644.228	3.238	53.916	54.0131438	37	38	1.07137129	SW	*	155.0619	*	284.2272	0.02255634	0.002700527	*	155.084456	*	284.224499	37	1.07129193	901.416	2644.228						
38	617.1888	2489.1661	284.2272	155.0619	323.773523	38															38								
SUMATORIAS					2450.77358						729.139	728.9269	905.131	905.1482			729.032935	729.032935	905.1396	905.1396			617.206	2488.954					
31=38																													
										Error en Y	0.2121	Error en X	-0.0172																
										Corrección en Y	0.00014547	Corrección en X	9.5013E-06			0.11390841	0.098191592												
										Error Total	0.21279626																		
										Precisión	8.6828E-05																		
										Precisión	1:11,517																		

Obtenida con estación total Topcon modelo-gpt3005lw

Con los datos que se obtienen con este método es posible llegar a obtener un cuadro de construcción como se muestra en la tabla 5 sin posibilidad de corregir datos y compensar con teoría de los errores porque no se conocen los ángulos y las distancias de cada punto. La precisión se calcula dividiendo el Error Total de la poligonal de apoyo entre el perímetro de la misma, de acuerdo a los resultados obtenidos la precisión que se tiene es 1: 11,517 lo que se traduce como que en 11,517 metros hay un error de 1 metro. Recordando que con una Estación Total se puede llegar a una precisión de 1:50,000 es apreciable que, a pesar de que estos datos funcionan como puntos de control para imágenes con VANT, en realidad sólo se trabaja y se gasta más porque la precisión resultada no es mejor en X y Y. Como se hizo mención anteriormente, este procedimiento es meramente con fines educativos. Es posible conseguir una precisión más alta, se requiere de un método más serio que permita realizar una corrección con “propagación

de los errores” este método se conoce como: Series de Bessel, entonces los resultados obtenidos con este método darían más fiabilidad a los puntos de control (Anderson, Mikhail y Martínez, 1988).

Así es como se llega a la conclusión de que lo más viable para realizar el apoyo terrestre es realizarlo con RTK, método descrito a continuación.

*iii. Método Diferencial (DGPS) en Tiempo Real (RTK por sus siglas en inglés).*

Es una técnica donde pueden emplearse dos o más receptores; un receptor funge como base estacionaria y se encarga de dar posición a otro receptor. Cuatro satélites comunes deben ser rastreados simultáneamente para que con las coordenadas conocidas de la base se calculen las correcciones a las pseudodistancias del móvil y por medio de señal de radio sean transmitidas de la base al móvil permitiendo un cálculo más preciso en tiempo real, esto lleva apenas unos segundos cuando hay buena señal (Ghilani & Wolf, 2012).

Utilizando las coordenadas fijas de la “Base1” se coloca el receptor que se encargará de permanecer en el punto con coordenadas conocidas y poder corregir las coordenadas del receptor móvil<sup>3</sup>

Este método es más rápido en comparación con la Estación Total (porque no hay que ligar atrás un punto para orientar a otro, cada punto es diferente. Su principal deficiencia es la imposibilidad para calcular el error y propagarlo de tal forma que se compense porque cada punto es independiente, no obstante, su precisión es lo suficientemente buena para cierto tipo de proyectos.

---

<sup>3</sup> Véase ilustración 13, página 31



Si se realiza un levantamiento con ET con el método de “Series de Bessel o corrigiendo la Z de los PC de GNSS con nivel fijo, es posible tener una precisión milimétrica y las imágenes prácticamente tomarían la forma del levantamiento realizado con estos instrumentos pero pierde sentido porque se estarían realizando dos levantamientos y esto encarece el proyecto y lo vuelve tedioso, por eso es importante que se conozcan los alcances de los VANT que nunca sustituyen la topografía fina realizada con instrumentos más precisos. La idea es que el apoyo terrestre sea lo más simple y preciso posible.

En la siguiente tabla se presentan los PC obtenidos con Receptor GNSS a través del método RTK.

*Tabla 6 Puntos de Control RTK, Barrio 18*

ID Empate con ET	Norte	Este	Altura sobre el elipsoide	Descripción	Altura ortogonal
4	2132244.82	488872.51	2226.294	PC2	2231.58
16	2131997.71	488417.708	2226.28	PC8	2231.61
17	2132175.04	488421.273	2225.884	PC6	2231.22
36	2131896.74	488067.875	2226.185	PC12	2231.52
31	2131733.03	488238.759	2226.617	PC10	2231.95
33	2131287.42	487495.991	2229.077	PC16	2234.41
20.5	2131871.02	487732.198	2226.867	PC18	2232.2

*Coordenadas en UTM. En color cian se muestran los números de la tabla 4, se colorearon del mismo tono para identificar que son los mismos puntos tomados con diferentes instrumentos y técnicas.*

***c. Apoyo vertical con Estación Total.***

Como es sabido en el gremio de la geodesia, la coordenada Z obtenida con un receptor GNSS no es fiable, a menos que se corrija con la Red Geodésica Nacional Pasiva. La sentencia anterior se sustenta explicando el principio teórico; dado que para medir es absolutamente necesario acoplar a una figura geométrica conocida como “elipsoide de referencia” o DATUM que define el sistema de coordenadas geográfico, haciendo sobre éste las mediciones del instrumento, aunado a ello, se considera otro modelo conocido como

geoide que está compuesto por medidas gravitacionales de muestras recabadas en diferentes puntos terrestres, buscando representar la verdadera forma del Geoide. A todo esto, se le pueden sumar errores sistemáticos y humanos lo que lleva a que la coordenada Z pueda variar hasta 4 metros.

En este proyecto no fue posible, por tiempo, realizar el arrastre de la Red Nacional Pasiva para corregir la Z del levantamiento RTK. Para obtener el Modelo Digital de Terreno y hacer su posterior análisis hidrológico se consideró la importancia de que la Z sea lo más parecida a la realidad, razón por la cual fue tomado el valor de la cota que se obtuvo con ET, porque en este trabajo resultó ser más fiable en cuanto a los desniveles de un punto con respecto a otro.

La lista de Puntos de Control empleados para el post-procesamiento de las imágenes es la que sigue:

*Tabla 7 Lista de Puntos de Control*

ID Empate con ET	Y (m)	X (m)	Z (m)
<b>4</b>	2132244.82	488872.51	2231.547
<b>16</b>	2131997.71	488417.708	2231.558
<b>17</b>	2132175.04	488421.273	2231.189
<b>36</b>	2131896.74	488067.875	2231.465
<b>31</b>	2131733.03	488238.759	2231.797
<b>33</b>	2131287.42	487495.991	2234.454
<b>20.5</b>	2131871.02	487732.198	2232.360

*Coordenadas en UTM.*

#### IV. Levantamiento con VANT

Un levantamiento con VANT es el conjunto de procedimientos para la extracción de datos topográficos de una zona específica a través de la toma de imágenes que posteriormente se ortorectifican<sup>4</sup> procediendo a la creación de modelos de elevación. La precisión con la que se cuenta es centimétrica. Para trabajos que no demandan una alta precisión como es el caso de pre-proyectos, es correcto el empleo de estos dispositivos siendo importante la elección del VANT que mejor se adapte, ya que existen en el mercado algunos que son mejores para fines cartográficos como se ha mencionado en el capítulo II inciso c.

Esta tecnología facilita la realización de un trabajo con imágenes aéreas, a diferencia de la secuencia de pasos que había que hacer cuando se utilizaba la fotogrametría analógica<sup>5</sup>. A pesar de ser instrumentos módicos es importante la planificación del vuelo con VANT.0

##### *a. Plan de vuelo.*

La realización de un Plan de vuelo es de carácter imperativo para calcular el costo de vuelo y realizarlo de manera correcta, importante para la calidad de las imágenes que se obtienen.

---

<sup>4</sup> El concepto se encuentra en el artículo 3 fracción XXVI de la Norma Técnica para Levantamientos Aerofotográficos con Cámara Digital (SEGOB, 2016). El producto es una ortoimagen en la cual han sido removidos los desplazamientos causados por la inclinación de la cámara o sensor, el relieve y la curvatura terrestre. Está referida a una proyección cartográfica, por lo que posee las características geométricas de un mapa, además de la calidad pictórica de los insumos originales. Se puede alcanzar una precisión centimétrica todavía no tan buena como la fotogrametría tripulada.

<sup>5</sup> No así con la fotogrametría digital porque ésta no ha sido reemplazada todavía por los VANT que se conocen hasta ahora. Vale la pena comentar que la empresa francesa AIR BUS DEFENCE creó lo que ellos llaman un “drone solar” que funge como satélite en la estratosfera y puede tomar imágenes hasta 15 días seguidos, este instrumento, al ejecutar su vuelo a 20 km sobre una superficie de referencia con una resolución de 10 y 20 cm por pixel.

En este apartado se recordará cómo se genera un plan de vuelo y cuáles son las diferencias o los pasos equiparables entre el que se plantea con VANT y el que se realiza en un vuelo tripulado.

Antes de ir a campo es importante señalar, en algún mapa digital donde sea posible observar la topografía, a grandes rasgos, el área de estudio e indicar al especialista Geomático los fines del proyecto para que así quede mejor definido el GSD (Distancia de muestreo, por sus siglas en inglés) y el cálculo de la altura de vuelo.

Las variables a considerar en la planificación de un vuelo fotogramétrico son las siguientes:

- 1.- Cálculo del GSD y altura de vuelo.

Cuando se hacía fotogrametría analógica el plan de vuelo tenía que considerar muchas variables por el hecho de que iba montada una cámara métrica en un avión o avioneta y que a esta cámara métrica se le podía mover la distancia focal, además se consideraba previamente la escala a la que se requerían esas fotografías para así calcular la altura de vuelo, es decir, están relacionadas la escala de fotografía, la distancia focal y la altura de vuelo. Por supuesto, esta relación sigue existiendo, sin embargo, los sensores para VANT poseen una distancia focal fija, así como las dimensiones del sensor que repercuten en las dimensiones de la imagen, permanecen fijas también. El mover la altura de vuelo se refleja en la escala de mapa; todo esto debía ser rigurosamente calculado porque no podía haber lugar a fallos dado que era muy caro realizar un vuelo, sigue siendo más caro realizar un vuelo fotogramétrico digital con Vehículo tripulado porque hay que considerar renta de un avión, combustible y personal que lo dirija, en cambio, con los VANT se hace una única inversión en el equipo mucho más

asequible y los recursos que se gastan en cada vuelo son batería, tiempo del operador, licencias y mantenimiento del equipo.

Otra de las ventajas de vuelos con Vehículos No Tripulados es la posibilidad de revisar las imágenes una vez realizado el levantamiento, antes de retirarse del sitio de vuelo, sin embargo, lo que es más importante es que el especialista sepa para qué se realiza el vuelo y considere la escala de mapa aproximada a la que puede trabajar. Un VANT puede volar una vez superando los obstáculos fijos en terreno del lugar hasta (dependiendo del sensor) aproximadamente 250 m sobre el terreno, por lo que la escala ya no es un problema.

Para un trabajo con VANT enfocado a la obtención de medidas topográficas, el modelo y marca del sensor son los que dictan las constantes para definir: GSD, la mayor altura a la que se puede volar y el tiempo de vuelo máximo.

Ground Sample Distance (GSD) que al español se traduce como: distancia de muestreo, es la distancia que existe entre el centro de dos píxeles consecutivos medidos en el suelo. El GSD es inversamente proporcional a la resolución espacial de la imagen y directamente proporcional a la altura de vuelo, se calcula de la siguiente manera:

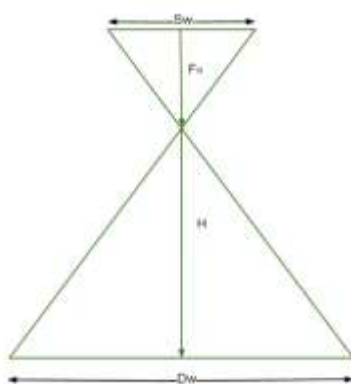


Ilustración 19 Fuente (PIX4D, 2020)

$S_w$ = ancho de sensor de la cámara (mm)

$H$ = altura de vuelo (m)

$F_R$ = distancia focal (mm)

$D_w$ = ancho de la huella de una sola imagen en el suelo (m)

$Im_w$ = ancho de imagen en píxeles, no se representa en el diagrama.

$$GSD = \frac{Sw*H*100}{FR*imw} \dots (3)$$

Debido a que un pixel es cuadrado, se puede sentenciar que el área de cobertura por pixel es:

$$A_p = (GSD) (GSD) \left( \frac{cm}{pixeles} \right)^2 \dots (4)$$

El GSD lo define el fotogrametrista o geomático porque será el especialista quien determine cuál es la resolución requerida para llevar a cabo los fines del proyecto, para lo que nos concierne un GSD de 5 cm es conveniente, pues el detalle es bueno, en cuatro pixeles de esas dimensiones hay un área de  $100 \text{ cm}^2$  el detalle que se aprecia en esa área (como un charco) serán visibles y menor a esa área no interesa al proyecto.

Con los datos que se tienen se puede calcular la altura de vuelo a la que debe levantar el VANT para poder cumplir con el GSD, también tiene implicaciones la distancia focal y las dimensiones del sensor.

De acuerdo con la ecuación 3 se procede a calcular el GSD con el que se trabajó en este proyecto.

En la página de especificaciones del Phantom4, DJI no se hace mención de los datos que se solicitan en la fórmula 3, fue necesario mandar un correo al soporte técnico y la respuesta fue la siguiente:

Para el ancho del sensor de la cámara: "I've received feedback from our Engineers and as per them, the width and height of the 1/2.3" Camera Sensor of the Phantom 4 aircraft is 6.3116mm \* 4.7492mm", por lo tanto:

$$S_w = 6.3116$$

Cuando se obtuvo este dato y de acuerdo a las especificaciones del sensor donde se dicta que la distancia focal es de 20mm se calculó el GSD dando como resultado el valor siguiente:

$$GSD = \frac{S_w * H * 100}{F_R * ImW} = \frac{6.3116 * 100 * 100}{20 * 4000} \approx 0.79 \text{ cm/pix}$$

Pero este valor no coincidía con el reporte que genera el software cuando procesa las imágenes, así que pregunté una vez más y la respuesta fue: "Hi there. The camera database has the focal length of the Phantom 4 as 3.61, not 20. can you input the correct focal length to see what value is produced?"

Cuando pregunté por qué razón en las especificaciones se manejan 20mm, ellos contestaron: "The 20 mm focal length that DJI reports in the camera's specifications is the 35 mm equivalent focal length. The camera's actual focal length is significantly smaller than 20 mm because the camera's sensor is smaller than a standard 35 mm sensor"

Ingresando los parámetros que nos indicaron los valores coinciden:

$$GSD = \frac{S_w * H * 100}{F_R * ImW} = \frac{6.3116 * 100 * 100}{3.61 * 4000} \approx 4.37 \text{ cm}$$

Con este dato se logra conocer el ancho (DW) y el alto (DH) de la huella de cada imagen:

$$DW = \frac{GSD * ImW}{100} = \frac{4.37 * 4000}{100} \approx 175 \text{ m}$$

$$DH = \frac{GSD * ImH}{100} = \frac{4.37 * 3000}{100} \approx 131 \text{ m}$$

### 3.- Traslape longitudinal y transversal.

Por definición, el traslape es el área en común captada por dos imágenes contiguas.

Para una visión estereoscópica completa se generan dos tipos de traslape: longitudinal y transversal.

El traslape longitudinal se genera a lo largo de una línea de vuelo y el transversal es el traslape entre las líneas del vuelo. El mínimo porcentaje de traslape requerido es de 50% por eso se recomienda  $(60 \pm 5) \%$  para una alineación correcta de las fotos o imágenes para la medición en la tercera dimensión, mientras que el lateral de  $(30 \pm 15) \%$  que sirve para proporcionar seguridad que no haya áreas omitidas entre las líneas de vuelo y para un buen mapeo de puntos de control. Estos datos influyen en la cantidad de líneas de vuelo que se deberán hacer y en el número de imágenes que se van a tomar por cada línea de vuelo. En fotogrametría analógica es importante porque representa dinero; entre más líneas de vuelo se toman más tiempo, papel, horas de vuelo, etc., en cambio, en fotogrametría digital no es así, sin embargo, repercute la cantidad de imágenes tomadas, de acuerdo a las especificaciones de los programas de post-procesamiento de imágenes, si el proyecto contiene un número grande de imágenes se requiere una potencia mayor en la estación de trabajo.

El dato del traslape es ingresado al momento de iniciar, en una Tablet o teléfono inteligente, al software para la planificación de vuelo, en este caso el que se utilizó es Pix4Dcapture.



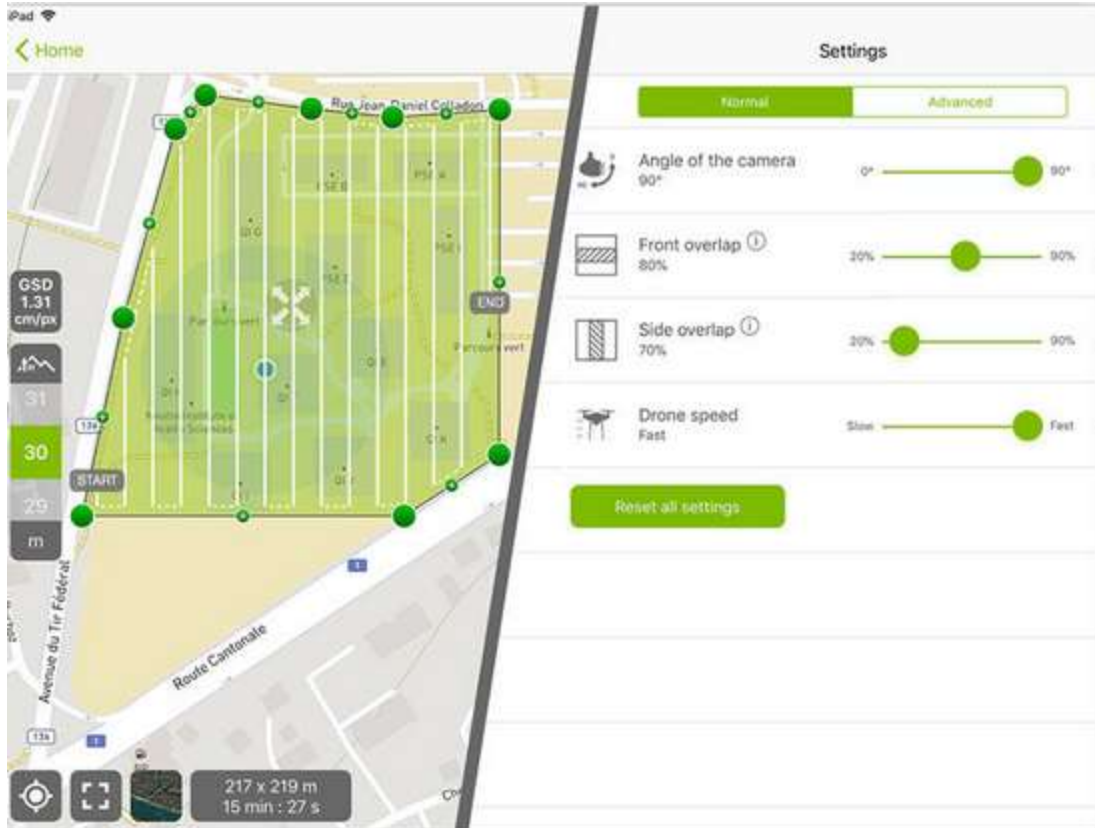


Ilustración 20 Pantalla de Tablet con Pix4D capture corriendo. Fuente (PIX4D, 2020)

#### 4.- Orientación, localización y número de líneas de vuelo requeridas.

Normalmente, las líneas de vuelo se orientan de norte a sur o de este a oeste y son paralelas entre sí.

En fotogrametría analógica se trazaban estas líneas de vuelo en una carta topográfica de la zona de interés, ahora con los VANT todo se ha facilitado, Pix4Dcapture que es la aplicación que viene en conjunto con Pix4Dmapper para realizar el plan de vuelo, es decir, programar el equipo para luego mandarlo a ejecutar tarea, el plan de vuelo aparentemente se puede realizar en menos de un minuto, sin embargo es importante saber qué parámetros se ingresan, el por qué y el para qué de acuerdo a los fines que tenga el proyecto para poder

optimizar el trabajo o evitar que en gabinete se generen errores a causa de un mal traslape o una mala cobertura.

#### 5.- Deriva, cabeceo y alabeo.

Cuando la aeronave se encuentra recabando las imágenes se crean, a causa del viento, movimientos no deseados que alteran la precisión del proyecto y es importante corregir, como tolerancia se permite una inclinación máxima de 3°.

La deriva es el ángulo formado entre el eje longitudinal de la aeronave y la ruta preestablecida en el plan de vuelo a seguir, es decir, el VANT no sigue la línea de vuelo trazada en el pre-proyecto porque el viento lo desvía de la ruta.

El cabeceo es el movimiento de norte a sur que puede llegar a hacer la aeronave y el alabeo es el movimiento de este a oeste, igualmente producido por ráfagas de viento (Zelaya, Guevara, Ricardo, & Pacas, 2016).

#### 6.- Características de la cámara.

Las características de la cámara son muy importantes para la calidad de las imágenes y para lograr una alta precisión en la obtención de medidas después del debido proceso, tomando en cuenta los parámetros de la cámara. En fotogrametría la cámara que se utiliza se conoce como “cámara métrica”; calidad de la lente, velocidad del obturador, apertura, ajuste de intervalómetro y tiempo de ciclo son datos que se deben conocer. Según las Normas Técnicas para Levantamientos Aerofotográficos con Cámara Aérea Digital con fines de Generación de Información Geográfica (SEGOB, 2016), el concepto de cámara aérea digital es el siguiente: “el dispositivo fotográfico matricial o de línea que permite la colecta de fotografías en formato digital; sus características ópticas (distorsiones de la lente) y elementos

de orientación interior (distancia focal y geometría de construcción) son determinados con exactitud e integrados a un reporte de calibración.”

#### 7.- Capacidades de la aeronave.

Con los VANT también deben tomarse en cuenta: velocidad máxima y mínima, porque tiene una repercusión directa con la calidad de las imágenes, es decir, si se realiza un vuelo a una velocidad alta, y, además, se tienen condiciones de viento desfavorables es posible que en algunas imágenes se obtengan distorsiones.

En un vuelo tripulado, es muy importante que el piloto tenga presente la altura máxima de vuelo, si no se respeta esto genera errores. En el caso de los VANT la altura de vuelo se ingresa a la aplicación y es un número inamovible quedando constante para todo el proyecto, de aquí la importancia de la elección de punto de partida porque si la topografía es accidentada el vuelo deberá hacerse desde un punto medio.

La capacidad de carga es importante para naves tripuladas, en lo que nos concierne al empleo de los VANT no se agrega ninguna otra carga más que la del sensor, sin embargo, existen vehículos a los que se les puede montar y desmontar sensores, en caso de recurrir a este tipo de vehículos, debe considerarse la capacidad de carga debido a que existen sensores más pesados como es el caso de un sensor LIDAR.

#### 8.- Estación del año aceptable, tiempo del día.

La estación del año es uno de los factores que ya no importan con VANT pues a la altura que es posible pilotear no hay nubes que tapen el paisaje de interés, con vehículo tripulado la altura de vuelo es alta y por esa razón salen nubes que anulan la imagen o

fotografía. El tiempo del día es de más cuidado, el balance del tono y el color dependen de la luz que haya al momento de vuelo.

El ángulo del sol es lo que determina la longitud de la sombra, que de acuerdo al proyecto, importará que sean cortas o largas (Paine, 1981).

De acuerdo al artículo 8 de las Normas Técnicas para Levantamientos Aerofotográficos con Cámara Aérea Digital con fines de Generación de Información Geográfica (SEGOB, 2016), se debe documentar un proyecto previo al vuelo en consideración a los siguientes aspectos:

#### PROYECTO DE VUELO

- Nombre del proyecto: Levantamiento Aerofotográfico del Barrio 18 de la delegación Xochimilco, CDMX. Con Vehículo Aéreo No Tripulado, modelo Phantom4
- Nombre de la empresa que realiza el vuelo: Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED)
- Delimitación del área de trabajo sobre mapas digitales de INEGI a escala conveniente



Ilustración 21 Polígono de color guinda representa área de estudio. Fuente: mapa digital de México, INEGI, 2019

- Representación sobre mapas de INEGI del diseño geométrico del uelo incluyendo la posición de líneas y dirección de vuelo.



*Ilustración 22* Líneas de vuelo. Fuente: mapa digital de México, INEGI, 2019.

- Productos a generar a partir de fotografías aéreas.
  - Modelo Digital de Elevación
  - Modelo Digital de Terreno
  - Ortomosaico
- Altura de Vuelo sobre el nivel medio del mar: 2,232 msnm
- GSD solicitado: 5cm aprox.
- Porcentaje de superposición lateral: 75%
- Porcentaje de superposición longitudinal: 75%
- Datos de la cámara: sensor phantom 4
- Copia de reporte de calibración: no aplica, no obstante, no debe olvidarse calibrar con antelación el sensor como se menciona en el inciso b de este apartado.

- Cronograma de ejecución del proyecto

ACTIVIDADES	Día1	Día2	Día3	Día4	Día5	Día6	Día7	Día8	Día9	Día10	Día11
1 Marcas en el terreno											
2 Vuelo con VANT											
3 Levantamiento estático rápido											
4 Levantamiento RTK											
5 Levantamiento con estación total											
6 Post-procesamiento de las imágenes											
7 Generación de productos											

### ***b. Calibración de la cámara.***

Cuando se realiza un vuelo tripulado se debe contar con un documento de calibración de la cámara para constatar que está en buenas condiciones y que tiene calibrados y graduados todos sus parámetros. La calibración del sensor del Phantom 4 se lleva a cabo a través de un programa asistente proporcionado por la empresa DJI, al conectar al computador con un cable mini USB del dispositivo a la computadora el programa reconoce el VANT automáticamente, en el apartado de calibración se explican 3 pasos sencillos para realizarla a través de un código especial, frente al cual, se coloca el sensor haciendo los movimientos específicos del vehículo para que la calibración quede completada. Este procedimiento toma apenas un par de minutos siendo absolutamente necesario realizarlo para evitar problemas al momento de despegue que imposibilitaría el vuelo del VANT, o bien, las imágenes saldrían con mala calidad (DJI, 2016).



*Ilustración 23 Calibración de la cámara. Imagen obtenida de video (DJI, 2016).*

### *c. GPS montado en VANT*

El GPS que transporta el VANT ha sido uno de los retos más grandes en su implementación, el objetivo es lograr una georreferenciación minimizando el requerimiento de otros dispositivos, actualmente se alcanza una precisión de 0.5 m a 4 m, aun así, tiene múltiples utilidades:

- **Orientación.** Importante para que el vehículo tenga datos de ubicación y al momento de ingresar el plan de vuelo el vehículo se dirija a tomar imágenes al lugar del mapa señalado, así como para cuando se pierde de vista o cuando se está agotando la pila la aeronave sea capaz de regresar al punto del que fue lanzado.
- **Posicionamiento.** Las imágenes del VANT cuentan con un metadato en formato de imagen JPG en el que se almacenan las coordenadas del GPS integrado lo que permite que el lugar de levantamiento sea georreferenciado automáticamente al abrir las imágenes en cualquier plataforma para estos fines. Las coordenadas mejoran considerablemente cuando se utiliza apoyo terrestre.
- **Captura.** El GPS apoya al funcionamiento del obturador; las capturas toman en cuenta el tiempo y la posición del GPS, asimismo los sensores inerciales que lo conforman.
- **Despegue, vuelo, aterrizaje.** El GPS se activa desde el momento que enciende el aparato, el cual, debe estar orientado para que la computadora integrada reconozca su posición al momento del despegue para evitar accidentes; durante el vuelo, además de las capturas que va tomando, el software reconoce en qué punto de proyecto está sobrevolando y es posible ver en la aplicación en tiempo real la posición del vehículo donde el usuario podrá saber cuánto falta por recorrer y el tiempo que toma al mismo. Finalmente, en el

aterrizaje se hace uso del GPS para regresar al punto donde salió o al punto donde le indique el usuario.

***d. Recomendaciones.***

- Es de vital importancia no perder de vista el vehículo, una persona debe estar siguiéndolo con la mirada todo el tiempo.
- Es importante seguir un protocolo para minimizar el riesgo a las equivocaciones.
- Reiterando, es importante contar con un plan de vuelo previo al lanzamiento del VANT, se debe contar con GSD o resolución requerida, área del lugar que interesa levantar y puntos de control previamente marcados en el terreno.
- Revisar con aplicaciones la velocidad de viento en el lugar para saber si es riesgoso o no, lanzar el VANT.
- Revisar tránsito aéreo con aplicación porque es peligroso al paso de helicópteros.
- Revisar, una vez terminado el vuelo, que se tengan las imágenes en la tarjeta de memoria y hacer un respaldo.
- Revisar con algún software (en este caso PIX4D mapper) que las imágenes obtenidas hayan tenido la cámara calibrada todo el tiempo.

**V. Post-proceso**

***a. Procesamiento de las imágenes obtenidas con VANT.***

Cuando se realiza un vuelo sobre el terreno, el vehículo debe llevar una memoria micro SD donde almacena las imágenes que ha capturado, en gabinete estas imágenes se manipulan para poder generar los insumos de interés, a este procedimiento se le conoce como “procesamiento de imágenes”. A lo largo de este proyecto el software que se ha utilizado es Pix4D (elección explicada en capítulos anteriores). Pix4Dmapper tiene diferentes métodos de



procesamiento que dependen del alcance del proyecto y el sensor que se haya empleado, la opción Estándar 3D Maps, de acuerdo a la descripción del software, genera un Modelo Digital de Superficie, Modelo Digital de Terreno, Nube de puntos y Ortomosaico con una precisión respetable y es posible calcular índices de vegetación si se requiere, véase ilustración 24.

Plantilla de opciones de procesamiento



Ilustración 24 Plantillas de opciones de procesamiento del software Pix4Dmapper. Fuente: captura del programa.

Inmediatamente el software localiza en un mapa base las imágenes con los datos que el VANT tiene de GPS.



Ilustración 25 Mapa base donde se puede localizar el vuelo generado y su barrido. Fuente: Interface del software pix4Dmapper

El programa consta de tres pasos fundamentales para llegar a la generación de los insumos. A continuación, se describen los pasos:

1.- Procesamiento inicial.

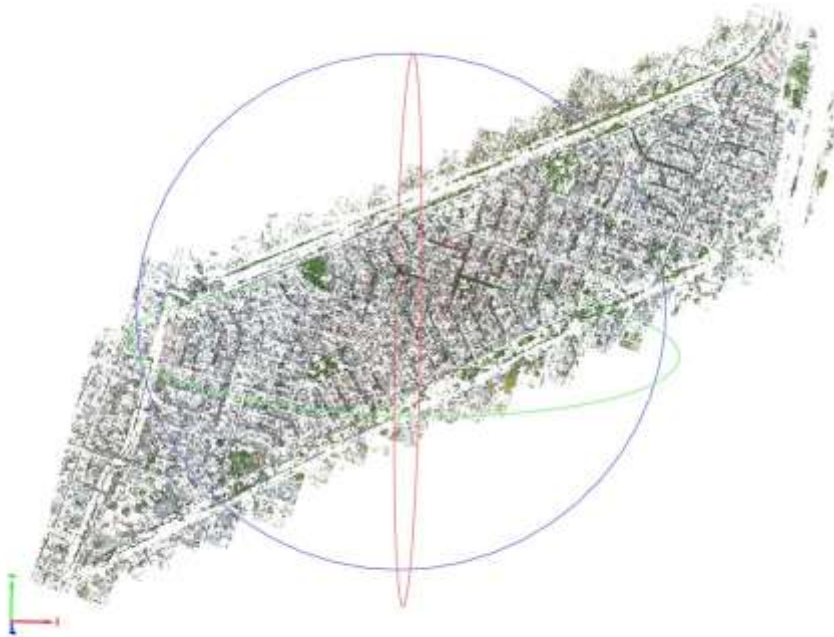
En este primer paso se realizan los siguientes procedimientos:

- Extracción de puntos clave: el programa realiza un primer barrido de las imágenes para seleccionar puntos en donde existan características para ser promovidas a puntos que coinciden.
- Puntos clave que coinciden: de acuerdo al primer barrido, se busca todos aquellos puntos en donde existen coincidencias en una imagen y otras (por el traslape longitudinal y traslape frontal), paso equivalente en fotogrametría analógica a la operación que se realiza con un estereoscopio, identificando puntos especiales en dos escenas para poder generar la secuencia precisa de las líneas de vuelo, cual si fuera una costura.
- Optimización del modelo de la cámara: de acuerdo a las especificaciones del sensor que se emplea, el programa hace un reconocimiento automático donde se calibran sus parámetros internos, como la distancia focal, así como parámetros externos, como la orientación del sensor.
- Localización GPS/GCP: toma la información de geolocalización del VANT (para estos fines es indispensable), información que se optimizará en los consecutivos pasos.

Adicional a esto, se toma la información de los puntos de control independientes que es una lista de puntos con coordenadas UTM, geográficas o arbitrarias (cuando son coordenadas arbitrarias es importante seguir las indicaciones específicas para ese procedimiento) mejorando la precisión de la localización de cada punto. Los puntos de

control pueden agregarse en cualquier momento, sin embargo, es absolutamente necesaria una reoptimización y el software volverá a realizar el procesamiento desde el primer paso.

Al finalizar cada paso el programa arroja un reporte que contiene información de los datos de entrada por el usuario como: nombre de proyecto; datos propios del sensor y parámetros ingresados al momento del vuelo; número de imágenes calibradas y número de imágenes descalibradas; número de puntos de control terrestre y precisión que tiene; una pre-visualización del MDS y Ortomosaico; detalles de calibración de la cámara; muestra gráficamente si el traslape es el adecuado o insuficiente; si el número de puntos clave encontrados resulta bueno para los siguientes pasos, etc. Lo importante de este informe es verificar la calidad a la que llegará el proyecto y sobre todo, si es pertinente avanzar en el proceso o es preciso repetirlo; desde que haya sido un mal vuelo o que la calibración haya tenido fallos.



*Ilustración 26* Nube de puntos densa. Barrió 18, Xochimilco. Fuente propia.

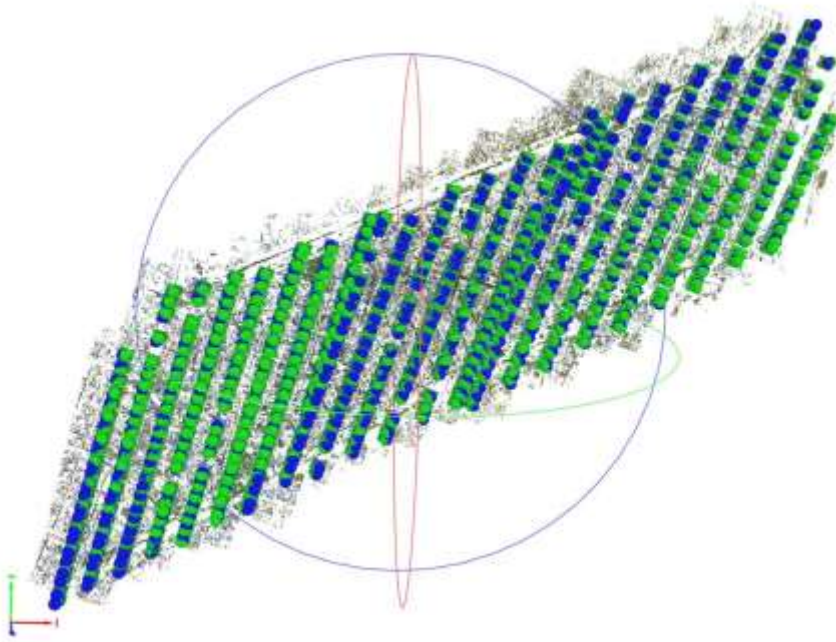


Ilustración 27 Después del primer paso el programa deja visualizar la nube de puntos densa con las cámaras en color verde y azul señalando que se encuentran perfectamente calibradas, si no fuera así, el color sería rojo. Fuente propia.



Ilustración 28 Distribución de PC en el polígono de interés, Xochimilco. Fuente: captura de pantalla en Pix4D. Fuente propia.

La distribución de los PC debe ser lo más uniforme posible para no generar errores por recargo de datos, esto es, por poner de un solo lado más puntos que de otro; aunado a lo anterior, es necesario señalar que el ingreso de puntos de control también depende de la configuración del terreno, ya que, en un terreno más accidentado se requieren más puntos en los cambios de pendiente, por lo que, al ser el Barrio 18 un terreno básicamente plano la distribución acordada a tomar de puntos de control es según la ilustración 30.

Una vez elegidos los puntos de control, el software pide sean señalados para realizar una georreferenciación (es el mismo procedimiento que se realiza en fotogrametría digital tradicional), cuando se tienen localizados y marcados es importante reoptimizar el proyecto para que las imágenes aterricen exactamente en la posición indicada, con seguridad, más precisa que la del GPS del VANT, si no fuera así es porque existen equivocaciones.

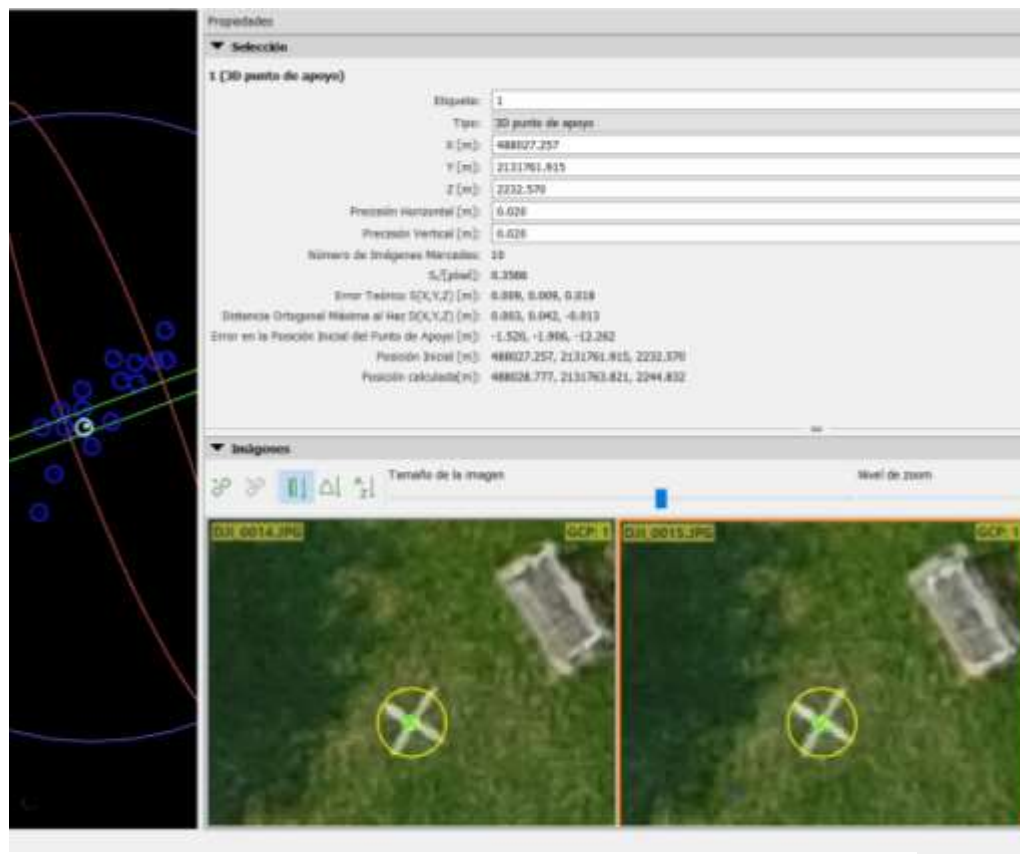
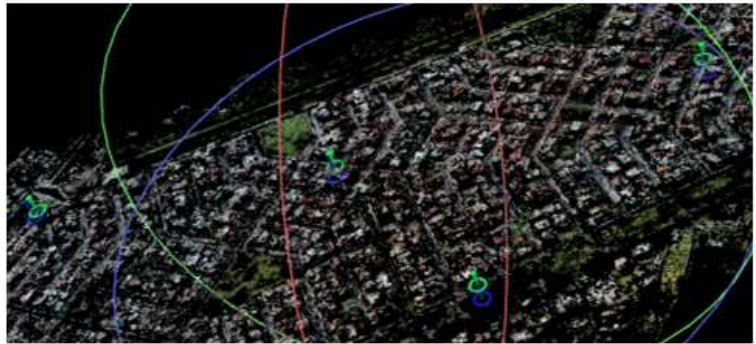


Ilustración 29 Localización de puntos de control para mejora de precisión. Fuente propia.

En la ilustración 30 se puede observar como existe una diferencia entre las coordenadas de los puntos de control que se toman con equipo GNSS (marcas azules) con respecto a las coordenadas que tiene cada punto de la nube con información del GPS integrado al VANT (marcas verdes), estas marcas se encuentran distantes porque se ha indicado al proyecto el punto exacto señalando en las imágenes como se muestra en la ilustración 31, por esta razón es importante reoptimizar el proyecto para que se acomoden los puntos a un lugar más cercano a su ubicación verdadera.



*Ilustración 30 Imagen superior muestra PC ingresados (marcas azules) y puntos según imagen (marcas verdes). Imagen inferior muestra las marcas empalmadas con proyecto reoptimizado. Fuente propia.*

Después de cada paso, el software se encarga de lanzar un segundo reporte para constatar que todo lo maquilado sea correcto y conveniente. El reporte completo se adjunta como “Quality Report”<sup>6</sup> al final de este documento.

## 2.- Nube de puntos y malla

Este paso es el que más recursos de hardware consume al generar más de un insumo primordial para los productos finales, se ingresan parámetros importantes para definir la

---

<sup>6</sup> Este reporte es el que arroja al final el software, después de los 3 pasos, por lo tanto, se hace referencia a este 3 veces porque va englobando los resultados conforme se van obteniendo.

resolución y calidad de los productos de salida que siempre tiene implicaciones en la precisión del proyecto.

Los puntos que empataron en el primer paso se emplean en este segundo para crear:

Densificación de puntos: aumentan los puntos de empate que se crearon en un principio con una barrida más para generar una nube de puntos en tres dimensiones.

Malla con textura 3D: el programa hace un relleno de la nube de puntos para darle cuerpo a la figura.

La *nube de puntos* es la generación de coordenadas x,y,z que modelan el levantamiento en 3D y que servirá al tercer paso para la obtención del MDT y MDS; se puede elegir su densificación por si no se tiene una computadora muy potente pero debe tomarse en cuenta que a mayor puntos será más preciso el producto. El software realiza una clasificación automática donde se denota la importancia de los PC porque es así como se aterriza la imagen y se puede saber que puntos son terreno y cuales son construcciones, vegetación, objetos creados por el hombre, etc. No está de más mencionar que es posible exportar esta nube de puntos a formatos como: LAS, LAZ, PLY y XYZ<sup>7</sup>.

---

<sup>7</sup> Existen softwares en el mercado generalmente utilizados para las nubes de puntos que se obtienen con los dispositivos LIDAR con los que se manipula más automatizado estas nubes de puntos y resulta un trabajo menos tedioso. ENVI tiene un módulo LIDAR con el que es posible realizar la clasificación de estas nubes de puntos.



Ilustración 32 Nube de puntos del área de estudio. Fuente propia.

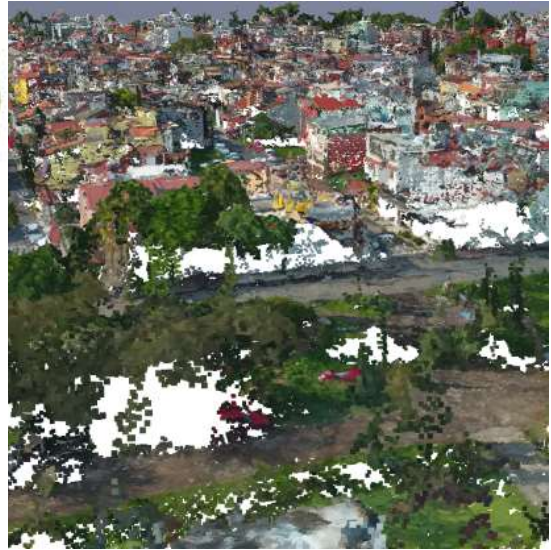


Ilustración 31 Acercamiento a la nube de puntos. Fuente propia.

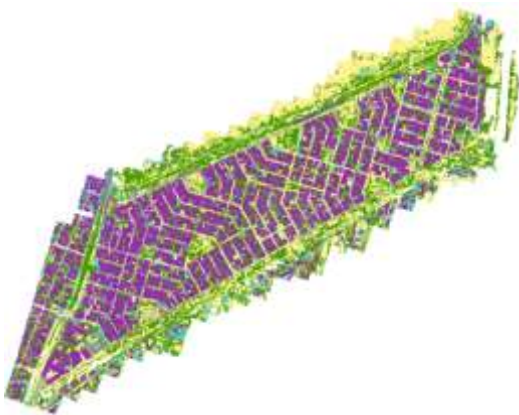


Ilustración 33 Nube de puntos con clasificación automática. Fuente propia.



Ilustración 34 Acercamiento a la nube de puntos con clasificación automática. Fuente propia.

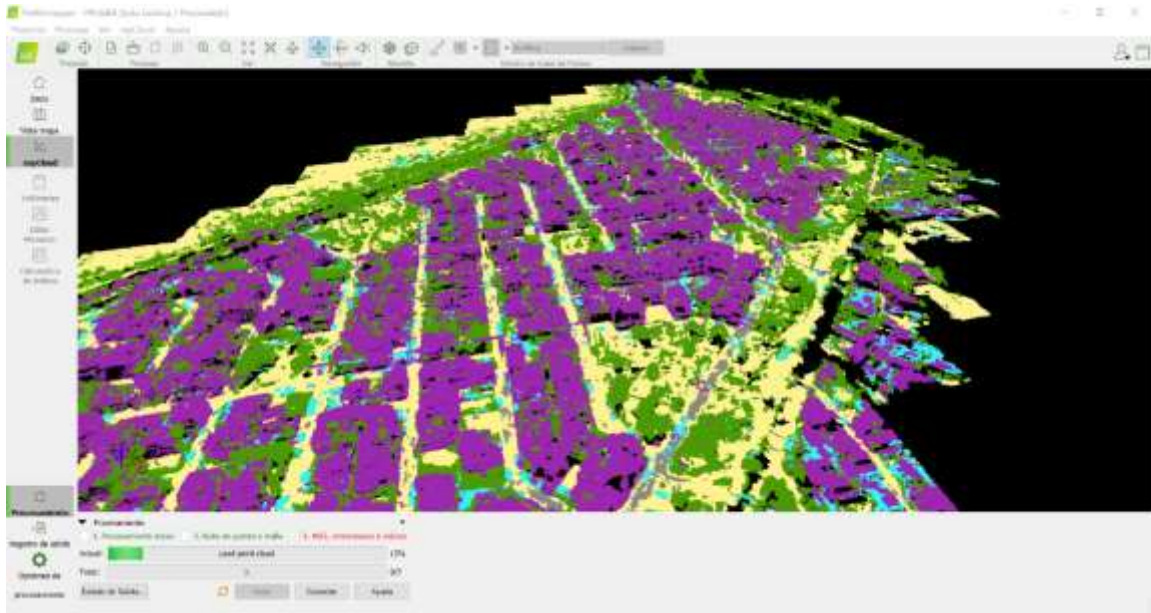
En las ilustraciones 35 y 36 se muestra la clasificación automática que genera el software la siguiente paleta de colores detalla dicha clasificación:



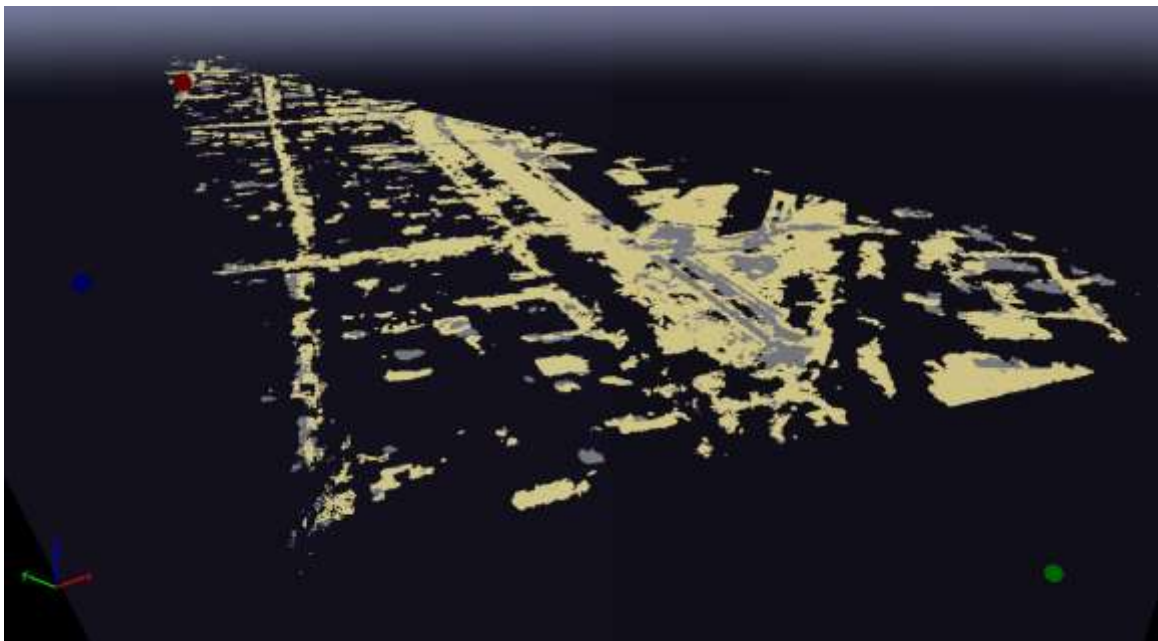
Ilustración 35 Paleta de colores que explica ilustraciones 33 y 34. Fuente propia.



He aquí una acotación. Recordar que la clasificación automática que genera Pix4D no es la mejor, siendo imprescindible el mejoramiento manual si el objetivo es la recreación de un MDT. Se trata de señalar lo más exacto posible entre terreno (amarillo) y caminos o carreteras (gris) contra todos los demás rubros ya que para la generación de los modelos de terreno, el programa ocupa solo estas dos capas de puntos.



*Ilustración 36* Nube de puntos mejorada manualmente. Software que procesa tercer y último paso. Fuente propia.



*Ilustración 37* Nube de puntos de terreno. Fuente propia.

Se genera también una *malla con textura 3D* de igual importancia para la generación de los modelos de elevación porque a través de este procedimiento se crea la primera triangulación de la recreación del terreno, derivada de la nube de puntos para otorgar continuidad al modelo y es posible cambiar la textura de esta malla. Puede ser exportada en: PLY, FBX, DXF, OBJ y PDF.

A continuación se mostrará la generación de la malla que es el relleno de las zonas donde no hay puntos pero que sirve para dar continuidad al modelo:



*Ilustración 38* Malla de puntos generada por Pix4Dmapper. Fuente propia.

El programa genera un segundo reporte “Quality Report” que engloba el primer reporte y además lo complementa con datos acerca de los parámetros e insumos que genera en este segundo paso.

### 3.- MDS, Ortomosaico e índices.

Como último paso es la generación de los Modelos de Elevación y el Ortomosaico. Para estos dos insumos el programa pide la resolución GSD requerido, si no es ingresada manualmente por el usuario toma de modo automático la que calculó en el plan de vuelo. Así

mismo, se pueden o no utilizar filtros para suavizado de las superficies y es posible indicar que se generen curvas de nivel.

El software puede utilizar dos métodos para la generación de los modelos raster: Ponderación de Distancia Inversa y Triangulación que se explicarán en el inciso b de este apartado.

Además es en este tercer paso donde se pueden realizar otros cálculos para cuando se requiere conocer el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI).

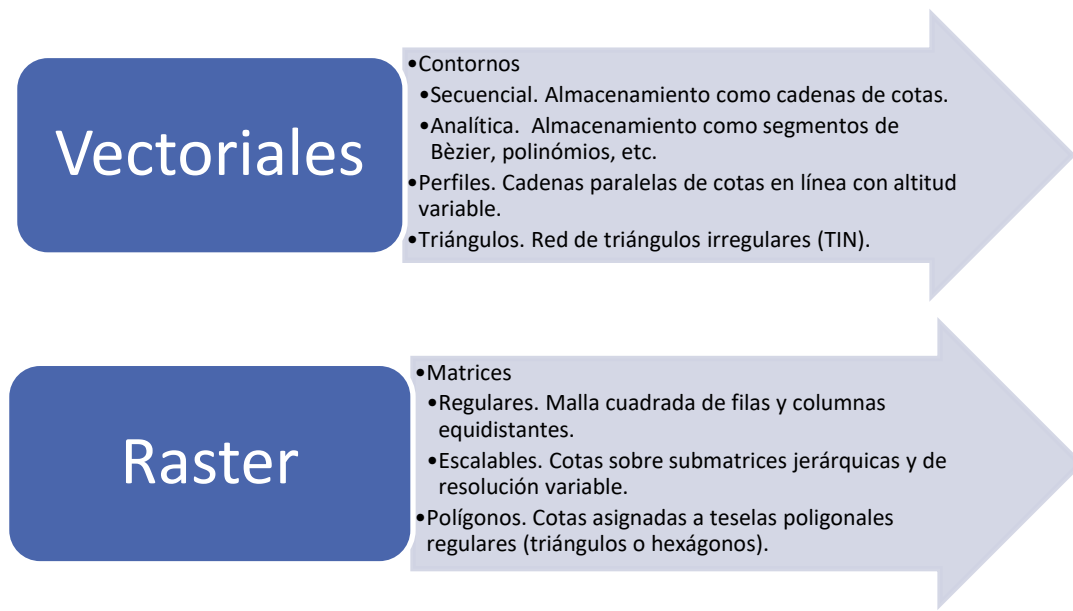
El programa arroja un último informe completo “Quality Report”.

***b. Modelo Digital de Elevación (MDE).***

Un modelo como tal, es una representación que contiene algunas de las características con datos que son cualitativos y cuantitativos de la realidad, así pues, un Modelo Digital de Superficie es una representación virtual con un sistema de coordenadas y una proyección geográfica que es generada y manipulable en un ordenador por algún software de datos espaciales.

Los MDS y MDT forman parte de la familia de Modelos Digitales de Elevación.

La definición es: una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno cuya unidad básica es la altitud que acompaña a una coordenada plana. Las diferentes estructuras para gestionar los modelos se definen cuando se decide la interrelación entre la altitud y la coordenada plana correspondiente, dado que es un modelo continuo cada punto estimado se recrea a través de un proceso de interpolación a partir de los datos de su entorno.



*Ilustración 39 Estructuras más usuales para generar MDS. Fuente de información (Felicísimo, 1994)*

Los insumos que se obtienen procesando las imágenes de VANT son de estructura raster particularmente de tipo matricial: “los datos se interpretan como el valor medio de unidades elementales de superficie no nula que teselan el terreno con una distribución regular, sin solapamiento y con recubrimiento total del área representada” (Felicísimo, 1994). Este tipo de estructura facilita el tratamiento numérico.

En resumen, cuando se ingresan las imágenes al software éste realiza el proceso específico para la obtención de puntos en más de una escena y estos puntos se catalogarán en conjunto como Nube de puntos, es decir, en un principio son datos vectoriales que al crear los MDE se generarán datos raster. Estos modelos raster se generan con procesos de Interpolación.

Existen una amplia variedad de métodos de interpolación, Pix4D mapper tiene a disposición del usuario dos de estos métodos:

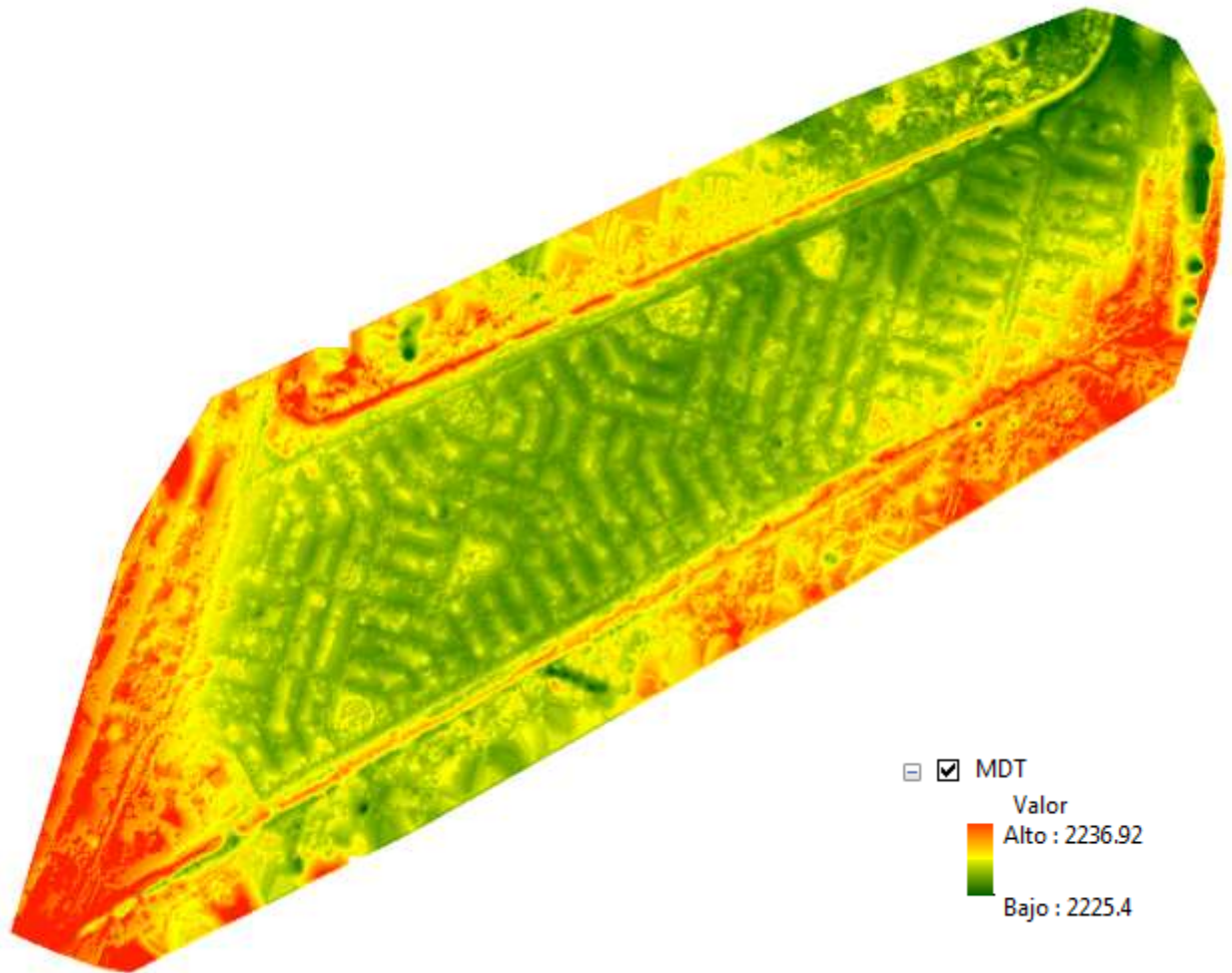
Ponderación en función inversa de la distancia. Asigna pesos a los datos en función inversa al cuadrado de la distancia que los separa de un punto problema. Este método se emplea para cuando se van a manipular las edificaciones de la zona (Felicísimo, 1994, p.26).

Triangulación. El método de triangulación que se emplea es la de Delaunay; consiste en generar una serie de triángulos, cuyos vértices son los puntos generados por el programa Pix4D (nube de puntos), teniendo lados y vértices en común con otros triángulos, recubriendo con estas formas simétricas el polígono levantado, se debe cumplir la siguiente condición: “la circunferencia circunscrita de cualquier triángulo de la triangulación, no incluye ningún punto del conjunto de puntos diferente a los vértices del triángulo” (Legrá Lobaina, Atanes Beatón, & Guilarte Fuentes, 2014), lo que significa que los ángulos de las triangulaciones tienden a ser aproximadamente de  $60^\circ$ , los lados son casi iguales y los triángulos tienden a ser equiláteros. Este método es idóneo para la obtención de MDT sobre todo cuando son áreas planas, en cuanto a tiempos de obtención de insumos, este método puede llegar a ser hasta 10 veces más rápido que el método de ponderación de distancia inversa.

### ***c. Modelo Digital de Terreno (MDT).***

Cabe señalar que, aunque un MDT contiene datos de altitud del terreno, se pueden extraer otras propiedades morfológicas con simulaciones numéricas de procesos físicos, por ejemplo, un mapa de pendientes. Por lo que el concepto de MDT es para hablar de forma general de un modelo del terreno. De acuerdo a una definición completa de MDT sería “Una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua” (Felicísimo, 1994, p.5).

El MDT que se crea para los fines de este trabajo fue obtenido con el método de Triangulación que se describe en el inciso anterior y el resultado es el siguiente:



*Ilustración 40 Modelo digital de terreno que ha sido creado por el programa Pix4D a partir de imágenes con VANT. Fuente propia.*

#### ***d. Ortomosaico.***

Es el producto generado de la toma de imágenes aéreas con cierto traslape a partir de una nube de puntos que integran una sola imagen para ampliar el rango de visión del lugar (Cheng, Xue , & Li , 2007). El principio es que cada punto que conforma el Ortomosaico sea perpendicular al eje focal, es decir, como si el observador estuviese exactamente en el cenit de

cada punto, previo tratamiento para eliminar errores producidos por la aeronave y las sombras del momento de captura y será posible obtener medidas en el eje X y Y de la zona de estudio.

El resultado fue el siguiente:



*Ilustración 41 Ortomosaico creado con Pix4D, visualizado con ArcGIS. Fuente propia.*

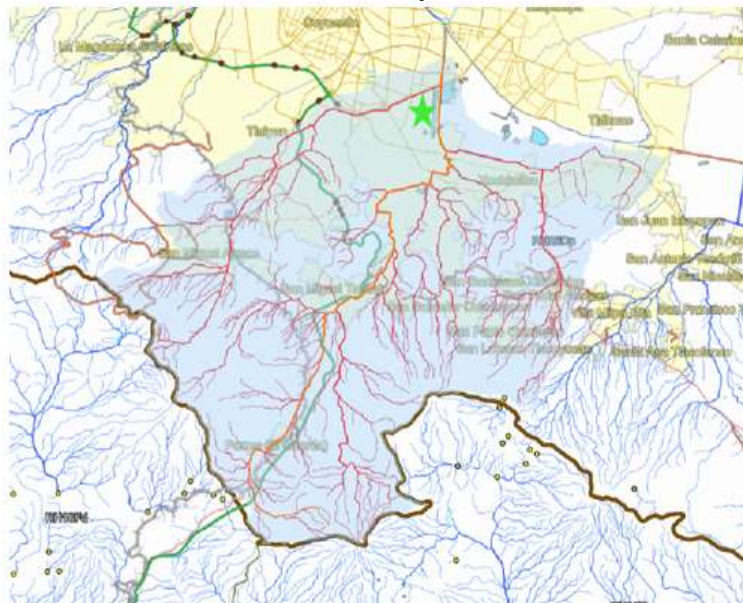
## VIII- Áreas de peligrosidad por inundación

### *e. Análisis hidrológico.*

Siempre que se hace un análisis de susceptibilidad de inundación, es importante el desarrollo del análisis hidrológico, esto es, verificar cuencas, subcuencas y microcuencas para determinar, desde un panorama general a lo particular, cuáles son las condiciones o contexto de la zona de estudio; de la mano de un análisis topográfico fino.

Las microcuencas que se ilustran a continuación son dos redes de drenaje natural para conducir el agua de lluvia hacia dos puntos de salida que finalmente van a converger aguas abajo de la misma.

INEGI ha puesto a disposición del público el Simulador de Flujos de Agua de Cuencas Hidrográficas (SIATL), que es una aplicación geoespacial diseñada para el estudio de cuencas y cálculos de caudales que permite trazar desde la web, de manera automática, el parteaguas o contorno de cuencas, subcuencas y microcuencas de México.



SIMBOLOGÍA

★ Ubicación de Barrio 18

Ilustración 4233 Microcuencas pertenecientes a la Cuenca del Valle de México. Fuente (INEGI, 2020; SIATL, 2020).



Dentro de la microcuenca de la ilustración 42 se encuentra el Barrio 18. Se aprecian dos redes de cauces diferenciadas que colectan al parecer la mayor parte del agua: una red al noroeste y otra al sureste cada uno de estos ramales pueden denominarse como microcuencas. Entre las redes, es posible inferir que hay una zona de escurrimientos que bajarían hacia el noreste, quizás de manera aislada de las dos redes cuyos límites y dimensiones pueden obtenerse con ayuda de un software de procesamiento de datos geoespaciales, en el que se monta las dos redes y la topografía, o bien, con la misma herramienta de INEGI.

En la tabla 8 se aprecian los indicadores del cauce principal (área drenada, altitud máxima, mínima y media, pendiente media, longitud del respectivo cauce mayor).

*Tabla 8 Indicadores del cauce principal.*

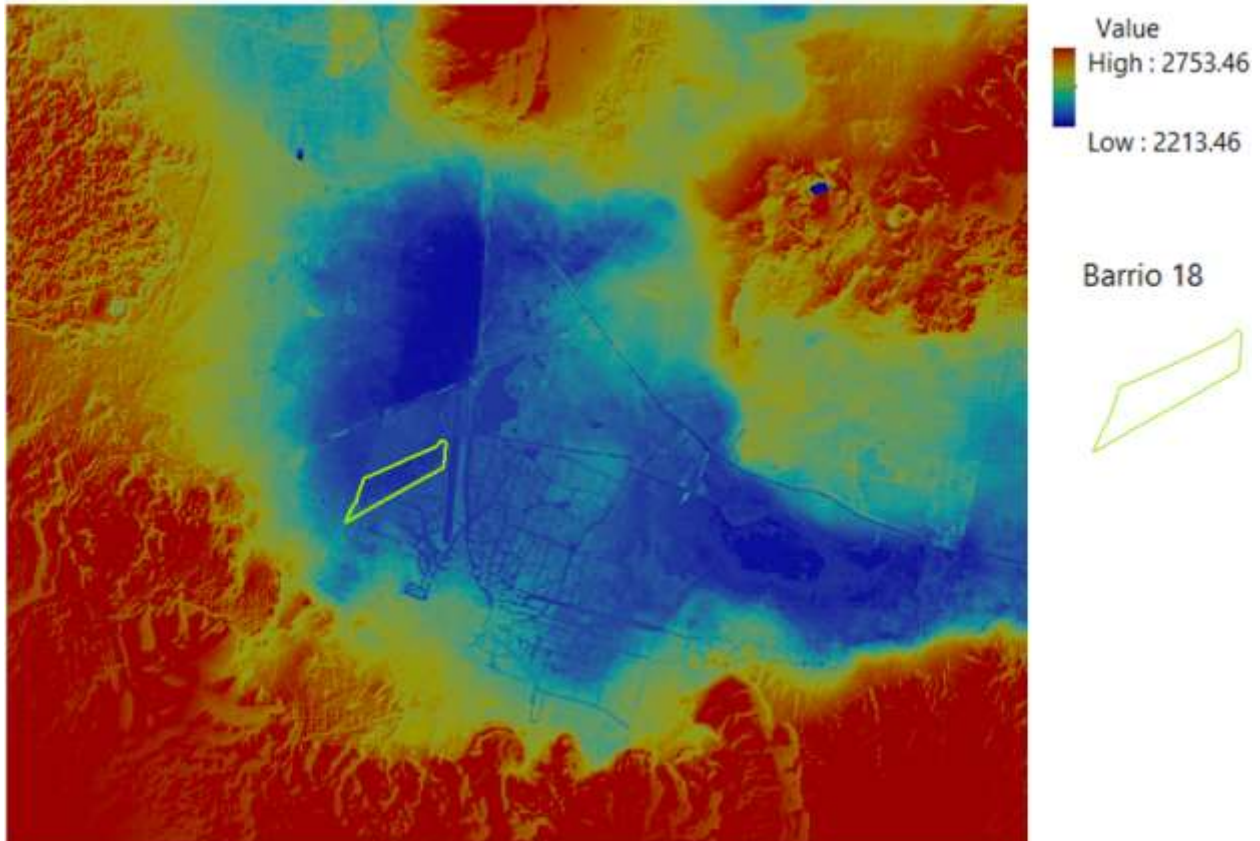
<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Elevación Máxima	3,184 m
Elevación Media	2,712 m
Elevación Mínima	2,240 m
Longitud	35,074 m
Pendiente Media	2.69%
Tiempo de concentración	247.20 min
Área drenada	337.41 km <sup>2</sup>

*Datos obtenidos de la herramienta SIATL. Fuente (SIATL, 2020)*

La herramienta SIATL condensa la información para proporcionar a los usuarios datos fáciles de obtener y entender, pero no resulta fiable cuando es importante precisar los datos para diseño de obras hidráulicas.

También se descargaron Datos de Relieve de la zona de estudio: Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LIDAR para visualizar mejor el área de la cuenca de estudio.

La siguiente imagen, es un acercamiento de la subcuenca original en donde se puede visualizar el polígono del Barrio 18 y sus alrededores, claramente es una zona donde descienden, naturalmente, los escurrimientos.



*Ilustración 43 Escena del acercamiento a la subcuenca en la que se encuentra el Barrio 18, Las zonas más altas son las rojas y las más bajas azules. Fuente visualización de MDE obtenido con LIDAR datos de INEGI.*

En un primer análisis, podría pensarse que toda el agua que aparentemente bajaría de las zonas rojas que representan los puntos más altos del lugar afecta al Barrio 18, pero no es así, cuando se cuenta con los modelos topográficos y se analiza el área se puede visualizar la divisorium acuarium<sup>8</sup> mostrada en la ilustración 43, se realizó un corte al MDE de LIDAR para delimitar la subcuenca que deriva de la cuenca del Valle de México.

<sup>8</sup> Línea de delimitación de la subcuenca.

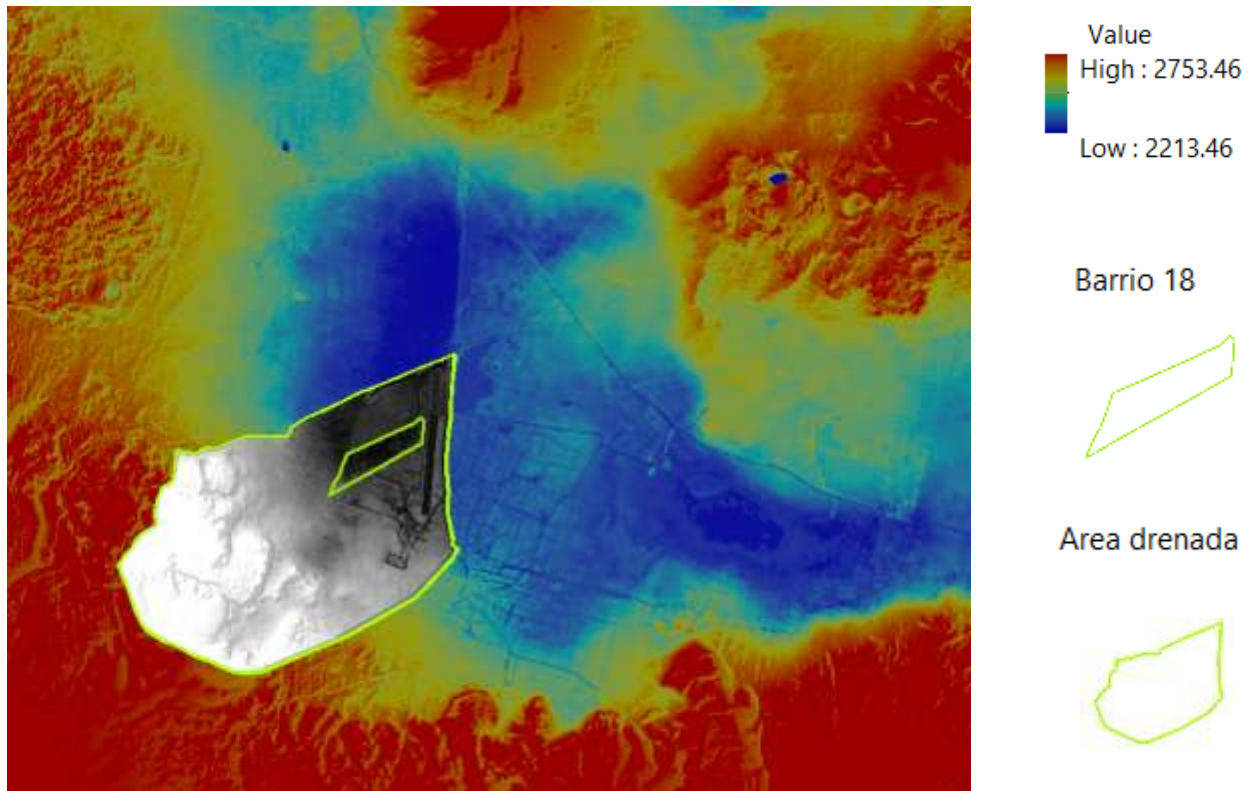


Ilustración 344 Representación del Área Drenada, microcuenca que compete a la zona de estudio. Fuente visualización de MDE obtenido con LIDAR datos de INEGI.

Los datos que arroja la herramienta SIATL sirven para calcular el caudal de la subcuenca, pero es importante desglosar cómo es que se obtienen esos datos matemáticamente, para su demostración y análisis.

La aplicación muestra (tabla 8, página 73) la Elevación máxima: 3,184 m, la mínima: 2,240 m y la media: 2,712 m del área drenada que es el área que comprende a la subcuenca analizada.

La diferencia entre la elevación máxima y mínima (H) es de: 944 m

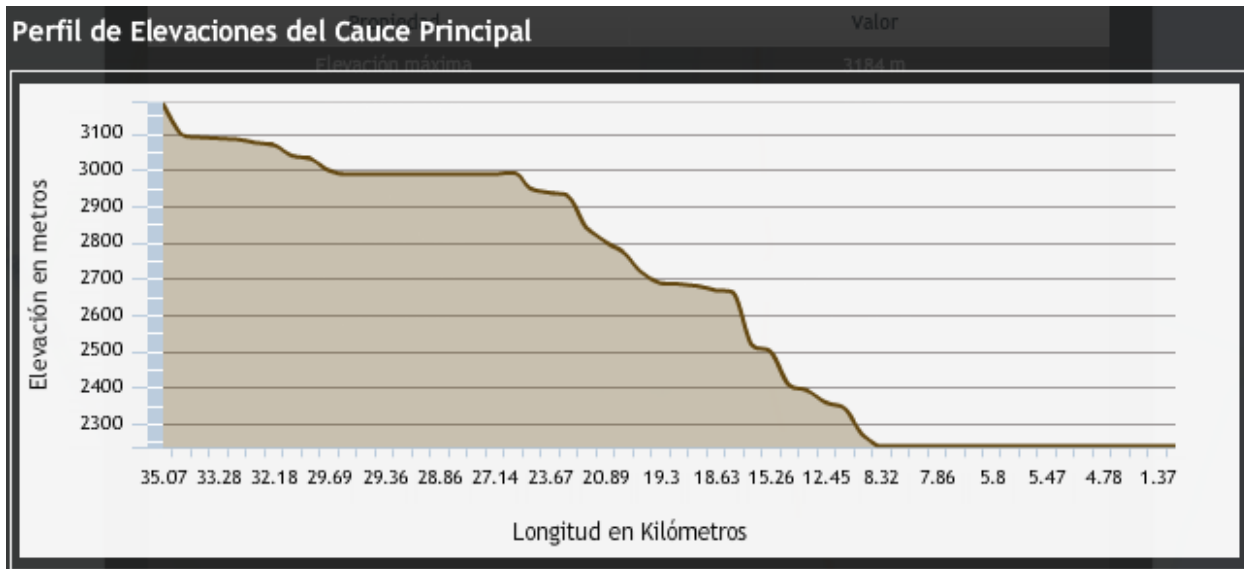
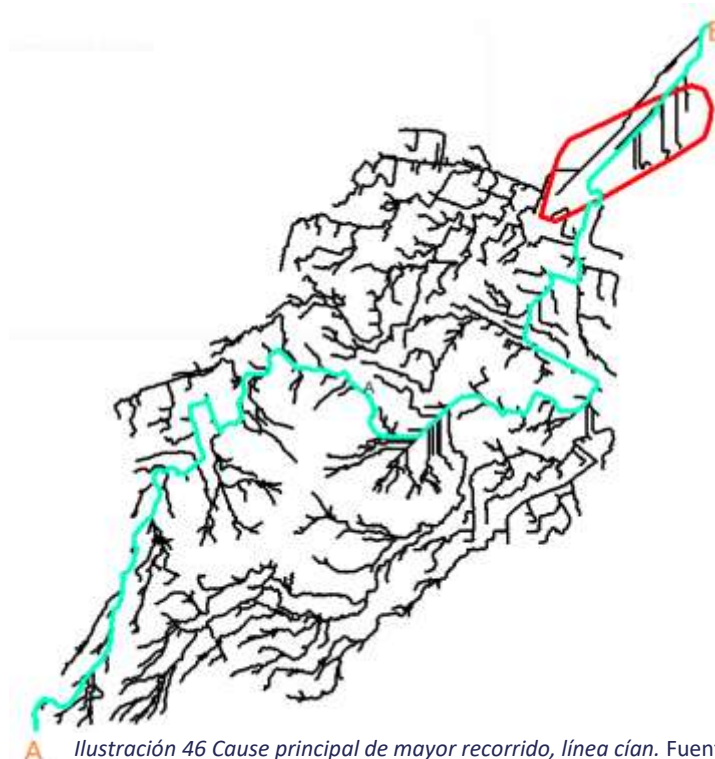


Ilustración 45 Gráfica que muestra desniveles NO PENDIENTE DE CAUSE. Fuente (SIATL, 2020)

La Longitud (L) del cauce principal va del punto A al punto B, véase en la ilustración 46, es de 35.074 km.



A Ilustración 46 Cauce principal de mayor recorrido, línea cian. Fuente propia.

La Pendiente media es la diferencia de elevaciones entre el punto más remoto y su salida, es decir, la diferencia de elevaciones del punto A y el punto B. Se calcula dividiendo  $\frac{H}{L}$ ; el valor es:  $Sc \approx 0.0269$ .

Con lo anterior es posible calcular el Tiempo de Concentración que se define como el tiempo en el que se tiene el caudal máximo, y a la vez, el tiempo mínimo en el que se drena toda la cuenca. Cuando cae una lluvia, en la zona de estudio, el tiempo que tarda en llegar el agua del punto A al punto B queda definido, de acuerdo a la fórmula de Kirpich (Martínez, 2000):

$$t_c = 0.0663 \left[ \frac{L}{\sqrt{Sc}} \right]^{0.77} ; \text{ Válida para un } t_c < 40 \text{ horas}$$

$t_c$ : Tiempo de concentración en horas,

L: longitud de cause principal, definido por el mayor recorrido en km

Sc: pendiente de la cuenca adimensional

$$t_c = 0.0663 \left[ \frac{35.074}{\sqrt{0.269}} \right]^{0.77} ; t_c \approx 1.7 \text{ horas}$$

Esto quiere decir que el momento más desfavorable es después de haber transcurrido más de hora y media de lluvia, querría decir que en ese momento toda la cuenca está aportando agua al punto B y es muy importante mencionar que justamente estaría llegando al Barrio 18.

Ahora es posible obtener, por el Método Racional, la Intensidad de lluvia que se define como la razón de incremento de la altura que alcanza la lluvia respecto al tiempo (mm de lluvia). Supongamos una lluvia torrencial de 90 mm para un periodo de retorno de 20 años.

$$I = \frac{P}{t_c} = \frac{90}{1.7} = 52.9 \frac{mm}{h};$$

I: intensidad de lluvia mm/h

$t_c$ : tiempo de concentración en horas

P: precipitación en milímetros

Coefficiente de escorrentía es la relación del caudal que fluye sobre el terreno una vez que el suelo está saturado, el valor depende fundamentalmente de las condiciones topográficas, edáficas y de su uso. La herramienta SIATL tiene una capa de coeficientes de escurrimiento de donde puede obtenerse para cualquier área del país; la subcuenca no presenta las mismas condiciones uniformemente y lo recomendable es que se efectúe una ponderación del coeficiente en la zona para determinar el valor promedio.

El procedimiento de la ponderación es el siguiente:

Se tiene un área drenada de 337.41 km<sup>2</sup>

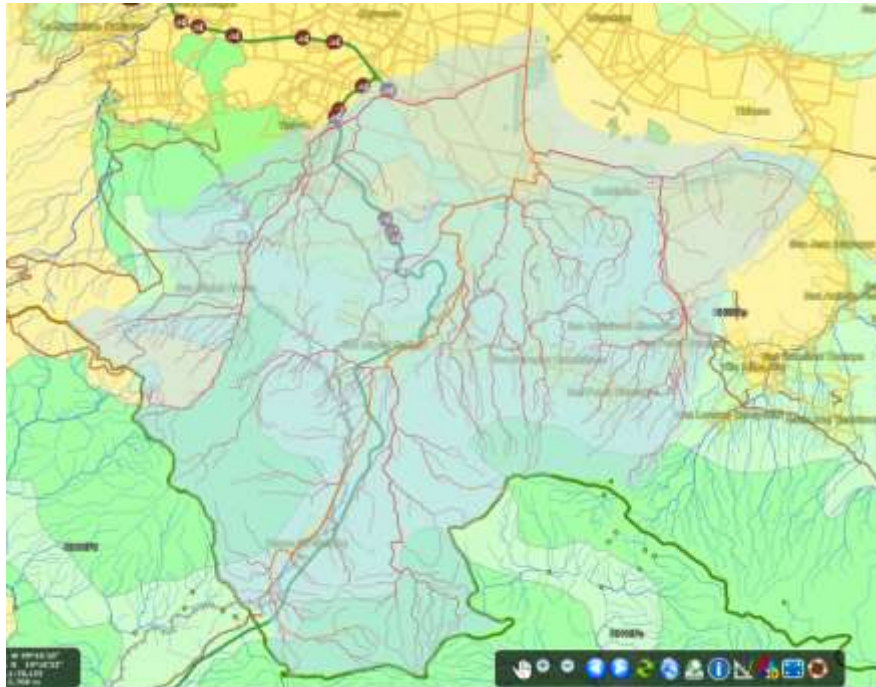





Ilustración 47 Se aprecian diferentes colores que representan los diferentes coeficientes de escurrimiento, la zona azul atenuada es el área drenada.

- 1.-  Coeficiente que va del 0% – 05% se tienen 75.17 km<sup>2</sup>
- 2.-  Coeficiente que va de 05% – 10% se tienen 190.55 km<sup>2</sup>
- 3.-  Coeficiente que va de 10% - 20% se tienen 71.69 km<sup>2</sup>

$$C = \frac{0.05*75.17+0.1*190.55+0.2*71.69}{337.41} = 0.1 \text{ Será el coeficiente que se utilice para este ejercicio.}$$

La fórmula para calcular el *gasto de la cuenca* por el método racional (INEGI, 2020) es la siguiente:

$$Q = \frac{CIA}{360}$$

Q: caudal en metros cúbicos por segundo

I: intensidad en milímetros por hora

A: superficie de la cuenca en hectáreas

C: coeficiente de escorrentía sin dimensiones

$$Q = \frac{CIA}{360} = \frac{0.1 * 52.9 * 33741}{360} = 495.8 \frac{m^3}{s}$$

Este cálculo es útil para hacer un diseño de un alcantarillado pluvial que ayude a revertir las inundaciones de la zona, ya que no ha sido suficiente el beneficio que aporta el vaso regulador. Se debe analizar con topografía fina los valles de la colonia para determinar las zonas que son más susceptibles a la inundación y subsidencia<sup>9</sup> con respecto a las adyacentes considerando lluvias de diferentes intensidades. En el inciso b de este capítulo se abordará con más detenimiento el tema.

---

<sup>9</sup> Subsidencia: en geología describe el progresivo hundimiento de una superficie, generalmente de la litosfera

*f. Determinación de las zonas de peligro.*

Metodología de Puntos azules.

Es una metodología que se implementó en el gobierno Danés, por desatarse lluvias previstas con un periodo de retorno de mil años ahora más comunes de lo que se podría pensar, destacándose lluvias torrenciales en 2010, 2013, 2014, etc. El problema con Dinamarca es similar al de la ciudad de México, en Dinamarca también se fueron propagando los asentamientos en zonas bajas y en zonas que eran humedales o lacustres.

Es necesario tener un Modelo digital de terreno de alta resolución, en este caso se obtuvo con un vehículo aéreo no tripulado (phantom 4) con el respectivo control terrestre. El modelo tiene una resolución de 0.04 metros horizontal y 0.05 de precisión vertical está proyectado en el sistema Universal Transversal de Mercator, basado en el datum WGS84.

El punto azul se definiría como el área crítica susceptible a inundación tras un aguacero, poniendo en peligro a los habitantes dentro y próximos. El modelo de geoprocésamiento busca los puntos cóncavos del Modelo de Elevación de entrada, en este caso es el MDT, para lo que se calcula la cantidad de lluvia que se requiere para ser rebasados estos puntos bajos; selecciona los edificios que se encuentran dentro de esas concavidades y los más próximos. A continuación, utiliza esta información para determinar la cantidad de lluvia que se necesita para llenar cada punto azul. Finalmente, calcula sus volúmenes y sus cuencas hidrográficas.

Aunque identificar los puntos azules sirve para ver qué edificaciones se encuentran en riesgo, no deben ser utilizados estos resultados para crear una lista negra de propiedades, sino



para centrar la atención en las áreas que pueden sufrir problemas de drenaje en caso de lluvia torrencial.

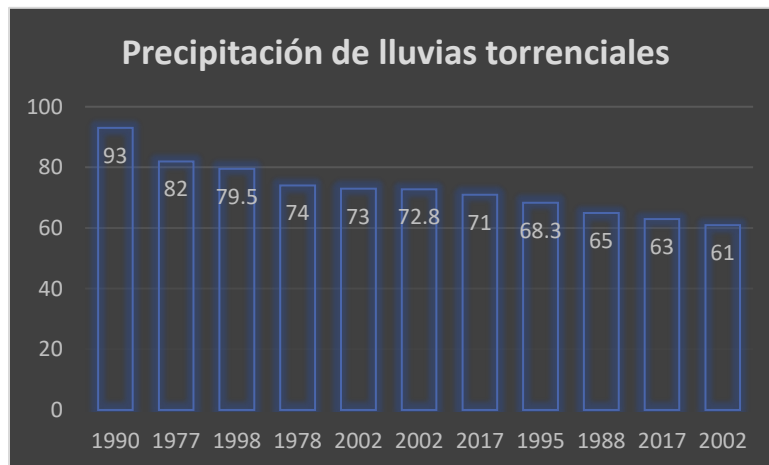
En México, la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA, 2020) a través del Servicio Meteorológico Nacional cataloga las lluvias en 4 tipos:

*Tabla 9 Catálogo de Lluvias en México*

Categoría	Intensidad de Lluvia (mm/h)
Ligeras	Menor a 5
Moderadas	Entre 5.1 y 15
Fuertes	De 15.1 a 60
Torrenciales	Mayor a 60

*Categorías creadas de acuerdo al territorio mexicano.*

Se buscó información estadística climatológica en la página de CONAGUA rastreando los datos históricos de las estaciones, específicamente la de la “Colonia Santa Úrsula Coapa” en la alcaldía Coyoacán; se seleccionó esta porque es la más cercana a la zona de estudio. Los datos que proporciona la estación son desde 1971 a 2017 (46 años), en ese tiempo se registraron 11 lluvias torrenciales (Ilustración 48)



*Ilustración 48 Información histórica que data de 1971 a 2017. Fuente propia.*

En el Atlas Nacional de Riesgos se puede encontrar isoyetas de precipitación con periodos de retorno que van de 10 a 500 años con duración de 1h y 24h; con esta información se sacan estadísticas donde se tiene lo siguiente:

Tabla 10 Precipitación 24h

Periodo de retorno/Duración	Precipitación (mm)
2 años/24h	46
5 años/24h	60
10 años/24h	68
20 años/24h	77
50 años/24h	88
100 años/24h	97
200 años/24h	105

Fuente: Atlas Nacional de Riesgos. Modelos predictivos estándar.

Tabla 11 Precipitación 1h

Periodo de retorno/Duración	Precipitación (mm)
2 años/1h	30
5 años/1h	40
10 años/1h	44
20 años/1h	50
50 años/1h	57
100 años/1h	63
200 años/1h	68

Fuente: Atlas Nacional de Riesgos. Modelos predictivos estándar.

En cualquier software para SIG se puede analizar el MDE con herramientas hidrológicas, y calcular su tamaño y volumen, también, delinear las zonas que aportan flujo de agua en caso de un aguacero; con estas básicas herramientas se creó un modelo de geoprocésamiento en ArcGIS que tiene la siguiente estructura:

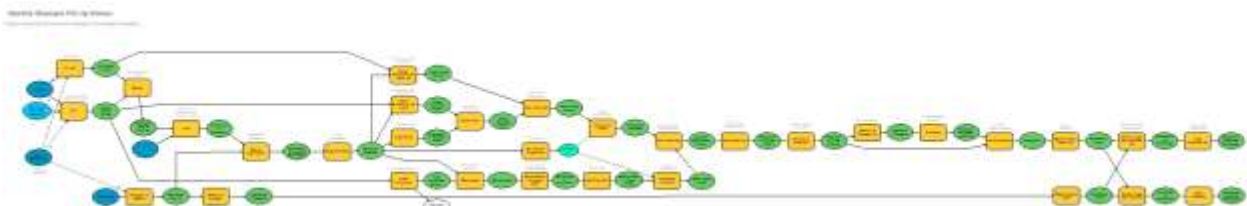


Ilustración 4935 Modelo de geoprocésamiento que funciona como un flujo de trabajo. Fuente (ESRI, 2020)

El Modelo realiza los siguientes pasos:

1.- Busca los puntos azules en el Modelo digital de terreno.

Rellenando en el MDT los sumideros que son inferiores a 0.05 metros, considerados como errores potenciales y obtener el MDT más fiel; hace un segundo relleno hasta su punto de rebosamiento y se obtiene un MDT sin sumideros; por medio de una resta se extraen los valores del MDT verdadero celda por celda para obtener un conjunto de datos raster con ubicación y profundidad de los sumideros válidos.

2.- Procesa el resultado del primer punto junto con una capa de entidades que representa a las construcciones de la zona y les da un formato correcto para realizar una selección especial.

Se realiza una evaluación condicional regresando con valores de 1 los puntos azules y con valor igual a 0 aquellos que no lo son, agrupando las celdas con valores igual a 1 que se encuentran contiguas (vertical, horizontal y diagonal); ajusta las construcciones convirtiendo de entidad a raster y regresando como entidad, procesándolo para que tome la forma de los píxeles; el modelo va creando capas con los datos que general según el diagrama de flujo.

3.- Selecciona las construcciones residentes en los puntos azules.

Usando una intersección, los edificios se comparan con los puntos azules obtenidos.

Los datos de entrada que se ingresaron al modelo se representan en las imágenes.

A continuación, los resultados que arroja el modelo:



Ilustración 50 A la izquierda MDE de entrada y a la derecha la capa de predios de la colonia. Las zonas más altas se encuentran alrededor de modelo excepto en el noreste que es la desembocadura de la cuenca. Capas con las que corrió el software para obtener los resultados de las siguientes ilustraciones. Fuente propia.

Por definición, la probabilidad de que un valor dado sea excedido durante un periodo de vida “n”, está dado por la siguiente expresión (Oberto & Livia, 2003)

$$\text{Riesgo} = 1 - P(0)$$

Donde P(0) puede ser obtenida con una distribución binomial, que es una distribución de probabilidad discreta  $p_k(k) = C_k^n p^k (1-p)^{(n-k)}$  ... .. () ;  $C_k^n = \frac{n!}{k!(n-k)!}$  ... .. ()

P= probabilidad

C= combinaciones de k<sub>0</sub> grupos en ‘n’ elementos

K= representa el número de éxitos que ocurren en ‘n’ ensayos

La probabilidad con k=0, es decir, que no se presente una lluvia torrencial en 5 años para un periodo de retorno de 2 años se calcula como sigue:

Primero se calcula la probabilidad de que una lluvia con un periodo de retorno de 2 años sea igualada o excedida en los próximos 5 años.

$$P(X \geq x) = \frac{1}{Tr} = \frac{1}{2} = 0.5$$

Ahora con la fórmula

$$P(0) = \frac{5!}{0! * (5 - 0)!} * (0.5)^0 * (1 - 0.5)^{5-0}$$

$$P(0) = 0.0312$$

Para poder obtener el riesgo de lluvia que existe

$$R = 1 - P(0) = 1 - 0.0312 = 0.96\%$$

Abajo se presenta la tabla de probabilidades con otros periodos de retorno que acompañan a diferentes intensidades de lluvia.

*Tabla 12 Probabilidad*

Tr	Precipitación (mm)	P	P(0)	R (%)
2 años	46	0.5	0.031	0.97
5 años	60	0.2	0.328	0.67
10 años	68	0.1	0.590	0.41
20 años	77	0.05	0.774	0.23
50 años	88	0.02	0.904	0.10
100 años	97	0.01	0.951	0.05
200 años	105	0.005	0.975	0.02

*De que ocurra o rebase una lluvia torrencial (R) con un Tr asociado*

Adjuntos al final de esta tesis se encuentran los mapas que se han generado, por ejemplo, la ilustración 51 redirecciona al mapa 1 “Precipitación y zonas de riesgo”, que se encuentra al final de este documento, para poder apreciar los componentes completos que proporcionan los mapas. En este primer mapa se asume que el drenaje no funciona.



Ilustración 51 mapa 1 "Precipitación y zonas de riesgo". Imagen que muestra las zonas más susceptibles a inundación suponiendo que el alcantarillado es disfuncional. 'Tr' refiere a la tasa de retorno o periodo de retorno. Fuente propia.



Ilustración 52 Mapa 2 "Precipitación y zonas de riesgo". Zonas susceptibles a inundación con sistema de alcantarillado funcional a 40mm. Tr refiere a la tasa de retorno o periodo de retorno. Fuente propia.

En la imagen 52 se aprecian las zonas de inundación suponiendo que el sistema de alcantarillado funciona bien, las áreas más bajas siguen siendo las mismas, lo importante es ver con qué cantidad de precipitación se inundaría la colonia, es decir, se requeriría una lluvia de un periodo de retorno más largo.

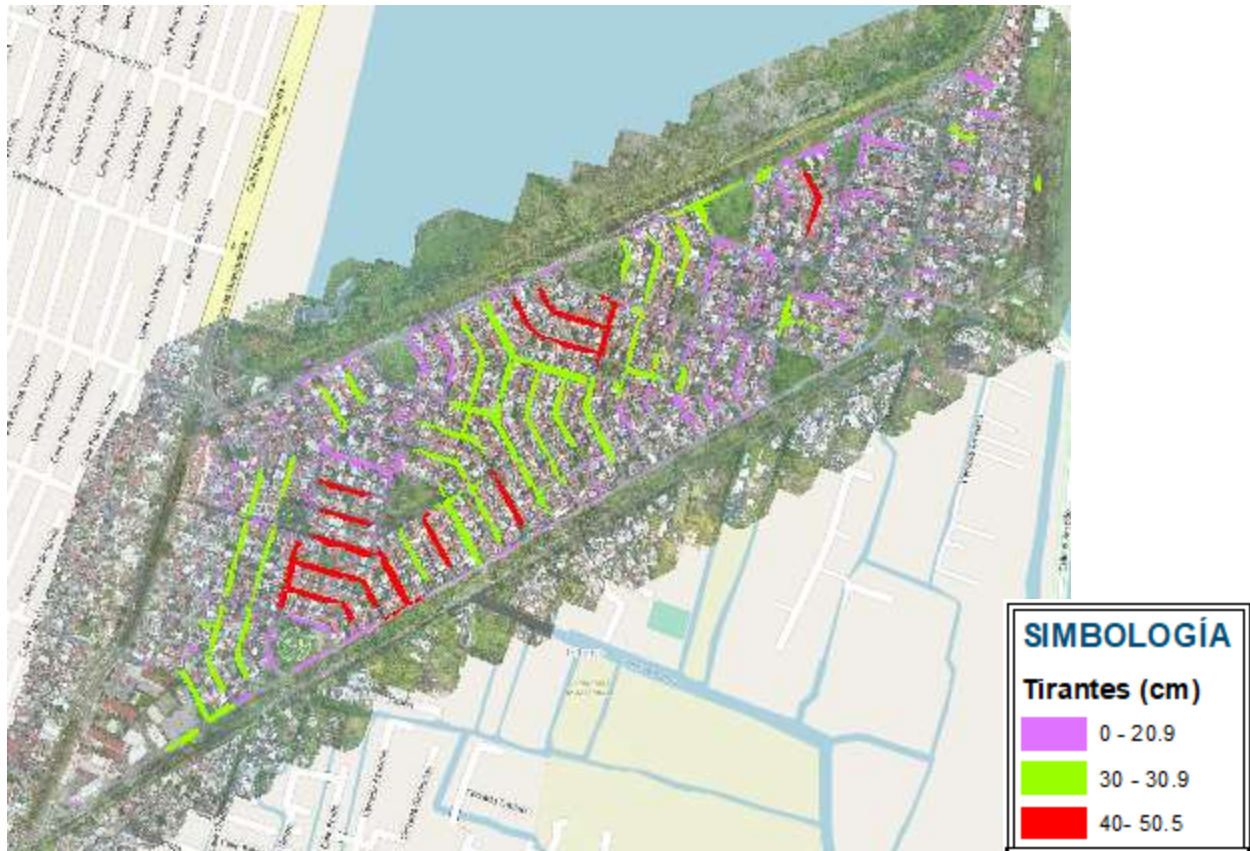


Ilustración 53 Mapa 3 "Tirantes" que muestra los tirantes en cm de los encharcamientos en la zona. Fuente propia.

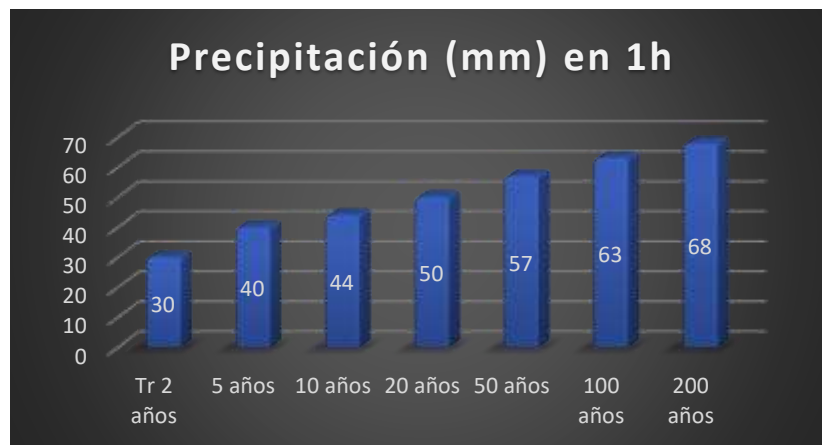


Ilustración 54 Gráfica ilustrativa de la precipitación de acuerdo al periodo de retorno en 1 hora. Fuente propia

En la ilustración 55 se muestran las microcuencas que aportan agua a los encharcamientos.

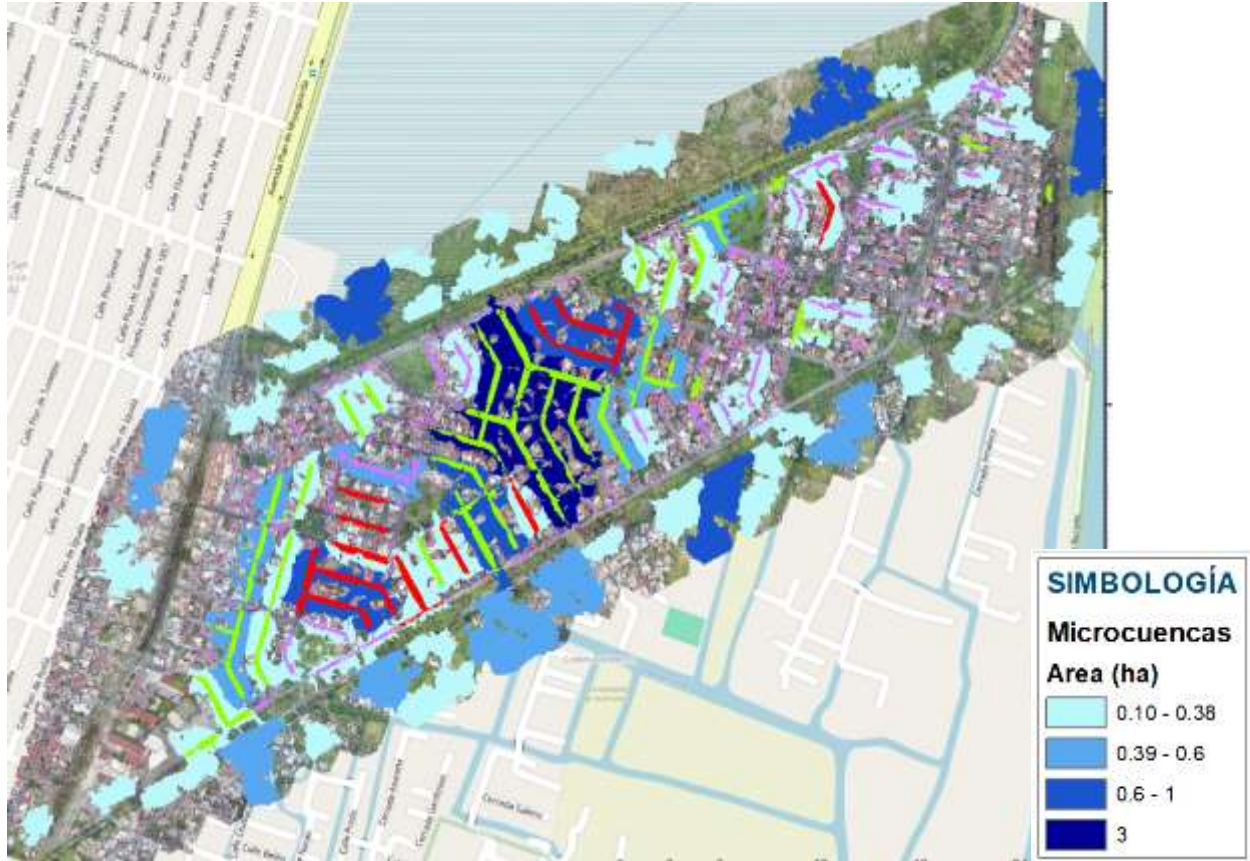


Ilustración 55 Mapa 4 "Microcuencas". Microcuencas que aportan agua a las zonas afectadas. Fuente propia.

Y finalmente se muestran las edificaciones afectadas por las lluvias más probables, así es como se aprecia que prácticamente toda la colonia es afectada por las inundaciones que cada año padece la zona, sin embargo, de acuerdo a los testimonios de los pobladores y los resultados de los estudios, el problema de inundación en esta colonia es la insuficiencia de su sistema de alcantarillado, debido a que no es necesario esperar una lluvia de una intensidad con un periodo de retorno asociado de 500 años, ni siquiera de 50 años; se requieren lluvias con periodos de retorno de 2 años para afectar la zona. Los vecinos manifiestan que cuando



llueve, lejos de que el agua siga su flujo hacia el drenaje, es del drenaje de donde sale agua hacia las calles, por lo que se convierte en un problema de salubridad.



Ilustración 56 Mapa 5 "Edificaciones vulnerables". Edificaciones afectadas con una lluvia menos a 30mm, de hasta 20 cm de tirante con un periodo de retorno asociado a 2 años. Suponiendo que el drenaje no funciona. Fuente propia.

## VI. Posibles acciones para la mitigación.

### Barrer y levantar basura.

Una manera de mitigar el daño es que los habitantes se acostumbren a colectar la basura de sus calles, sobre todo en época de lluvias, para prevenir taponeos en las coladeras y tubos de drenaje y no se generen obstrucciones que impidan el paso libre al agua. Este tipo de acciones que parecen insignificantes traen más beneficios de los que se cree.

### Estudio Hidrodinámico.

La elaboración de un mapa de riesgo de inundación es primordial, se hace una modelación visual y dinámica para ayudar a entender mejor la dirección que toma el agua en cierto contexto, al aportar datos reales y precisos prácticamente se vislumbra el problema digitalmente. Este estudio resulta útil para la implementación de obras efectivas tanto estructurales como no estructurales, pero es importante conocer la naturaleza del sitio para tomar decisiones de mitigación (Riccardi, 1997). Se recomienda que considere el funcionamiento del drenaje para el escurrimiento del agua producido por una lluvia con un periodo de retorno mayor a 5 años.

### Desazolve de drenaje.

Una tarea que parece no tener fin; todos los días se sacan del drenaje de la ciudad de México 550,000 m<sup>3</sup> de todo tipo de materiales, si consideramos camiones de 7m<sup>3</sup> de capacidad se tienen 70,000 viajes de camiones para mantener en condiciones regulares el sistema de alcantarillado, 12 presas, 5 lagunas y 2 ríos.

Aún en la segunda ciudad más grande del mundo no se tiene la educación cívica básica para una convivencia más armónica: la conciencia de no tirar basura, y no solo eso sino, limpiar nuestros espacios públicos para un mejor orden.

En la Ciudad de México (CDMX) se tiene un organismo que actúa en el área de saneamiento el “Sistema de aguas de la Ciudad de México” (SACMEX, 2020) quienes implementan el operativo de lluvias para disminuir tiempos de solución y atención en un aguacero que genere encharcamientos, efectos sobre infraestructura, desazolve de drenajes y hacer llegar información a la ciudadanía para explicar las medidas que pueden tomar.

Los vecinos pueden coordinarse y realizar una solicitud a través del portal del SACMEX, describiendo de manera clara y sucinta el servicio que requiere, así como el acto o hechos en que se apoye su petición, en este caso el estudio realizado sería un argumento a favor de la necesidad de un desazolve general.

La responsabilidad de que un drenaje funcione adecuadamente la tenemos todos, autoridades y habitantes.

#### Capacidad de drenaje.

Además, es importante saber cuál es el estado actual del sistema de drenaje local físicamente, ya que los vecinos han referido que existen tuberías rotas; si una parte está dañada entonces todo el sistema no funciona correctamente. La SACMEX manifestó que el sistema de drenaje está pandeado, roto y fracturado, llevaron a cabo un estudio de calas para revisarlo en diferentes puntos.

El diámetro de los tubos de drenaje depende de cuándo haya sido erguido éste y para cuántos años fue proyectado, es importante porque si ya está obsoleto es una razón más para que no se de abasto cuando viene una lluvia.

Cambios en la topografía del terreno que muevan el drenaje también es factor a revisar.

En abril de 2019 la Dra. Claudia Sheinbaum recalcó que se iba a apoyar a Barrio 18 con el tema del drenaje (Ayala, 2019).

## Implementación de un Sistema Urbano de Drenaje Sostenible (SUDS)

La manera en que el ser humano ha desarrollado las zonas urbanas creando vías rápidas con materiales que son impermeables desata cambios en el ciclo hidrológico natural. Cada obra de infraestructura que se realiza resulta insuficiente, señal de que lo que se requiere es la implementación de un sistema que combine aspectos hidrológicos, mediambientales y sociales y es precisamente eso lo que proponen los SUDS para minimizar impactos de desarrollo urbano tomando en cuenta el flujo natural del agua y topografía del lugar, así como zonas verdes. Esta acción se recomienda para toda la ciudad.

## Obras de infraestructura como Laguna de regulación “Ciénega Chica”.

Se encuentra ubicada al norte de la colonia Barrio 18, apreciable en la ilustración 57 con el nombre de: Vaso regulador.

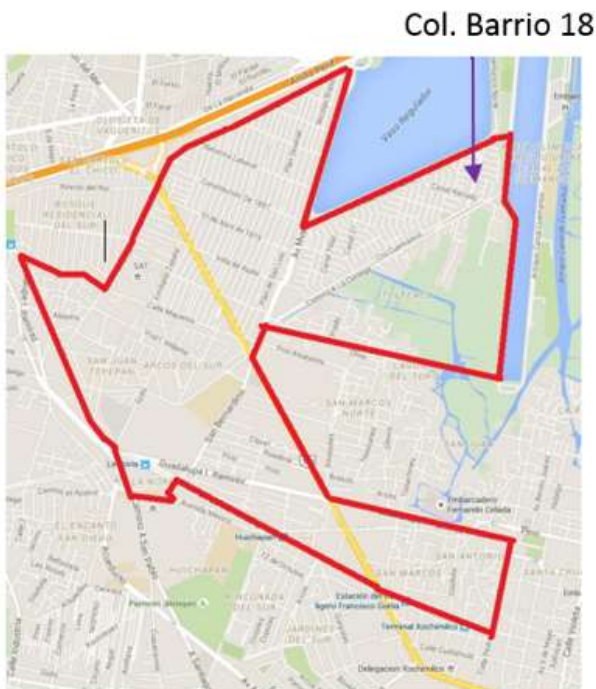


Ilustración 57 Zona afectada por inundaciones. Fuente Gonzales, 2016. Imagen modificada.

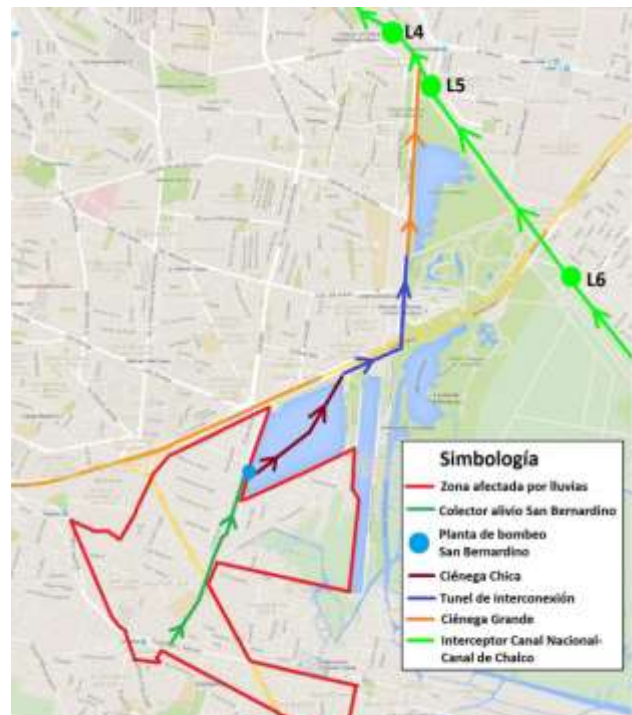


Ilustración 58 Mapa que muestra el colector de alivio y la planta de bombeo.

La insuficiencia de conducción y desalojo de los caudales pluviales, cuando se presenta un aguacero, es un causante más. En 2012 SACMEX implementó las obras: colector de alivio “San Bernardino”, y planta de bombeo de aguas combinadas San Bernardino (capacidad de 7,000 l/s) para aliviar infraestructura primaria existente de drenaje.

“La Planta de Bombeo de Aguas Combinadas San Bernardino descarga en el vaso regulador “Ciénega Chica”; mismo que posteriormente descarga a través del túnel de interconexión en el vaso regulador “Ciénega Grande”, que a su vez descarga en el Interceptor Canal Nacional-Canal de Chalco” (Gonzales, 2016) como se muestra en la ilustración 58.

Estas obras han ayudado a disminuir considerablemente los problemas, sin embargo, a fecha de esta tesis los vecinos de barrio 18 siguen quejándose de inundaciones.

En febrero de 2014 se llevó a cabo la rehabilitación para incrementar la capacidad de regulación de la “Ciénega Grande”.

Los vecinos refieren que el vaso “Ciénega Chica” inclusive se ha desbordado, aportando más agua a la colonia, la cual, topográficamente queda más baja que el vaso, convendría hacer una revisión de obra civil para calcular si se puede realizar una rehabilitación para incrementar la capacidad de “Ciénega Chica”.

## **VII. Conclusiones**

Aunque la tecnología empleada y la información disponible presentan limitaciones para hacer un análisis hidrológico riguroso, el trabajo desarrollado es un aporte significativo a las propuestas para la solución del problema de inundación que acontece en esa zona. Está constatado que el problema inicial es la zona geográfica al tratarse de una cuenca, así como el tipo de suelo lacustre, a pesar de ello y con fundamento en el análisis anterior, se determina que los problemas disminuirían si el sistema de drenaje fuera cambiado por uno eficiente, todo indica que es ahí donde se tiene el nudo que provoca estas inundaciones que han dañado el patrimonio de los habitantes de la zona.

Con la experiencia obtenida de este trabajo salta a la vista la potencial tecnología que representan los VANT, sin embargo, la tarea aún no está completa y es preciso mejorar esta tecnología para obtener verdadera fiabilidad y no sólo utilizarlos por la mercadotecnia, fama y moda que embrolla a estos instrumentos, con respecto al terreno Geomático o ingenieril.

El uso de los VANT a la fecha, sirven bien a propósitos de anteproyectos o análisis previos porque proporcionan un panorama general del problema a un costo menor y en un tiempo corto. No deben ser utilizados para la obtención de productos finales o durante el desarrollo de una obra ingenieril que requiera seriedad en la precisión.

La Ciudad de México siempre va a ser una zona susceptible a inundaciones por su naturaleza, inclusive, todas las obras estructurales que se han realizado para frenar las inundaciones desde la época en que los españoles llegaron a este territorio ha resultado un rotundo fracaso. El arquitecto contemporáneo Alberto Kalach, creador de la Biblioteca

Vasconcelos y la Galería Kurimanzutto, ha hecho una propuesta interesante: replantear las ciudades.

Propone recuperar lagos, ríos, humedales y cañadas de nuestras cuencas, es decir, habilitarlos en su forma natural “como una Venecia”, claro que esto implicaría cambiar el clima de la ciudad, la dinámica social, incrementar el paisaje en un 1000%, ordenar el desarrollo urbano para que siga el perímetro de los lagos, repensar el sistema de transporte urbano, no obstante, esto acarrearía consigo grandes beneficios como un aire más puro, se abatiría la contaminación del aire un 30%, posibilidad de ver el entorno natural y bellissimo del rededor, salud y bienestar. La sociedad tendría que respetar el entorno, esa es la parte más difícil.

En segundo lugar, se debe realizar una reforestación intensiva de toda la cuenca, el bosque es una fábrica de agua, ayuda a que el agua se infiltre al acuífero para su ciclo natural y con ello se evitarían muchas inundaciones, el arquitecto también menciona que hay que pensar y hacer la reforestación de las azoteas y explanadas de estacionamientos, sustituir pornografía publicitaria por árboles.

Descentralizar la ciudad es una medida importante, la mancha urbana ya no debe explayarse más, si el crecimiento continúa como hasta ahora, en 10 años la CDMX será un desierto.

## Bibliografía

Abreco. (2019). *Topcon GTS-2010.CDMX, México*. Ciudad de México: Abreco.

Alfa Topografía. (17 de julio de 2017). *GNSS South Galaxy New G1 plus (SuperRTK)*. Obtenido de Alfa Topografía: <https://www.alfatopografia.com/product-page/gnss-south-galaxy-g1-plus-new-superrtk>

Ayala, C. (14 de abril de 2019). *Reabren carretera de Xochimilco a Tulyehualco*. Obtenido de EL ECONOMISTA: <https://www.economista.com.mx/estados/Reabren-carretera-de-Xochimilco-a-Tulyehualco-20190414-0107.html>

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*. Madrid: Madrid.

Cartografía. (2007).

Cheng, Y., Xue , D., & Li , Y. (2007). A Fast Mosaic Approach for Remote Sensing Images. *International Conference on Mechatronics and Automation* (pág. 1). Harbin: IEEE.

CONAGUA. (11 de febrero de 2020). *Glosario Técnico*. Obtenido de smn: <https://smn.conagua.gob.mx/es/smn/glosario>

DJI. (12 de junio de 2016). *How to Calibrate the Vision Positioning System on DJI Phantom 4*. Obtenido de youtube: <https://www.youtube.com/watch?v=mYSqz7R5zwl>

DJI. (26 de abril de 2016). *PHANTOM 4 SPECS*. Obtenido de DJI: <https://www.dji.com/phantom-4/info>

EDEMEX. (04 de febrero de 2020). *Pista Olímpica de Remo y Canotaje Virgilio Uribe*. Obtenido de Edificios de México: [https://www.edemx.com/citymex/estadios/Pista\\_canotaje.html](https://www.edemx.com/citymex/estadios/Pista_canotaje.html)



El Universal. (28 de enero de 2013). Ecocidio en Xochimilco. Ciudad de México, Metrópoli, México.

ESA. (23 de octubre de 2015). *Mexico city*. Obtenido de European Space Agency:

[https://www.esa.int/ESA\\_Multimedia/Search?SearchText=MEXICO&result\\_type=images](https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Search?SearchText=MEXICO&result_type=images)

ESRI. (11 de febrero de 2020). *Buscar áreas con riesgo de inundación en un aguacero*. Obtenido de argis:

<https://learn.arcgis.com/es/projects/find-areas-at-risk-of-flooding-in-a-cloudburst/>

Felicísimo, Á. (1994). *Modelos digitales del terreno*. Oviedo: Pentalfa.

GDF. (06 de mayo de 2005). Decreto que contiene el programa delegacional de Desarrollo Urbano para

la delegación del Distrito Federal en Xochimilco. *Gaceta Oficial del Distrito Federal*, pág. 32.

GEOHIDROTEC. (05 de febrero de 2020). *Estación Total Modelo GPT3005LW*. Obtenido de

GEOHIDROTEC SAC: <http://geohidrotec.com/wp2/equipos-topograficos/estaciones-totales-modelo-gpt3005lw/>

Ghilani, C., & Wolf, P. (2012). *Elementary Surveying an Introduction to Geomatics*. New Jersey: Pearson.

Ghilani, C., & Wolf, P. (2012). *Elementary Surveying an Introduction to Geomatics* . New Jersey: Pearson.

Gonzales, G. (2016). *DESAZOLVE DEL VASO REGULADOR "CIÉNEGA GRANDE"*. Ciudad de México: UNAM.

Google Earth. (06 de febrero de 2020). Barrio 18, Xochimilco. Ciudad de México, Xochimilco, México.

GOOGLEMAPS. (04 de febrero de 2020). *Barrio 18* . Obtenido de Google Maps:

<https://www.google.com/maps/place/Barrio+18,+Ciudad+de+M%C3%A9xico,+CDMX/@19.2843649,-99.1204416,15z/data=!3m1!4b1!4m5!3m4!1s0x85ce017a83cdbe2b:0x906fda5372950f02!8m2!3d19.2805633!4d-99.1117223>

Hofman-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Collins, J. (1997). *GPS Theory and Practice*. Austria: Springer-Verlag Wien New York.

Homeland Security. (2019). *Memorandum for U. S. owners and operators using GPS to obtain utc time* .

Obtenido de Homeland Security: [https://www.us-cert.gov/sites/default/files/documents/Memorandum\\_on\\_GPS\\_2019.pdf](https://www.us-cert.gov/sites/default/files/documents/Memorandum_on_GPS_2019.pdf)

INEGI. (2010). *CENSO*. CIUDAD DE MÉXICO: INEGI.

INEGI. (2020). *CÁLCULO DE GASTO O CAUDAL* . Aguascalientes: INEGI.

INEGI. (07 de febrero de 2020). *Geoide Gravimétrico Mexicano* . Obtenido de INEGI:

<https://www.inegi.org.mx/temas/geoide/>

INEGI. (06 de febrero de 2020). *Red Geodésica Nacional Activa*. Obtenido de INEGI:

[https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia\\_activa/](https://www.inegi.org.mx/temas/geodesia_activa/)

INEGI. (11 de febrero de 2020). *SIMULADOR DE FLUJOS DE AGUA DE CUENCAS HIDROGRÁFICAS*.

Obtenido de SIATL: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/)

Legrá Lobaina, A., Atanes Beatón, D., & Guilarte Fuentes, C. (2014). Cntribución al método de interpolación lineal con triangulación de Delaunay. *Minería y Geología*, 58-72.

Martínez, S. I. (2000). *Introducción a la Hidrología Superficial*. Aguascalientes: Universidad Autónoma de Aguascalientes.

Núñez Pérez, M. (16 de febrero de 2020). *CÓMO ELEGIR EL TIEMPO DE CONCENTRACIÓN ADECUADO*.

Obtenido de eimaformacion: <http://eimaformacion.com/como-elegir-el-tiempo-de-concentracion-adeecuado/>

Oberto, R., & Livia, R. (2003). *PROBLEMARIO DE HIDROLOGÍA APLICADA A LA INGENIERÍA CIVIL*.

Barquisimeto: UCLA.

Paine, D. (1981). *Aerial Photography and Image interpretation for Resource Management*. United States of America: Jhon Wiley & Sons, Inc.

PIX4D. (2011). *Requisitos del sistema: Especificaciones del equipo mínimas y recomendadas*. Obtenido de PIX4D: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/360033277232-Requisitos-del-sistema-Especificaciones-del-equipo-m%C3%ADnimas-y-recomendadas>

PIX4D. (10 de febrero de 2020). *Pix4Dcapture*. Obtenido de pix4d: <https://www.pix4d.com/es/producto/pix4dcapture>

PIX4D. (10 de febrero de 2020). *TOOLS - GSD calculator*. Obtenido de pix4d: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560249-TOOLS-GSD-calculator>

Prieto, G. (05 de diciembre de 2016). *Historia de la Ciudad de México a través de los mapas*. Obtenido de Geografía Infinita: <https://www.geografiainfinita.com/2016/12/evolucion-de-la-ciudad-de-mexico-a-traves-de-los-mapas/>

Quintero, J. (19 de octubre de 2011). Levantan muro de ignominia en zona chinampera de Xochimilco. *La Jornada*, pág. 39.

Riccardi, G. A. (30 de septiembre de 1997). *Elaboración de mapas de riesgo de inundación por medio de la modelación matemática hidrodinámica*. Obtenido de IWAPONLINE: [https://watermark.silverchair.com/ia19972729.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kKhW\\_Ercy7Dm3ZL\\_9Cf3qfKAc485ysgAAAhcwggITBgkqhkiG9w0BBwagggIEMIICAAIBADCCAFkGCSqGSib3DQE HATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMWOSYDconR0pcESR0AgEQgIIBytRbmNNpf\\_yXfcDWpq8JNiu04QsIxIhrelayvEnT4dk3](https://watermark.silverchair.com/ia19972729.pdf?token=AQECAHi208BE49Ooan9kKhW_Ercy7Dm3ZL_9Cf3qfKAc485ysgAAAhcwggITBgkqhkiG9w0BBwagggIEMIICAAIBADCCAFkGCSqGSib3DQE HATAeBglghkgBZQMEAS4wEQQMWOSYDconR0pcESR0AgEQgIIBytRbmNNpf_yXfcDWpq8JNiu04QsIxIhrelayvEnT4dk3)

- SCT. (05 de febrero de 2020). *INSTRUCTIVO RPAS-REGISTRO EN LÍNEA*. Obtenido de AERONÁUTICA CIVIL:  
<http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/aeronautica-civil/3-servicios/35-rpas-drones/>
- SEGOB. (20 de julio de 2016). *Norma Técnica para Levantamientos Aerofotográficos con Cámara Aérea Digital con Fines de Generación de Información Geográfica*. Obtenido de Diario Oficial de la Federación: [http://www.dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5445299&fecha=20/07/2016](http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5445299&fecha=20/07/2016)
- SIATL. (04 de febrero de 2020). *Simulador de flujos de agua de cuencas hidrográficas*. Obtenido de INEGI: [http://antares.inegi.org.mx/analisis/red\\_hidro/siatl/#](http://antares.inegi.org.mx/analisis/red_hidro/siatl/#)
- SOUTH. (2015). *Chapter 2 Galaxy G1 Mesuring System*. 13: julio .
- Suárez, E. (2020). *Sistema de navegación para personas no videntes, mediante el uso del sistema de posicionamiento híbrido (GPS & GLONASS), para la universidad de las fuerzas armadas* .  
Obtenido de ESPE: <https://repositorio.espe.edu.ec/bitstream/21000/9975/2/T-ESPEL-ENI-0344-P.pdf>
- UNESCO. (2006). *Resumen del plan integral y estructura de gestión del polígono de Xochimilco, Tlahuac y Milpa Alta, inscrita en la lista del patrimonio mundial de la UNESCO*. D. F.: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
- Zelaya, C., Guevara, R., Ricardo, N., & Pacas, A. (2016). *Aplicación de fotogrametría aérea en levantamientos topográficos mediante el uso de vehículos aéreos no tripulados*. San Miguel: El salvador.

# Glosario

## A

acuífero: Dicho de una capa o vena subterráneas; Que contiene agua.

Altitud: Elevación o altura sobre el nivel del mar.

ambigüedades: Incertidumbre por un número arbitrario de ciclos.

azimut: ángulo medido en el plano horizontal desde el norte geográfico en el sentido de las agujas del reloj, y varía de 0° a 360°.

## C

calibrar: Ajustar, con la mayor exactitud posible, las indicaciones de un instrumento de medida con respecto a un patrón de referencia.

cenit: Intersección de la vertical de un lugar con la esfera celeste, por encima de la cabeza del observador.

cuenca: Territorio rodeado de alturas.

cuenca endorreica: cuenca cerrada.

## D

distancia focal: distancia entre el centro óptico del objetivo, y el sensor o plano focal sobre el cual se proyecta la imagen.

## E

elipsoide: Esfera imperfecta. para definir con mayor precisión la forma de la Tierra y otros planetas.

escala: Tamaño de un mapa, plano, diseño, etc.

estereoscopio: Aparato en el que, mirando con ambos ojos, se ven dos imágenes de un objeto, que, al fundirse en una, producen una sensación de relieve por estar tomadas con un ángulo diferente para cada ojo.

## F

fotogrametría: Procedimiento para obtener planos de grandes extensiones de terreno por medio de fotografías aéreas.

## **G**

geodesia: Ciencia matemática que tiene por objeto determinar la figura y magnitud del globo terrestre o de gran parte de él, y construir los mapas correspondientes.

geoide: Forma teórica de la Tierra determinada por la geodesia.

Geomática: Disciplina que se ocupa de la obtención, almacenamiento, análisis y explotación de la información geográfica.

georreferenciación: uso de coordenadas de mapa para asignar una ubicación espacial a entidades cartográficas.

## **H**

hidrografía: Conjunto de las aguas de un país o región.

Hidrología: Disciplina que estudia las aguas de la Tierra.

## **I**

isoyetas: Curva para la representación cartográfica de los puntos de la Tierra con el mismo índice de pluviosidad media anual.

## **L**

levantamientos topográficos: Actividades llevadas a cabo para describir la composición geométrica de una porción terrestre.

LIDAR: Tecnología que emplea luz láser para medir la distancia y crear mapas y modelos 3D de alta precisión.

## **M**

mitigar: Moderar, aplacar, disminuir o suavizar algo riguroso o áspero.

Modelo Digital de Elevación: representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar.

Modelo Digital de Terreno: conjunto de capas que representan distintas características de la superficie terrestre derivados del

MDE

## **O**

Ortomosaico: producto de imagen fotogramétricamente ortorrectificado organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes.

Ortorectificación: Proceso fotogramétrico que asegura que los elementos de la imagen o píxeles, estén en su respectiva posición geográfica.

## P

pendiente: Medida de la inclinación de una recta o de un plano.

Percepción Remota: ciencia de obtener información acerca de un objeto, utilizando luz visible o invisible, por medio del análisis automatizado de datos obtenidos a distancia por un sensor remoto.

pixel: Unidad de medida de una imagen.

precipitación: Agua procedente de la atmósfera, y que en forma sólida o líquida se deposita sobre la superficie de la tierra.

## R

resolución: número de píxeles que contiene una imagen.

rumbo: Ángulo formado por una línea de dirección utilizando como línea de base el Norte magnético, medido con la brújula.

## S

*Satélite*: Vehículo espacial, tripulado o no, que se coloca en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva aparatos apropiados para recoger información y transmitirla.

sensor: Dispositivo que detecta una determinada acción externa, temperatura, presión, etc., y la transmite adecuadamente.

socavon: Hundimiento del suelo por haberse producido una oquedad subterránea.

subcuenca: Cuenca dentro de otra cuenca.

## T

teodolito: instrumento de medición óptico-mecánico que mide ángulos verticales y horizontales con una precisión de hasta 0.1

topografía: Técnica de describir y delinear detalladamente la superficie de un terreno.

torrencial: abundante e imprtuoso

tránsito: Instrumento topográfico para medir ángulos verticales y horizontales, con una precisión de 1 minuto o 20 segundos

- Important:** Click on the different icons for:
  - Help to analyze the results in the Quality Report
  - Additional information about the sections

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

## Summary

Project	2019_08_14_XOCHIMILCO_PHANTOM4_100M
Processed	2019-08-16 14:02:35
Camera Model Name(s)	FC330_3.6_4000x3000 (RGB)
Average Ground Sampling Distance (GSD)	4.44 cm / 1.75 in
Area Covered	0.913 km <sup>2</sup> / 91.2962 ha / 0.35 sq. mi. / 225.7147 acres

## Quality Check

<b>Images</b>	median of 40372 keypoints per image	✓
<b>Dataset</b>	517 out of 517 images calibrated (100%), all images enabled	✓
<b>Camera Optimization</b>	1.73% relative difference between initial and optimized internal camera parameters	✓
<b>Matching</b>	median of 6571.11 matches per calibrated image	✓
<b>Georeferencing</b>	yes, 7 GCPs (7 3D), mean RMS error = 0.064 m	✓

## Preview

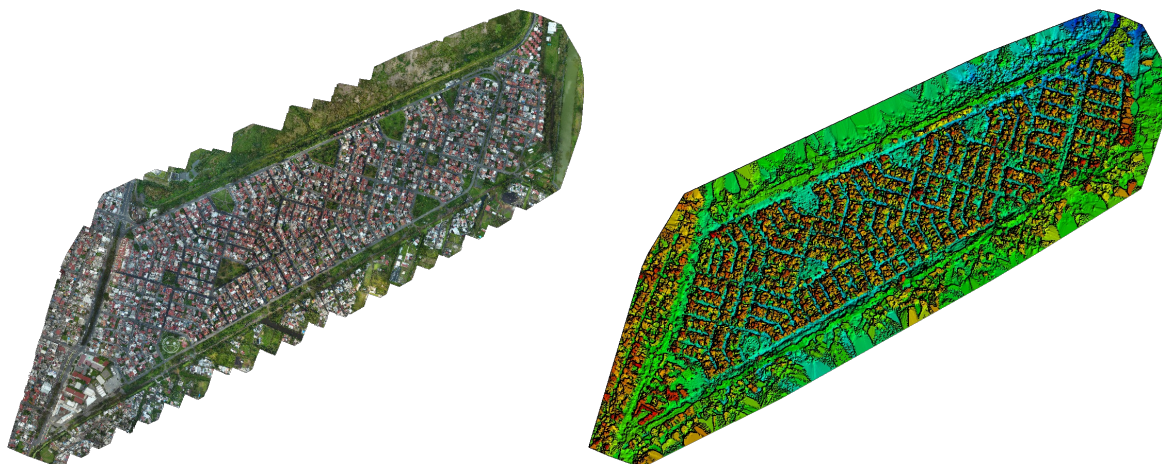


Figure 1: Orthomosaic and the corresponding sparse Digital Surface Model (DSM) before densification.

## Calibration Details

Number of Calibrated Images	517 out of 517
Number of Geolocated Images	517 out of 517



## Initial Image Positions

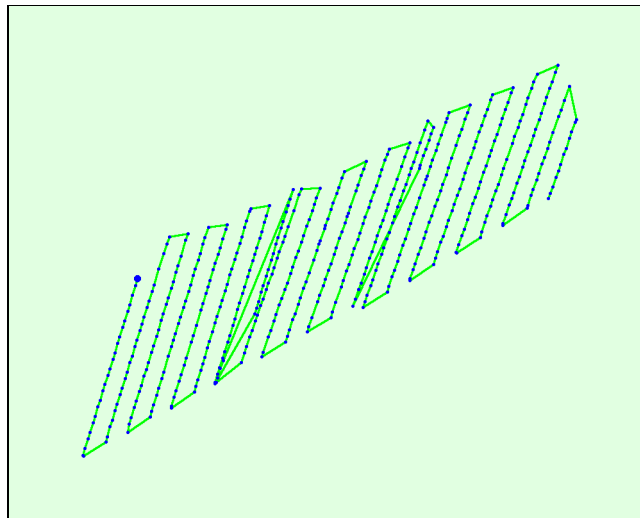
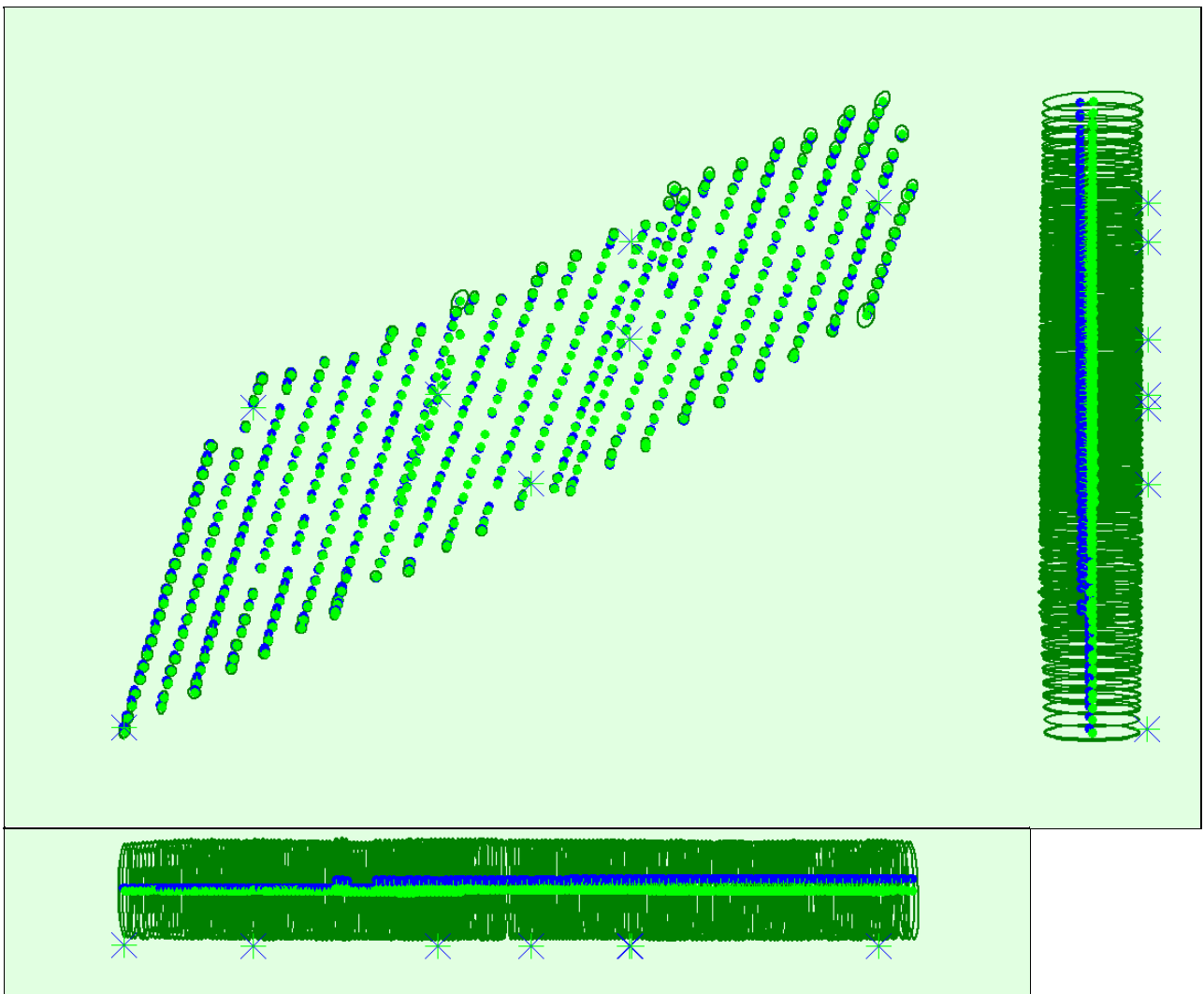


Figure 2: Top view of the initial image position. The green line follows the position of the images in time starting from the large blue dot.

## Computed Image/GCPs/Manual Tie Points Positions



Uncertainty ellipses 500x magnified

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

## 🔍 Absolute camera position and orientation uncertainties



	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.014	0.016	0.181	0.008	0.007	0.003
Sigma	0.003	0.004	0.002	0.002	0.002	0.001

## 🔍 Overlap

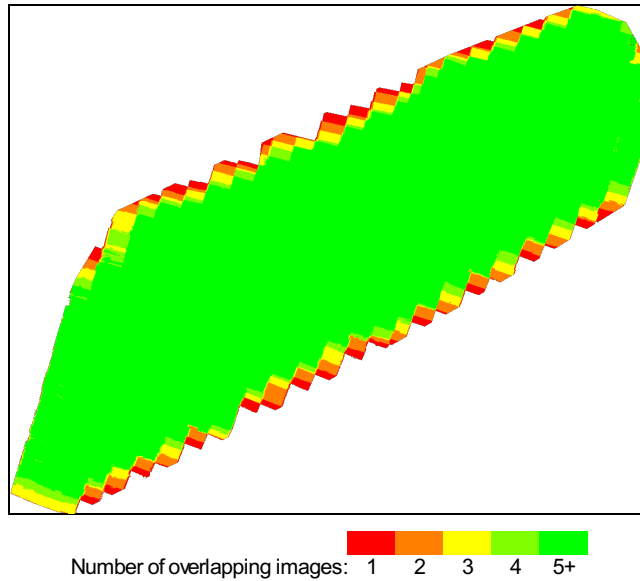


Figure 4: Number of overlapping images computed for each pixel of the orthomosaic. Red and yellow areas indicate low overlap for which poor results may be generated. Green areas indicate an overlap of over 5 images for every pixel. Good quality results will be generated as long as the number of keypoint matches is also sufficient for these areas (see Figure 5 for keypoint matches).

## Bundle Block Adjustment Details



Number of 2D Keypoint Observations for Bundle Block Adjustment	3504012
Number of 3D Points for Bundle Block Adjustment	1207098
Mean Reprojection Error [pixels]	0.151

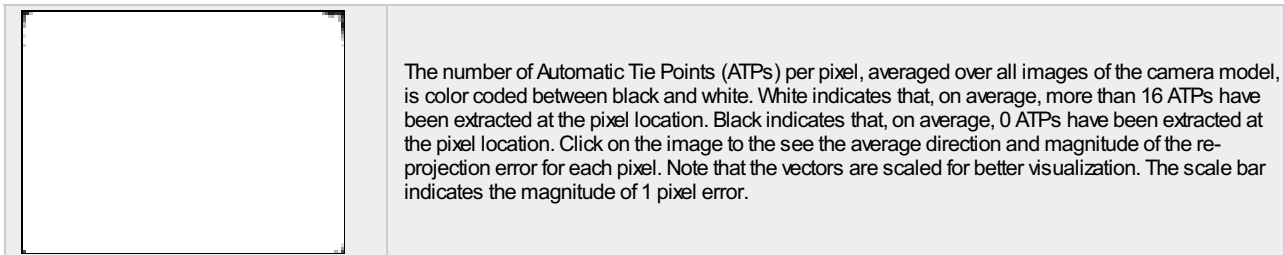
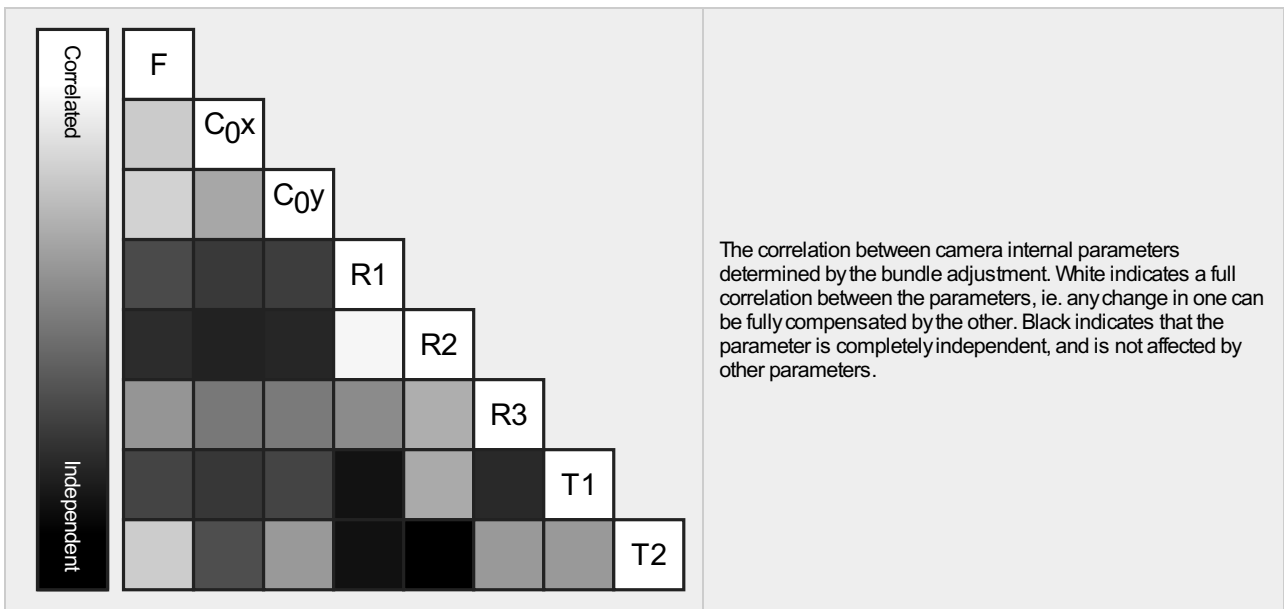
## 🔍 Internal Camera Parameters

### 📷 FC330\_3.6\_4000x3000 (RGB). Sensor Dimensions: 6.317 [mm] x 4.738 [mm]



EXIF ID: FC330\_3.6\_4000x3000

	Focal Length	Principal Point x	Principal Point y	R1	R2	R3	T1	T2
Initial Values	2285.722 [pixel] 3.610 [mm]	2000.006 [pixel] 3.159 [mm]	1500.003 [pixel] 2.369 [mm]	-0.001	-0.002	0.000	-0.001	-0.001
Optimized Values	2246.170 [pixel] 3.548 [mm]	1990.128 [pixel] 3.143 [mm]	1531.640 [pixel] 2.419 [mm]	-0.006	0.004	0.006	0.001	0.000
Uncertainties (Sigma)	3.972 [pixel] 0.006 [mm]	0.111 [pixel] 0.000 [mm]	0.110 [pixel] 0.000 [mm]	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



### ? 2D Keypoints Table



	Number of 2D Keypoints per Image	Number of Matched 2D Keypoints per Image
Median	40372	6571
Mn	29482	1355
Max	48487	16269
Mean	40620	6778

### ? 3D Points from 2D Keypoint Matches



	Number of 3D Points Observed
In 2 Images	790653
In 3 Images	196836
In 4 Images	84249
In 5 Images	46333
In 6 Images	25240
In 7 Images	16870
In 8 Images	12542
In 9 Images	9066
In 10 Images	7060
In 11 Images	5136
In 12 Images	3690
In 13 Images	2799
In 14 Images	2252
In 15 Images	1551
In 16 Images	999
In 17 Images	669
In 18 Images	451
In 19 Images	304
In 20 Images	210
In 21 Images	113
In 22 Images	41

In 23 Images	25
In 24 Images	6
In 25 Images	2
In 26 Images	1

## 2D Keypoint Matches

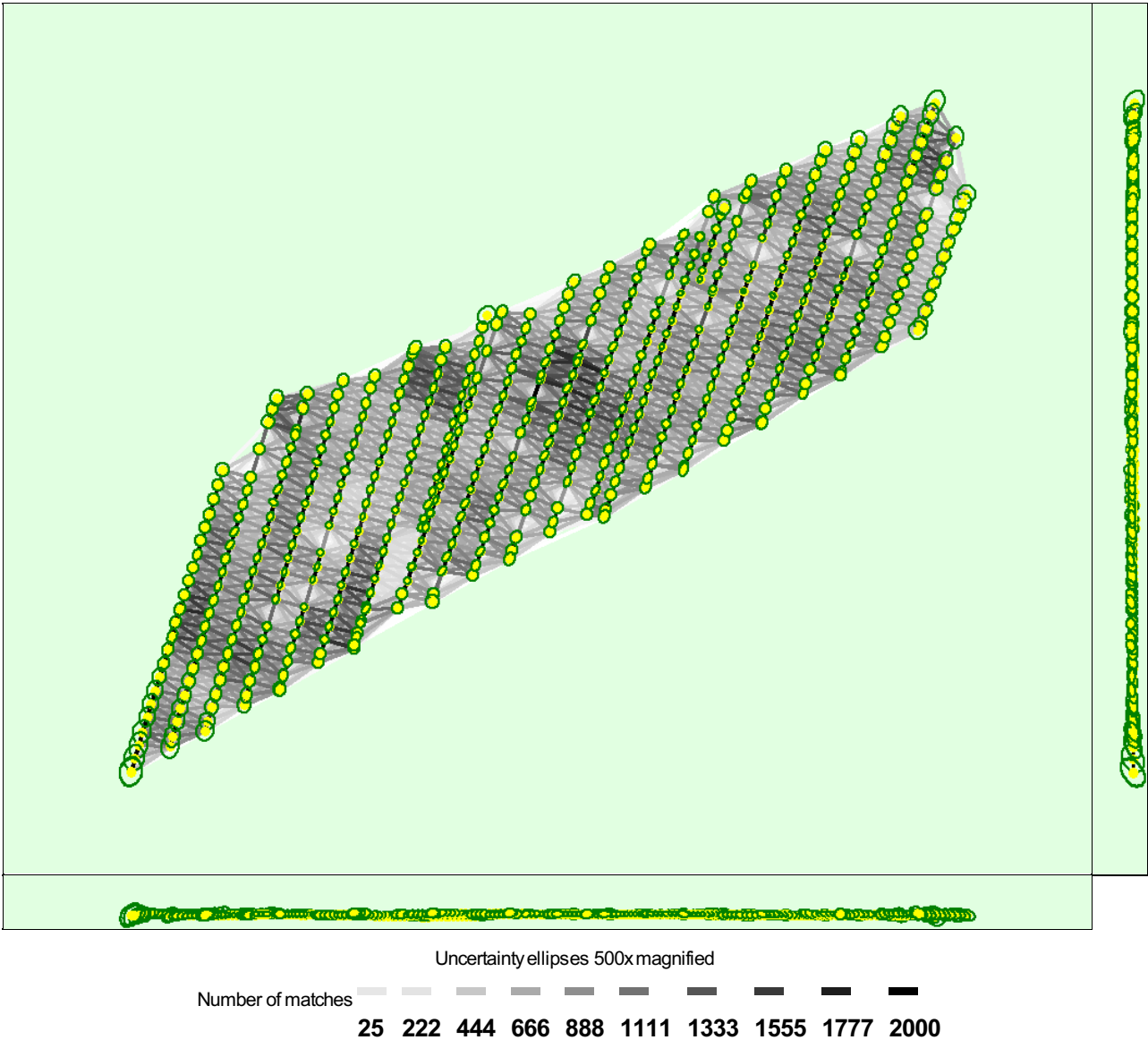


Figure 5: Computed image positions with links between matched images. The darkness of the links indicates the number of matched 2D keypoints between the images. Bright links indicate weak links and require manual tie points or more images. Dark green ellipses indicate the relative camera position uncertainty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

## Relative camera position and orientation uncertainties

	X[m]	Y[m]	Z[m]	Omega [degree]	Phi [degree]	Kappa [degree]
Mean	0.017	0.019	0.013	0.008	0.007	0.004
Sigma	0.005	0.006	0.004	0.002	0.002	0.001

## Geolocation Details

### Ground Control Points

GCP Name	Accuracy XY/Z [m]	Error X[m]	Error Y [m]	Error Z [m]	Projection Error [pixel]	Verified/Marked
8 (3D)	0.020/ 0.020	0.016	-0.018	-0.016	0.525	6 / 6
11 (3D)	0.020/ 0.020	0.132	-0.026	-0.035	0.695	16 / 16
12 (3D)	0.020/ 0.020	-0.120	-0.051	0.051	0.385	9 / 9
14 (3D)	0.020/ 0.020	-0.134	-0.023	0.033	0.335	9 / 9
17 (3D)	0.020/ 0.020	0.147	0.111	0.056	0.652	9 / 9
21 (3D)	0.020/ 0.020	0.011	0.021	0.044	0.246	5 / 5
23 (3D)	0.020/ 0.020	-0.037	0.014	-0.057	0.449	7 / 7
<b>Mean [m]</b>		0.002081	0.004002	0.011015		
<b>Sigma [m]</b>		0.102354	0.049126	0.042548		
<b>RMS Error [m]</b>		0.102375	0.049289	0.043951		

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

### ? Absolute Geolocation Variance



Mn Error [m]	Max Error [m]	Geolocation Error X[%]	Geolocation Error Y [%]	Geolocation Error Z [%]
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.19	0.58
-12.00	-9.00	0.00	2.51	22.63
-9.00	-6.00	0.00	8.70	12.57
-6.00	-3.00	4.06	19.34	0.58
-3.00	0.00	42.75	19.15	0.00
0.00	3.00	49.90	22.44	7.93
3.00	6.00	3.29	13.73	21.28
6.00	9.00	0.00	10.64	34.24
9.00	12.00	0.00	2.90	0.19
12.00	15.00	0.00	0.39	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
<b>Mean [m]</b>		-0.230630	1.306573	14.523831
<b>Sigma [m]</b>		1.684729	5.017834	7.307177
<b>RMS Error [m]</b>		1.700442	5.185150	16.258429

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

Geolocation Bias	X	Y	Z
Translation [m]	-0.230630	1.306573	14.523830

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

### ? Relative Geolocation Variance



Relative Geolocation Error	Images X[%]	Images Y [%]	Images Z [%]
[-1.00, 1.00]	100.00	64.41	88.78
[-2.00, 2.00]	100.00	96.52	100.00
[-3.00, 3.00]	100.00	100.00	100.00
<b>Mean of Geolocation Accuracy [m]</b>	5.000000	5.000000	10.000000
<b>Sigma of Geolocation Accuracy [m]</b>	0.000000	0.000000	0.000000

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

Geolocation Orientational Variance	RMS [degree]
Omega	0.896

Phi	0.579
Kappa	2.930

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

## Initial Processing Details

### System Information

Hardware	CPU: AMD Ryzen 9 3900X 12-Core Processor RAM: 32GB GPU: NVIDIA GeForce RTX2080 Ti (Driver: 26.21.14.3160)
Operating System	Windows 10 Pro, 64-bit

### Coordinate Systems

Image Coordinate System	WGS 84 (EGM96 Geoid)
Ground Control Point (GCP) Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 14N (EGM96 Geoid)
Output Coordinate System	WGS 84 / UTMzone 14N (EGM96 Geoid)

### Processing Options

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

## Point Cloud Densification details

### Processing Options

Image Scale	multiscale, 1/2 (Half image size, Default)
Point Density	Optimal
Minimum Number of Matches	3
3D Textured Mesh Generation	yes
3D Textured Mesh Settings:	Resolution: High Resolution Color Balancing: no
LOD	Generated: no
Advanced: 3D Textured Mesh Settings	Sample Density Divider: 1
Advanced: Image Groups	group1
Advanced: Use Processing Area	yes
Advanced: Use Annotations	yes
Time for Point Cloud Densification	20m:45s
Time for Point Cloud Classification	04m:04s
Time for 3D Textured Mesh Generation	31m:20s

### Results

Number of Generated Tiles	4
Number of 3D Densified Points	41365165
Average Density (per m <sup>3</sup> )	29.36

# DSM, Orthomosaic and Index Details

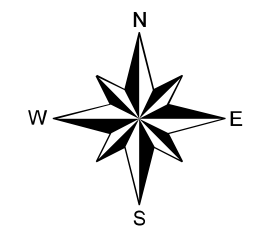


## Processing Options



DSM and Orthomosaic Resolution	1 x GSD (4.44 [cm/pixel])
DSM Filters	Noise Filtering: yes Surface Smoothing: yes, Type: Sharp
Raster DSM	Generated: yes Method: Inverse Distance Weighting Merge Tiles: yes
Orthomosaic	Generated: yes Merge Tiles: yes GeoTIFF Without Transparency: no Google Maps Tiles and KML: yes
Grid DSM	Generated: yes, Spacing [cm]: 100
Raster DTM	Generated: yes Merge Tiles: yes
DTM Resolution	5 x GSD (4.44 [cm/pixel])
Time for DSM Generation	11m:10s
Time for Orthomosaic Generation	20m:05s
Time for DTM Generation	14m:16s
Time for Contour Lines Generation	00s
Time for Reflectance Map Generation	00s
Time for Index Map Generation	00s

# Precipitación y zonas de riesgo



**SIMBOLOGÍA**

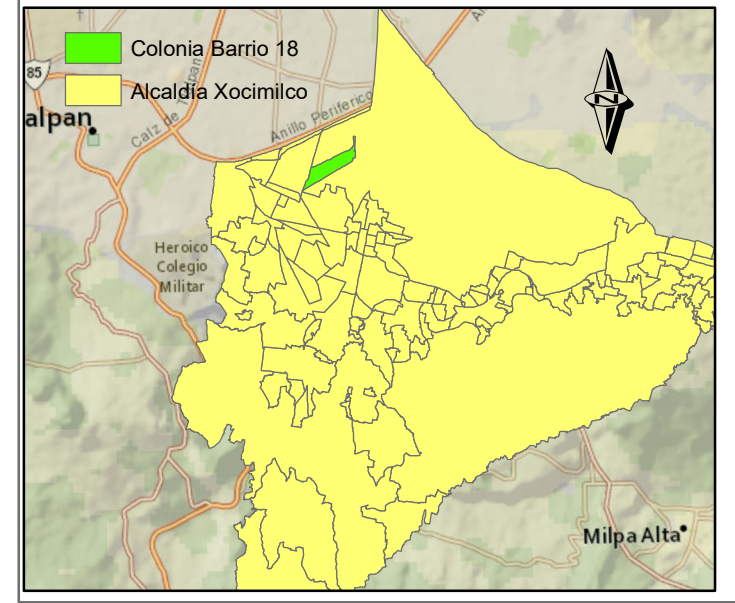
**Precipitación en (mm)**

0.0 - 29.9	Tr < 2 años/1h
30 - 39.9	5 años < Tr < 5 años/1h
40 - 43.9	10 años < Tr < 10 años/1h
44 - 49.9	20 años < Tr < 20 años/1h
50 - 141.8	50 años < Tr < 50 años/1h

**NOTAS**

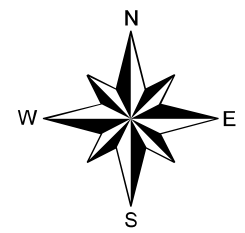
- \*Suponiendo que el drenaje no funciona.
- \*Proyección en UTM zona 14
- \*Elipsoide de referencia WGS84

**Ubicación Barrio 18**





# Precipitación y zonas de riesgo



**SIMBOLOGÍA**

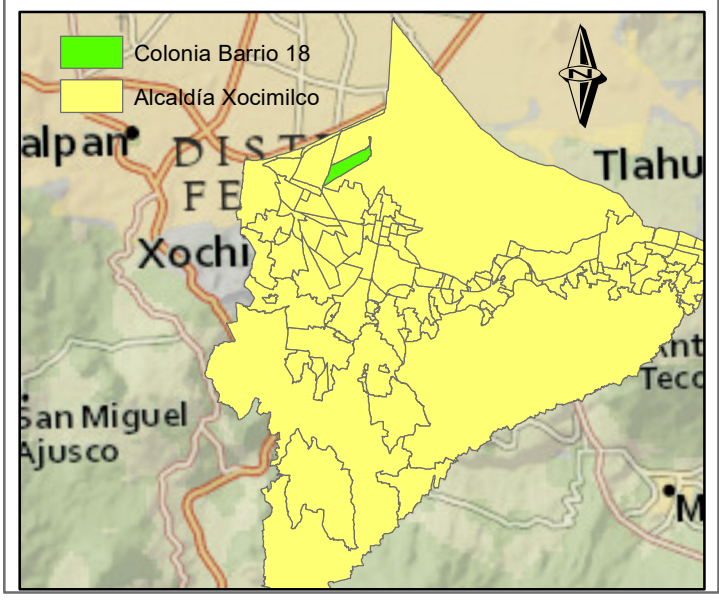
**Precipitación en mm**

<span style="color: cyan;">■</span>	40 mm - 60 mm
<span style="color: blue;">■</span>	60 mm - 80 mm
<span style="color: darkblue;">■</span>	80 mm - 100 mm
<span style="color: purple;">■</span>	100 mm - 120 mm
<span style="color: magenta;">■</span>	120 mm - 140 mm

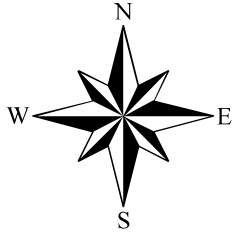
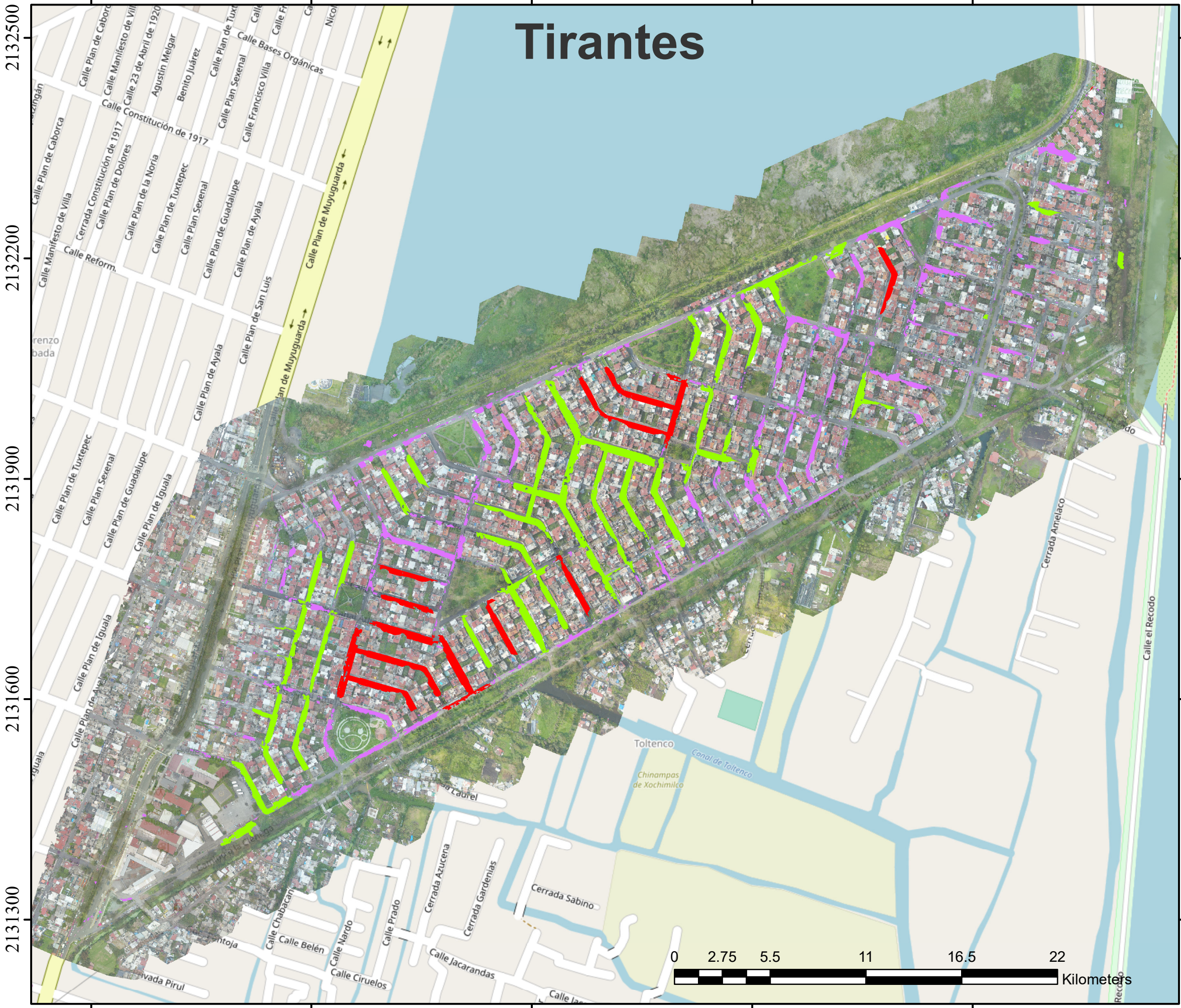
**NOTAS**

- \*Suponiendo que el drenaje es tiene capacidad de 40 mm
- \*Proyección en UTM zona 14
- \*Elipsoide de referencia WGS84

**Ubicación Barrio 18**



# Tirantes



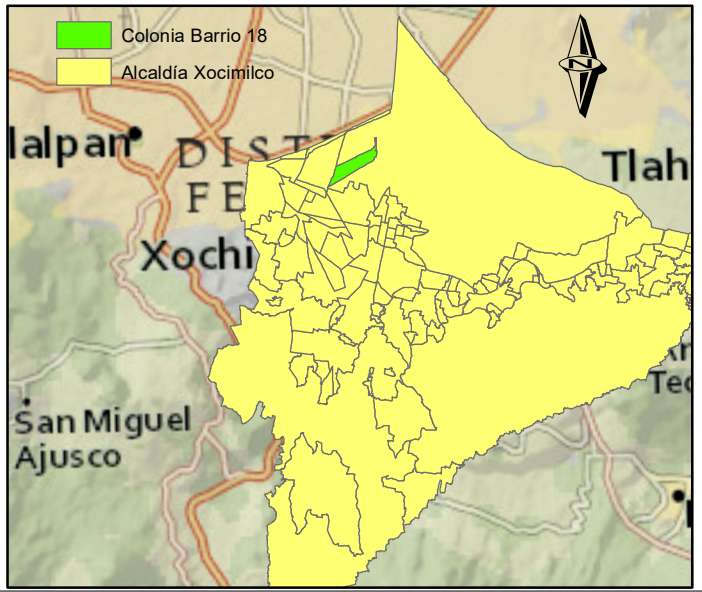
**SIMBOLOGÍA**

**Tirantes (cm)**

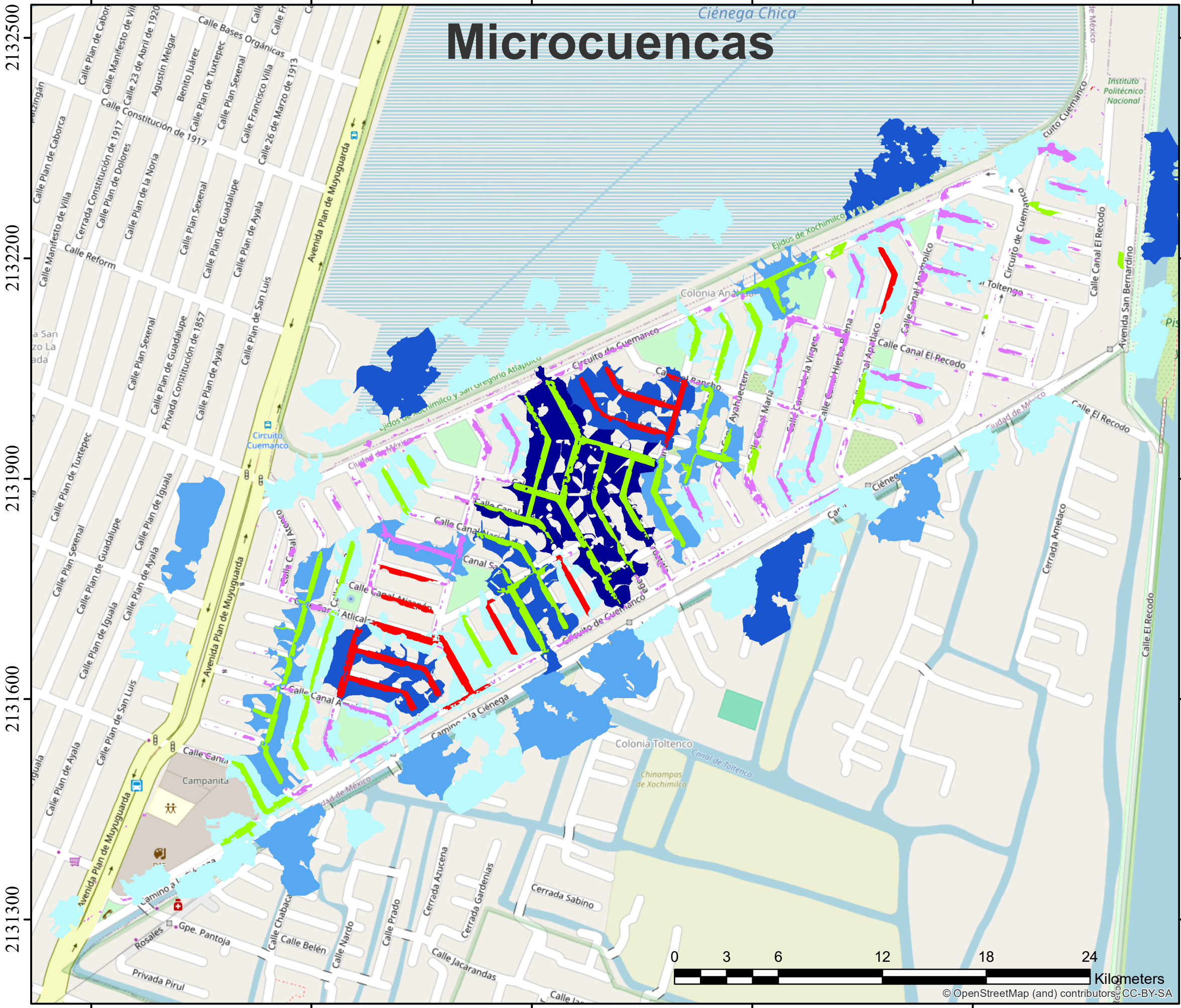
- 0 - 20.9
- 30 - 30.9
- 40 - 50.5



Ubicación Barrio 18



# Microcuencas

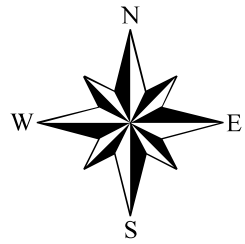


**SIMBOLOGÍA**

**Microcuencas**

**Area (ha)**

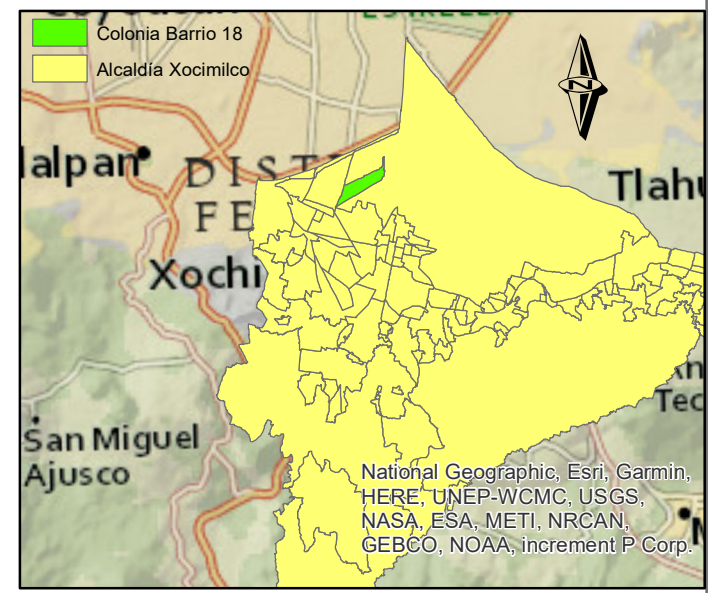
Light Blue	0.10 - 0.38
Medium Blue	0.39 - 0.6
Dark Blue	0.6 - 1
Very Dark Blue	3



**NOTAS**

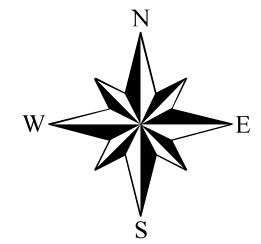
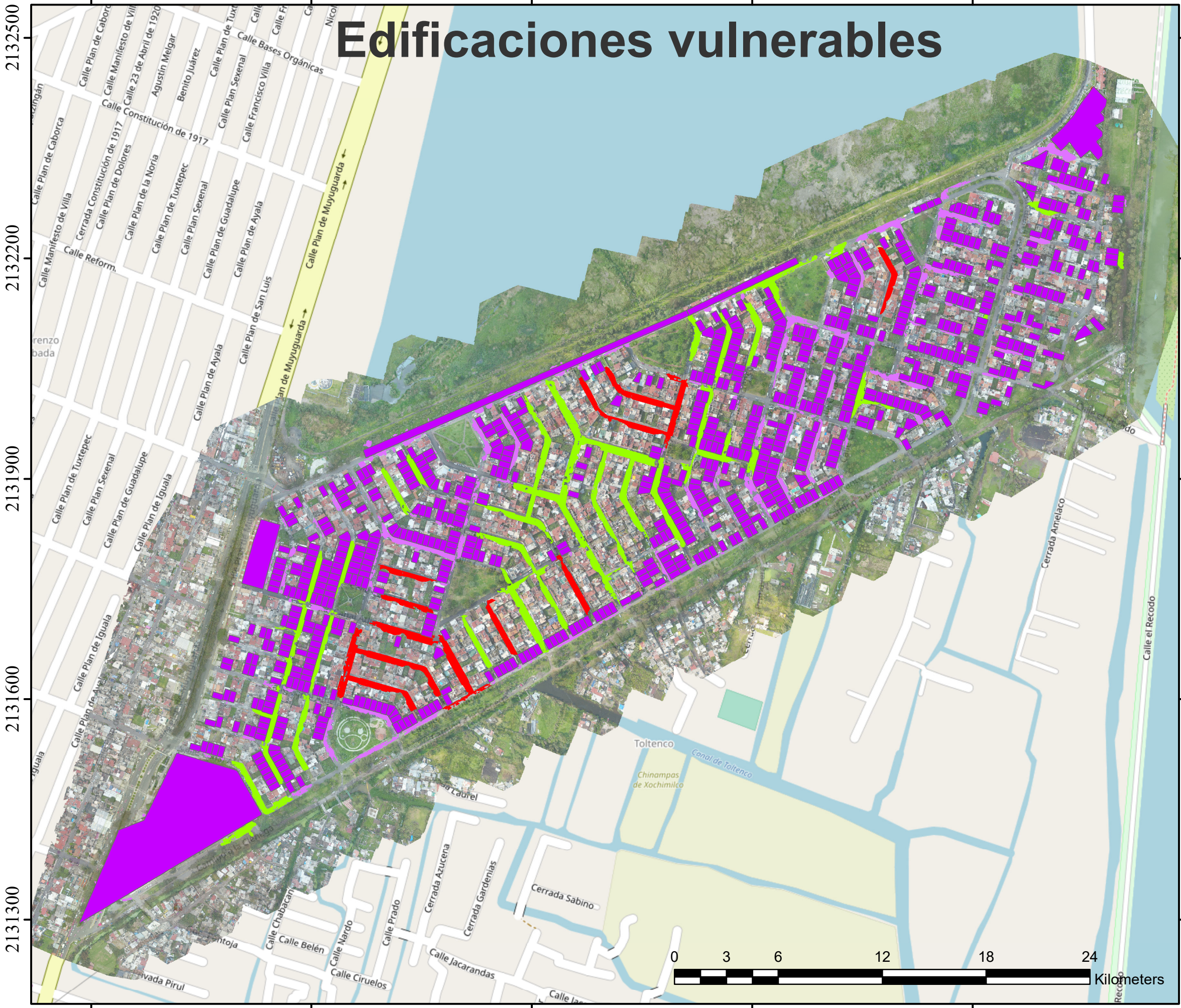
- \*Áreas que aportan agua a microcuencas
- \*Proyección en UTM zona 14
- \* Elipsoide de referencia WGS84

**Alcaldía Xochimilco**



© OpenStreetMap (and) contributors, CC-BY-SA

# Edificaciones vulnerables



**SIMBOLOGÍA**

- Edificios Afectados

**Tirantes (cm)**

- 0 - 20.9
- 30 - 30.9
- 40 - 50.5

**NOTAS**

- \*Proyección en UTM zona 14
- \*Elipsoide de referencia WGS84

## Ubicación Barrio 18

