

Ing. Eduardo Daniel  
García Gutiérrez

Reconstrucción de escenarios para accidentes utilizando vehículos  
aéreos no tripulados operados bajo distintas condiciones climáticas

2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería

Reconstrucción de escenarios para accidentes utilizando vehículos  
aéreos no tripulados operados bajo distintas condiciones climáticas

Tesis

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

---

Presenta

Ing. Eduardo Daniel García Gutiérrez

---

Dirigido por:

Dr. Omar Chávez Alegría

---

---

Querétaro, Qro. a abril 2022



Universidad Autónoma de Querétaro  
Facultad de Ingeniería  
Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad

Reconstrucción de escenarios para accidentes utilizando vehículos aéreos no tripulados operados bajo distintas condiciones climáticas  
Tesis

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

Presenta:  
Ing. Eduardo Daniel García Gutiérrez

Dirigido por:  
Dr. Omar Chávez Alegría

Dr. Omar Chávez Alegría  
Presidente  
M.I. Emilio Abarca Pérez  
Secretario  
M.I. Gerardo Medellín Aguilar  
Vocal  
Dra. María de la Luz Pérez Rea  
Suplente  
M.I. José Juan Puga Olvera  
Suplente

Centro Universitario, Querétaro, Qro.  
Fecha de aprobación por el Consejo Universitario (agosto 2022)  
México

## **Dedicatorias**

Este trabajo de investigación tiene dedicatoria especial para todos los integrantes de mi familia, quiénes siempre fueron participes de mi formación y ahora comparten mis logros.

Para el equipo del SEO Celaya por apoyarme y coadyuvar a llevar a buen término este trabajo de investigación.

## **Agradecimientos**

Agradezco a Dios y la Virgen María por nunca dejarme solo en los momentos difíciles y brindarme todo el afecto que necesitaba, otorgarme la confianza, por enseñarme a amarme a mí y a los demás y mantenerme siempre en la fe y la perseverancia. Al Sagrado Corazón de Jesús por motivarme siempre a luchar, seguir adelante y no rendirme en mi andar. Por cuidar de mis seres queridos y proveernos de los recursos necesarios para lograr los objetivos planteados.

Reitero mi agradecimiento a mi familia por guiarme y aconsejarme, por no faltar el apoyo solicitado y por enseñarme el buen camino y la colaboración con los demás.

Agradezco a la Dra. María de la Luz Pérez Rea, al Dr. Omar Chávez Alegría y a todo el núcleo de profesores de la Maestría en Ingeniería de Vías Terrestres y Movilidad. Ya que sin su apoyo esta tesis no podría haber sido publicada. Gracias por sus enseñanzas, consejos y avisos, así como correcciones y atenciones brindadas en el desarrollo de mi investigación.

Extiendo un agradecimiento formal a la Facultad de Ingeniería y a la Universidad Autónoma de Querétaro por adoptarme dentro de la comunidad y contar con el financiamiento, instalaciones y recursos necesarios para que este trabajo de investigación se realizara. De manera similar, agradezco a mis compañeros de clase por apoyarme siempre y hacer equipo con un servidor, ayudarme en las gestiones administrativas y siempre mostrar disposición a la colaboración y el diálogo. Sin duda, un gran grupo.

A la empresa Dirección de Operaciones, S.A. de C.V. por facilitarme recursos e información para el desarrollo de este trabajo y ser flexibles en mi horario laboral, permitiéndome obtener el tiempo necesario para atender mis estudios de postgrado.

## Tabla de contenidos

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Dedicatorias</b> .....   | <b>i</b>    |
| <b>Agradecimientos</b> .....  | <b>ii</b>   |
| <b>Tabla de contenidos</b> .....  | <b>iii</b>  |
| <b>Índice de tablas</b> .....   | <b>v</b>    |
| <b>Índice de figuras</b> .....  | <b>viii</b> |
| <b>Resumen</b> .....  | <b>1</b>    |
| <b>Abstract</b> .....   | <b>2</b>    |
| <b>1.Introducción.</b> .....  | <b>3</b>    |
| 1.1 Descripción del problema. ....  | 5           |
| 1.2 Justificación .....   | 7           |
| 1.3 Marco teórico.....  | 8           |
| 1.3.1 Fundamentos básicos de geodesia .....   | 9           |
| 1.3.2 Fotogrametría obtenida con equipo UAV.....  | 13          |
| 1.3.3 Fotogrametría Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).....   | 14          |
| 1.3.4 Clasificación de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV).....  | 14          |
| 1.3.5 Ecuación para obtener el porcentaje de error relativo para la medición de distancias en el plano “xy” ..... | 16          |
| 1.3.6 Cinemática y ecuación para determinar la velocidad en la investigación de accidentes                        | 17          |
| <b>2.Antecedentes</b> .....   | <b>19</b>   |
| <b>3.Hipótesis</b> .....  | <b>22</b>   |
| <b>4.Objetivos</b> .....  | <b>23</b>   |
| 4.1 Objetivo general .....  | 23          |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 4.2       | Objetivos específicos.....  | 23         |
| <b>5.</b> | <b>Metodología.....</b>   | <b>24</b>  |
| 5.1       | Metodología propuesta para el proceso de recreación de eventos de accidentalidad .....  | 24         |
| 5.2       | Levantamiento geodésico de puntos de control terrestres .....   | 25         |
| 5.3       | Levantamiento fotogramétrico con equipo UAV .....   | 27         |
| 5.4       | Procesamiento fotogramétrico con software.....  | 33         |
| 5.5       | Determinación de velocidades a partir de huellas de frenado .....   | 34         |
| 5.6       | Etapas desarrolladas en la metodología propuesta.....   | 34         |
| <b>6.</b> | <b>Resultados y discusión.....</b>  | <b>52</b>  |
| 6.1       | Resultados obtenidos durante el desarrollo de la etapa tres de la metodología propuesta.....  | 52         |
| 6.2       | Resultados obtenidos durante el desarrollo de la etapa cuatro de la metodología propuesta.....  | 69         |
| <b>7.</b> | <b>Conclusiones .....</b>   | <b>95</b>  |
| 7.1       | Conclusiones particulares de la etapa tres .....  | 95         |
| 7.2       | Conclusiones particulares de la etapa cuatro .....  | 97         |
| 7.3       | Conclusiones sobre la comparativa de softwares para establecer la calidad de los ortofotos resultantes del procesamiento fotogramétrico ..... | 101        |
| 7.4       | Conclusiones generales del trabajo de investigación .....   | 101        |
| <b>8.</b> | <b>Referencias.....</b>   | <b>104</b> |
| <b>9.</b> | <b>Anexos .....</b>   | <b>112</b> |

## Índice de tablas

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1-1 Parámetros geométricos para los elipsoides Clarke 1866, Internacional, GRS80 y WGS84.....  | 10 |
| Tabla 1-2 Conversión entre sistemas de coordenadas.....  | 12 |
| Tabla 1-3 Clasificación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia.....  | 16 |
| Tabla 5-1 Especificación de estabilizador.....   | 29 |
| Tabla 5-2 Especificación aeronave.....   | 30 |
| Tabla 5-3. Especificación cámara.....  | 30 |
| Tabla 5-4 Metodología propuesta para la reconstitución de escenarios de accidentes y sus respectivos procesos para la captura de imágenes..... | 33 |
| Tabla 5-5 Características físicas y de rendimiento de GPS.....   | 40 |
| Tabla 5-6 Sensores de GPS Garmin, modelo 64csx.....  | 40 |
| Tabla 5-7 Configuración del GPS.....   | 41 |
| Tabla 5-8 Límites permisibles del coeficiente de fricción para pavimento seco.....   | 43 |
| Tabla 5-9 Especificaciones de receptor GNSS SOKKIA GRX2.....   | 46 |
| Tabla 5-10 Parámetros de configuración para el levantamiento geodésico por el método estático.....   | 47 |
| Tabla 6-1 Fuente de información del evento IN201017_01.....  | 54 |
| Tabla 6-2 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN201017_01.....  | 55 |
| Tabla 6-3 Condiciones de clima presentadas en el evento IN201017_01.....   | 55 |
| Tabla 6-4 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN201017_01.....   | 58 |
| Tabla 6-5 Fuente de información del evento IN210113_01.....  | 59 |
| Tabla 6-6 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN210113_01.....  | 60 |
| Tabla 6-7 Condiciones de clima presentadas en el evento IN210113_01.....   | 60 |
| Tabla 6-8 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN210113_01.....   | 63 |
| Tabla 6-9 Fuente de información del evento IN210130_01.....  | 65 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 6-10 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN210130_01.....                                  | 65 |
| Tabla 6-11 Condiciones de clima presentadas en el evento IN210130_01 .....  | 66 |
| Tabla 6-12 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN210130_01 ...  | 69 |
| Tabla 6-13 Tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional .....                                     | 70 |
| Tabla 6-14 Tiempo necesario para realizar el levantamiento a partir de fotogrametría aérea obtenida con UAV .....                       | 71 |
| Tabla 6-15 Condiciones climáticas presentadas durante el vuelo del equipo UAV   | 72 |
| Tabla 6-16 Parámetros de vuelo asignados al equipo UAV.....   | 72 |
| Tabla 6-17 Tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico por el método estático.....  | 73 |
| Tabla 6-18 Coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de las estaciones UGTO y UQRO pertenecientes a la RGNA .....                               | 74 |
| Tabla 6-19 Precisión de ajuste de los GCPs a la RGNA .....  | 75 |
| Tabla 6-20 Tiempo de procesamiento fotogramétrico.....  | 76 |
| Tabla 6-21 Error relativo en huellas de frenado .....   | 77 |
| Tabla 6-22 Velocidad inicial de investigación con efecto de la pendiente.....   | 78 |
| Tabla 6-23 Velocidad inicial de investigación sin efecto de la pendiente.....   | 78 |
| Tabla 6-24 Tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional bajo condiciones ideales.....             | 80 |
| Tabla 6-25 Tiempo necesario para realizar el levantamiento a partir de fotogrametría aérea obtenida con UAV en condiciones ideales..... | 81 |
| Tabla 6-26 Condiciones climáticas presentadas durante el vuelo del equipo UAV en condiciones ideales.....                               | 82 |
| Tabla 6-27 Parámetros de vuelo asignados al equipo UAV.....   | 82 |
| Tabla 6-28 Tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico por el método estático en condiciones ideales .....                | 83 |
| Tabla 6-29 Precisión de ajuste de los GCPs a la RGNA en condiciones ideales ..  | 84 |
| Tabla 6-30 Tiempo de procesamiento fotogramétrico para condiciones ideales ...  | 85 |

|   |    |
|---|----|
| Tabla 6-31 Error relativo en huellas de frenado para condiciones ideales.....                               | 86 |
| Tabla 6-32 Velocidad inicial de investigación con efecto de la pendiente para condiciones ideales.....      | 87 |
| Tabla 6-33 Velocidad inicial de investigación sin efecto de la pendiente para condiciones ideales.....      | 87 |
| Tabla 6-34 Cuadro comparativo de resultados .....   | 88 |
| Tabla 6-35 Tiempo necesario para realizar el levantamiento de un accidente .....                            | 89 |
| Tabla 6-36 Comparativa en la medición de huellas de frenado por tipo de software. ....                      | 90 |
| Tabla 6-37 Diferencia en porcentaje entre mediciones de huella de frenado por cada software utilizado ..... | 91 |
| Tabla 6-38 Resolución de los MDS y el MDE resultantes del procesamiento fotogramétrico .....                | 93 |

## Índice de figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1-1 Elipsoide de revolución. Elaboración propia a partir de (Moya & Cedeño, 2017).....  | 9  |
| Figura 1-2 Aplicaciones potenciales de drones. Fuente: Singhal <i>et. al</i> (2018) .....  | 15 |
| Figura 5-1 Metodología de reconstitución de accidentes de tránsito basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV) - diagrama funcional. Elaboración propia a partir de Pádua <i>et al.</i> (2020). ..... | 24 |
| Figura 5-2 Climas presentados en la zona definida para realizar la investigación.  | 32 |
| Figura 5-3 Etapas para el desarrollo de la metodología. ....   | 34 |
| Figura 5-4 Red estatal de carreteras del estado de Guanajuato. Fuente: (Dirección General de Infraestructura Vial de la Secretaría de Obra Pública del Estado de Guanajuato, 2018) .....                 | 35 |
| Figura 5-5 Ubicación y trayectoria del Libramiento de Celaya en el sistema geográfico de mapas. Fuente: (Google Earth, 2018).....  | 37 |
| Figura 5-6 Software MapSource para visualización de Waypoints (Garmin, 2013) .....   | 42 |
| Figura 5-7 Waypoints de imágenes aéreas ingresadas al software ReCap Photo   | 42 |
| Figura 5-8 Identificación de extremos de huellas de frenado con los puntos A y B .....   | 49 |
| Figura 6-1 Croquis de evento IN201017_01 .....   | 54 |
| Figura 6-2 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo versión 2021 para el evento con clave IN201017_01 .....   | 56 |
| Figura 6-3 Ortofoto obtenida del evento con clave IN201017_01 .....  | 56 |
| Figura 6-4 Puntos de control terrestres de evento con clave 210113_01 .....  | 57 |
| Figura 6-5 Fotografías del lugar del accidente con clave IN201017_01 .....   | 58 |
| Figura 6-6 Croquis de evento IN210113_01 .....   | 59 |
| Figura 6-7 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo versión 2021 para el evento con clave IN210113_01 .....   | 61 |
| Figura 6-8 Ortofoto obtenida del evento con clave IN210113_01 .....  | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 6-9 Puntos de control terrestres de evento con clave IN210113_01 .....  | 62 |
| Figura 6-10 Fotografías del lugar del accidente con clave IN201017_01 .....  | 63 |
| Figura 6-11 Croquis de evento IN210130_01 .....  | 64 |
| Figura 6-12 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo<br>versión 2021 para el evento con clave IN210130_01 ..... | 66 |
| Figura 6-13 Ortofoto obtenida del evento con clave IN210130_01 .....   | 67 |
| Figura 6-14 Puntos de control terrestres de evento con clave IN210130_01 .....   | 68 |
| Figura 6-15 Fotografías del lugar del accidente con clave IN210130_01 .....  | 68 |

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se realiza el procesamiento fotogramétrico de imágenes obtenidas mediante vehículos aéreos no tripulados con el propósito de recrear o reconstituir las escenas de accidentes de tránsito ocurridos en zona de carretera. La particularidad de dicha investigación es que la fotogrametría aérea es obtenida bajo distintas condiciones climáticas tomando como referencia puntos de control terrestres marcados con un equipo GPS o estación total geodésica que indican las coordenadas exactas a las que se referencian las imágenes captadas. Adicional a ello, con los productos del procesamiento fotogramétrico digital, tales como modelos 3D, ortofos y/o nube de puntos se establece la identificación, longitud y posicionamiento de huellas de frenado en la escena de un accidente para estimar la velocidad a la que circulaban los vehículos, previo a la ocurrencia del accidente. La metodología planteada ayuda a que el levantamiento de la escena de un accidente sea más rápida, eficaz y precisa que los métodos utilizados en campo actualmente por las fuerzas policiales.

Los resultados sugieren que, contemplando el número de escenas de accidentes de tránsito recreadas con la metodología descrita en el párrafo anterior, el error en la estimación de la longitud de huellas de frenado y distancias, en general, no supera el cinco por ciento en relación a las distancias obtenidas en campo en un pavimento asfáltico seco.

**Palabras clave:** UAV, Accidentes de tránsito, Fotogrametría, Modelos 3D, Escenario de accidente

## **Abstract**

In this research work, the photogrammetric processing of images obtained by unmanned aerial vehicles is carried out with the purpose of recreating or reconstructing the scenes of traffic accidents that occurred in a highway area. The particularity of this research is that the aerial photogrammetry is obtained under different weather conditions taking as reference ground control points marked with GPS equipment or geodetic total station indicating the exact coordinates to which the captured images are referenced. Additionally, with the products of digital photogrammetric processing, such as 3D models, orthophotos and/or point clouds, the identification, length and positioning of braking tracks at the scene of an accident is established to estimate the speed at which the vehicles were traveling prior to the accident. The proposed methodology helps the accident scene survey to be faster, more efficient and accurate than the methods currently used in the field by the police forces.

The results suggest that, considering the number of traffic accident scenes recreated with the methodology described in the previous paragraph, the error in the estimation of the length of braking tracks and distances, in general, does not exceed five percent in relation to the distances obtained in the field on a dry asphalt pavement.

**Keywords:** UAV, Road traffic accidents, Photogrammetry, 3D Models, Accident Scenario

## 1. Introducción.

Por más de una década hemos sido partícipes de una evolución en el desarrollo de los vehículos aéreos no tripulados. Estos sistemas son cada vez más miniaturizados, ligeros e incorporan un mayor número de sensores Daakir *et al.* (2010). Asimismo, dichos sistemas poseen un alto potencial, especialmente porque los campos de aplicación son diversos: agricultura Grenzdörffer *et al.* (2008), forestal Lisein *et al.* (2013), patrimonio cultural (Eisenbeiss, 2004), mapeo Haala *et al.* (2011) y modelado 3D (Neitzel & Klonowski, 2011), aunque también se utiliza en arqueología Agudo *et al.* (2018) metrología Daponte *et al.* (2015), monitoreo, geología y topografía Haala *et al.* (2011), por mencionar algunos. Inclusive, Chamola *et al.* (2020) discutieron el despliegue de UAVs alrededor del mundo para lidiar con el brote de COVID-19. Aunque, se especifica, que en este proyecto se enfocará a la investigación y recreación de escenas de accidentes con estos equipos y solo se mencionan las aplicaciones en otras áreas con fines informativos.

En la actualidad, muchas de las aplicaciones actuales utilizan vehículos aéreos no tripulados (UAV). El campo de la fotografía aérea es una de las áreas, en la que, las actividades de los equipos civiles UAV son los más importantes Daakir *et al.* (2010). Además, la fotogrametría aérea de corto alcance se ha posicionado como una aplicación líder para el uso de imágenes en propósitos de mapeo, inspección, metrología, entre otros.

El objetivo principal de la fotogrametría es describir la geometría de una escena con alta fidelidad Daakir *et al.* (2010). En el caso particular que atañe a la presente investigación, se describirán múltiples escenas de accidentes para recolectar datos del lugar, principalmente, geométricos.

Dentro del campo del transporte, existen una gran variedad de formas en la que esta tecnología es usada. La mayoría de los esfuerzos están dirigidos a la recolección de datos de tránsito vehicular y comportamiento al conducir Outay *et al.* (2020). Estos datos son usados posteriormente para propósitos variados tales como vigilancia y monitoreo, para reconocer violaciones de tránsito, como apoyo en la gestión del tráfico, para optimizar la señalización, en la determinación de rutas vehiculares y para resolver preguntas de investigación en relación a la evaluación de riesgos de accidentes Barmounakis *et al.* (2017).

En relación a la evaluación de riesgos y recolección de datos en escenas de accidentes, para expresar los resultados en un sistema absoluto de coordenadas. El método convencional que se utiliza frecuentemente en el proceso de fotogrametría aérea y que también se usará en esta investigación contempla la definición de objetivos (puntos de control terrestres) en la escena de un accidente; para las cuales, se miden sus coordenadas con equipos topográficos. Esta parte se discutirá más adelante en la sección de la metodología de este documento.

Recientemente, las aseguradoras de vehículos automotores y los departamentos de policía, han explorado el potencial que tienen los drones para la investigación de accidentes de tránsito. En ese sentido, su aplicación se realiza en la captura de escenas de accidentes de tránsito, el uso de software para el mapeo y reconstrucción de imágenes Outay *et al.* (2020).

En el caso particular de la reconstrucción de escenarios para accidentes de tránsito por medio del uso de fotogrametría aérea obtenida con equipo UAV, se menciona que es un tema contemporáneo y una técnica funcional, pues permite acelerar el trabajo de recolección de la información en la escena de un accidente de tránsito con gran precisión, por lo cual, y en lo subsecuente, se detallan los resultados de la experimentación que han realizado diversos autores referente a ello.

## 1.1 Descripción del problema.

Los accidentes de tránsito son una de las principales causas de muerte en todo el mundo. De conformidad con el Global Status Report on Road Safety 2018, las muertes causadas por accidentes de tránsito han incrementado a 1.35 millones por año. Esto es, cerca de 3,700 personas que mueren en las carreteras del mundo cada día, mientras tanto, decenas de millones más sufren lesiones o discapacidades (World Health Organization, 2018). En ese sentido, esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento del Plan Nacional de Desarrollo 2019-2024, del que se deriva el Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024, en el objetivo prioritario 1: “Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal”.

El presente trabajo de investigación, también se alinea al cumplimiento del objetivo general establecido en el Segundo Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2021-2030, que es: reducir las muertes y lesiones causadas por accidentes de tránsito por lo menos en un 50% de 2021 a 2030 (ONU, 2020). Asimismo, esta investigación está asociada a la línea de generación y aplicación del conocimiento denominada Movilidad. Dentro de esa línea, la problemática a abordar, incide en el área de trabajo enfocada a seguridad vial en la movilidad. desde que se pretende generar un impacto social a través de la difusión de los resultados a obtener sobre la importancia que se debe atribuir al resguardo de la integridad física de las personas, los factores que causan los accidentes y la probabilidad de incurrir en un uno de ellos, de modo que estos factores sean contemplados por los usuarios que transitan por las vialidades. Para ello, se propone mejorar la calidad de la información obtenida en los dictámenes de las escenas de accidentes a través del uso de fotogrametría aérea obtenida con equipos aéreos no tripulados, desde que

los métodos usados actualmente por las fuerzas policiales no son precisos y en ocasiones, tampoco confiables como se explica en lo subsecuente.

Una de las consecuencias de la ocurrencia de un accidente es que se debe realizar una investigación posterior, para el deslinde de responsabilidades y el establecimiento de la causa de los accidentes; en un proceso realizado para obtener el dictamen del evento de accidentalidad. La reconstitución de la escena de un accidente es una de las principales asunciones realizadas para establecer hechos y obtener datos de entrada en el proceso subsecuente de análisis del accidente Stáña *et al.* (2017). Sin embargo, en dicho proceso (para la documentación de escenas complejas de accidentes) se han encontrado deficiencias considerables (especialmente baja precisión y eficiencia) en la implementación de los métodos de medición convencionales utilizados actualmente para la recreación de escenas en accidentes (método triangular y medición rectangular) y de las herramientas comúnmente utilizadas en campo como el odómetro de rueda y el flexómetro Stáña *et al.* (2017).

Generalmente, las fuentes básicas que proveen información relevante para la recreación de la escena de un accidente, son los propios reportes de accidentes de tránsito, información fotográfica y topográfica; elaborados por la policía Stáña *et al.* (2017). No obstante, recientemente, investigaciones desarrolladas en materia de seguridad vial, han planteado inquietudes referentes a la confiabilidad de la información reportada por la policía acerca de los factores de contribución o que forman parte de escenas de accidentes (Montella , 2011). Las discrepancias entre los registros de accidentes y las percepciones de los oficiales de policía que completan estos reportes sugieren la posible existencia de información errónea acerca de ciertos factores de contribución sobre la accidentalidad debido a la generación de reportes incompletos (Imprialou & Quddus, 2019) o por mal uso del formulario de reporte de accidentes Broughton *et al.* (2010). Por ello, se debe hacer énfasis en la eficiencia para la recreación de escenas de accidentes de tránsito con parámetros, métodos o técnicas de medición confiables. Así pues, se propone la

estimación de distancias a través del procesamiento fotogramétrico de múltiples imágenes obtenidas con vehículos aéreos no tripulados operados bajo condiciones de clima variable y corregidas a partir de la georreferenciación a nivel de la superficie terrestre con equipos geodesicos Staña *et al.* (2017) para minimizar el error humano, además de determinar velocidades de operación por medio de la medición de huellas de frenado, que se definen como las marcas dibujadas sobre el pavimento a causa de la fricción generada entre la superficie paventada y el neumático cuando se bloquean las ruedas de un vehículo Brown *et al.* (2007).

## 1.2 Justificación

La reconstrucción de escenarios para accidentes de tránsito por medio del uso de fotogrametría aérea obtenida con equipo UAV es un tema contemporáneo relevante que contrasta con el enfoque de los procedimientos actuales comúnmente utilizados por las fuerzas policiales, los cuales, se basan en: la utilización de; una cinta métrica y / o un odómetro de rueda; un bloc de notas, para dibujar el boceto; un lápiz; tiza, para marcar el pavimento y una cámara para documentación fotográfica Pádua *et al.* (2020).

A raíz de lo anterior, Staña *et al.* (2017) propone la rectificación de este procedimiento actual, con el uso de fotogrametría obtenida a través de equipo UAV. En ese sentido, Pádua *et al.* (2020), en la conclusión de su investigación, menciona que un tema importante para abordar en el futuro es la necesidad de contar con UAVs operando en un amplio número de situaciones de clima no extremo, pero desfavorables, así como implementar métodos fotogramétricos basados en evidencia recolectada por UAVs que puedan lidiar con condiciones de luz adversas, las cuales, no han sido estudiadas, por ejemplo, en días nublados o en la noche.

Tal como se establece en Pádua *et al.* (2020) a pesar del número de trabajos de investigación válidos que implican el uso de fotogrametría obtenida con UAV en la recreación de escenas de accidentes, la mayoría de ellos se han desarrollado considerando escenarios ideales (operación de equipos UAV en días de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente y dentro de una amplia área abierta y libre de obstáculos) y no bajo condiciones climáticas desfavorables. Por tal motivo y para abordar dicha brecha, en esta investigación se realizará la recreación de escenas de eventos de accidentalidad a través de fotogrametría obtenida con vehículos aéreos no tripulados operados bajo condiciones climáticas no extremas, pero desfavorables, específicamente en días nublados Ranquist *et al.* (2017) y/o con una velocidad de viento de hasta 10 m/s (DJI, 2017) y su alcance se extiende a la estimación de velocidades de operación; a las que circulaban los vehículos previo a incurrir en un accidente, las cuales, se logran establecer a partir de la medición de huellas de frenado marcadas sobre un pavimento asfáltico seco, por medio de modelos digitales creados con fotografías aéreas capturadas utilizando aeronaves no tripuladas bajo condiciones de clima variable, desde que Brown *et al.* (2007) indican que las huellas de neumáticos dejadas en la escena de un accidente son, frecuentemente, una parte crítica de la evidencia física utilizada por los investigadores para determinar la velocidad previa al frenado y ya que el procedimiento actual empleado para su medición a nivel de la superficie terrestre, constantemente, registra errores Pádua *et al.* (2020).

### 1.3 Marco teórico

En lo subsecuente se documentan las teorías y conceptos fundamentales necesarios para la georreferenciación y levantamiento geodésico de las áreas sujetas de estudio en la reconstitución de escenarios de eventos de accidentalidad, así como también, el procesamiento de la fotogrametría aérea, la descripción de los equipos aéreos no tripulados a utilizar para obtenerla y la teoría cinemática usada

para determinar velocidades a partir de huellas de frenado; en ese orden, respectivamente.

### 1.3.1 Fundamentos básicos de geodesia

#### Geodesia

La definición clásica de geodesia fue dada por (Helmert, 1880) como aquella rama de la ciencia encargada de la determinación de la forma y representación de la superficie terrestre. Asimismo, (Bruns, 1878) planteo como objetivo fundamental de la geodesia, la determinación del potencial gravitatorio. Sin embargo, en años recientes, la geodesia en colaboración con otras ciencias, ahora incluye la determinación del fondo oceánico, las superficies y campos magnéticos y otros cuerpos celestiales, tal como la luna (geodesia lunar) y de planetas (geodesia planetaria) (Torge, 2001).

#### El elipsoide como aproximación de la forma de la Tierra

En geodesia se asume como forma de la Tierra un elipsoide de revolución, el cual, es el resultado de hacer girar una elipse alrededor de su eje menor. Además, el elipsoide se define por dos parámetros: el semieje mayor (a) y el semieje menor (b) mostrados en la Figura 1-1.

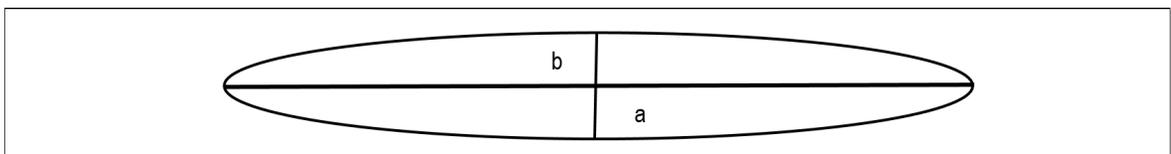


Figura 1-1 Elipsoide de revolución. Elaboración propia a partir de (Moya & Cedeño, 2017)

Los elipsoides incluyen, además de sus parámetros geométricos ( $a$  y  $b$ ), dos parámetros adicionales: la masa de elipsoide ( $M$ ) que representa las propiedades físicas de la Tierra y la velocidad angular de rotación del elipsoide alrededor del semieje menor ( $w$ ).

En la Tabla 1-1 se enlistan los principales parámetros geométricos para cuatro de los elipsoides más conocidos y utilizados.

Tabla 1-1 Parámetros geométricos para los elipsoides Clarke 1866, Internacional, GRS80 y WGS84

| Parámetro | Clarke 1866      | Internacional    | GRS80            | WGS84            |
|-----------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| $a$       | 6378206,4 m      | 6378388 m        | 6378137 m        | 6378137 m        |
| $b$       | 6356583,8 m      | 6356911,946 m    | 6356752,314 m    | 6356752,314 m    |
| $f$       | 0,003390075304   | 0,003367003387   | 0,003352810688   | 0,003352810672   |
| $f^1$     | 294,978698213898 | 296,999998230593 | 298,257221538148 | 298,257222932869 |
| $e^2$     | 0,006768657997   | 0,006722670062   | 0,006694380036   | 0,006694380004   |
| $e'^2$    | 0,006814784946   | 0,006768170238   | 0,006739496788   | 0,006739496757   |

### Sistemas de coordenadas en geodesia

Es necesario contar con sistemas de coordenadas para ubicar de manera unívoca puntos, líneas y espacios. El sistema de referencia, en el que se definen un conjunto de constantes, convenciones, modelos y parámetros los cuales sirven como una base matemática para la representación de cantidades geométricas y físicas (Moya & Cedeño, 2017), por ejemplo, un sistema cartesiano tridimensional con origen en el geocentro, orientación ecuatorial, escala métrica y que rote con la Tierra.

### Marcos geodésicos de referencia

Es la realización del sistema de referencia y que contempla dos partes: la física, que es la materialización sólida del sistema por medio de un conjunto de puntos, y la matemática, que es la determinación de parámetros, por ejemplo, las coordenadas de las estaciones (Moya & Cedeño, 2017).

## El datum geodésico

Fija de una manera inequívoca la relación entre un marco de referencia y un sistema de referencia por medio de la asignación de un conjunto de parámetros preestablecidos, por ejemplo, las coordenadas del origen del sistema ( $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ), las direcciones de los ejes coordenados X, Y, Z, y la escala o patrón de medida. Es decir, La relación de un sistema de coordenadas con la Tierra se le conoce como datum geodésico (Salas , 2019).

Marco de referencia para levantamiento geodésico horizontal aplicable a la investigación.

En la presente investigación se realizará el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres ( un mínimo de tres por zona de estudio) o también conocidos como GPCs (Ground Control Points) y que se definen como un sitio en tierra del cual es conocida su posición geográfica, estos ofrecen información para georreferenciar objetos espaciales Perdomo *et al.* (2015). Asimismo, se debe considerar que de acuerdo a INEGI (2015) Toda estación geodésica horizontal deberá estar referida al Marco de Referencia Terrestre Internacional definido por el Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia para el año 2008, con datos de la época 2010.0, denominado ITRF2008 (International Terrestrial Reference Frame of 2008 - Marco de Referencia Terrestre Internacional del 2008) época 2010.0, en el elipsoide de referencia GRS80 (Geodetic Reference System of 1980).

De manera similar se especifica que para la transformación entre Sistemas de Referencia, los usuarios que lo requieran en sus aplicaciones, estudios e investigaciones, la transformación de coordenadas geodésicas ITRF92 época 1988.0 a ITRF08 época 2010.0 y viceversa, deberá realizarse mediante el uso de

un programa de cómputo o modelo que puede ser aquel desarrollado por el INEGI (2010) o algún otro con funciones similares.

También se debe tomar en cuenta que para las aplicaciones y estudios que requieran la conversión entre coordenadas geodésicas de latitud, longitud y altura geodésica a coordenadas cartesianas tridimensionales (x, y, z) y viceversa, ésta, se debe hacer con las fórmulas cerradas indicadas en la Tabla 1-2, empleando los parámetros correspondientes del GRS80.

Tabla 1-2 Conversión entre sistemas de coordenadas.

| Geodésicas a Cartesianas                           | Cartesianas a Geodésicas   |
|--|--|
| $X = (v + h) \cos \varphi \cos \lambda$ (1)        | $\lambda = \tan^{-1} \left( \frac{Y}{X} \right)$ (7)   |
| $Y = (v + h) \cos \varphi \sin \lambda$ (2)        | $\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{(Z + e^2 a \sin^3 u / (1 - f))}{(p - e^2 \sin^3 u)} \right)$ (8) |
| $Z = ((1 + e^2)v + h) \sin \varphi$ (3)            | $h = p \cos \varphi + Z \sin \varphi - a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$ (9)                        |
| En donde:  | En donde:  |
| $v = \frac{a}{(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}}$ (4) | $p = (X^2 + Y^2)^{1/2}$ (10)   |
| $e^2 = 2f - f^2$ (5)                               | $u = \tan^{-1} \frac{Z(1 - f)}{p} \left[ 1 + \frac{e^2 a}{r(1 - f)} \right]$ (11)                  |
| $h \cong N + H$ (6)                                | $h = p \cos \varphi + Z \sin \varphi - a(1 - e^2 \sin^2 \varphi)^{1/2}$ (12)                       |
| Fuente: INEGI (2015)                               | $r = (p^2 + Z^2)^{1/2}$ (13)   |

## Levantamiento geodésico

Es el conjunto de procedimientos y operaciones de campo y gabinete, destinado a determinar las coordenadas geodésicas de puntos sobre el terreno considerando la curvatura de la Tierra, elegidos y demarcados con respecto al Sistema de referencia en uso (INEGI, 2015).

Los métodos de medición que, comúnmente utiliza el (INEGI, 2015) son los siguientes:

- Estático
- Estático rápido
- Cinemático
- Cinemático en tiempo real

Según indica Salas (2019), el levantamiento de los puntos de control se puede hacer con los métodos estático y dinámico, la diferencia entre estos es la precisión que maneja.

Para la presente investigación, se prepondera realizar la medición por el método estático debido a que tiene mayor precisión (entre 3 mm y 1 cm de error) de conformidad con Salas (2019). Aunque, podría utilizarse el método cinemático o dinámico, en caso de no contar con la disponibilidad de equipo adecuado para realizar la medición por el método estático.

### 1.3.2 Fotogrametría obtenida con equipo UAV

La fotogrametría es la ciencia y tecnología de hacer mediciones utilizando fotografías (Collier, 2020). Aunque las fotografías aéreas parecen ser similares a los mapas; en la forma que se presenta una vista de planta de la Tierra, todas las fotografías aéreas contendrán algunos errores de posicionamiento, lo que significa que no pueden ser utilizadas directamente para hacer mediciones precisas de distancias, áreas o direcciones. En ese sentido, el proceso fotogramétrico es diseñado, ya sea para obtener información precisa de fotografías aéreas, o para

crear una imagen fotográfica, de la cual, todos los errores serán removidos (Collier, 2020). En esta investigación los puntos de control terrestres serán considerados en el proceso fotogramétrico para remover los errores y así obtener mayor precisión en la medición de distancias.

El campo de la fotografía aérea es una de las áreas, en la que, las actividades de los equipos civiles UAV son los más importantes. Además, la fotogrametría aérea de corto alcance se ha posicionado como una aplicación líder para el uso de fotografía aérea en propósitos de mapeo, inspección, metrología, entre otros Daakir *et al.* (2017).

### 1.3.3 Fotogrametría Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV)

Los vehículos aéreos no tripulados o drones son definidos internacionalmente como aeronaves genéricas diseñadas para operar sin un piloto humano a bordo Remondino *et al.* (2011). Los equipos UAV se introdujeron por primera vez en el año de 1960 y se utilizaban para realizar actividades de vigilancia militar ( Collier, 2020). Recientemente, equipos UAV, han sido adoptados para obtener fotografía aérea como una alternativa de menor costo en relación con aeronaves de ala fija ( Collier, 2020).

### 1.3.4 Clasificación de los Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV)

A los equipos UAV se les asignan diferentes clasificaciones; Otto *et. al* (2018), asignaron una clasificación en relación a las aplicaciones civiles emergentes más prometedoras: infraestructura, agricultura, transporte, seguridad y entretenimiento. En ese mismo sentido, Singhal *et. al* (2018) identificaron tres principales áreas de aplicación: civil, medio ambiente y defensa; después, asignaron la clasificación mostrada en la Figura 1-2. Por su parte, Macrina *et al.* (2020), consideraron el tamaño, fuselaje y sistema de propulsión para clasificar a los UAVs.

Otras clasificaciones basadas en el peso fueron asignadas por Arjomandi *et. al* (2006) y (Weibel & Hansman, 2006), quienes, identificaron cinco categorías.

Independientemente de las clasificaciones mencionadas en el párrafo anterior, se indica que las más utilizadas consideran el tamaño y peso de un UAV (Hassanalian & Abdelkefi, 2017). Así pues, la NOM-107-SCT3-2019 (SCT, 2019) asigna la clasificación mostrada en la Tabla 1-3 con base al peso máximo de despegue (micro, pequeño y grande) y uso del RPA (*Remotely Piloted Aircraft System* -Sistema de Aeronave Pilotada a Distancia). La NOM-107-SCT3-2019 reconoce tres tipos de RPAS en relación a su uso: recreativo, privado no comercial y privado comercial.

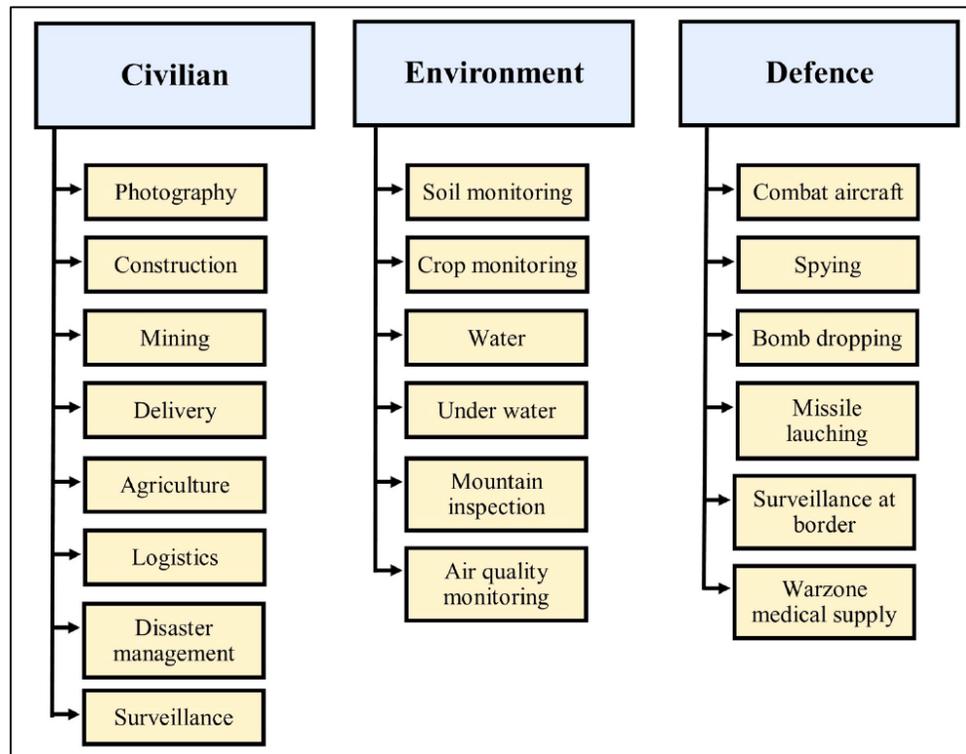


Figura 1-2 Aplicaciones potenciales de drones. Fuente: Singhal *et. al* (2018)

Tabla 1-3 Clasificación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia

| Peso máximo de despegue    |              | Uso                              | Cumplimiento al numeral de la NOM-107-SCT3-2019 |
|----------------------------|--------------|----------------------------------|---|
| 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*                            |

Fuente: (SCT, 2019)

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

Nota: debido a que el equipo UAV a utilizar en esta investigación será operado dentro del espacio aéreo mexicano deberá sujetarse al cumplimiento de los numerales aplicables a la categoría de RPAS Micro que se establecen en la NOM-107-SCT3-2019.

### 1.3.5 Ecuación para obtener el porcentaje de error relativo para la medición de distancias en el plano “xy”

Una vez considerados los parámetros geodésicos, el procesamiento fotogramétrico y las características de operación de vuelo de los equipos UAV se procede a definir la ecuación para obtener el porcentaje de error relativo entre las distancias obtenidas con base en la nube de puntos o modelo tridimensional obtenido a partir de la fotogrametría aérea y el procedimiento de medición a nivel de suelo, realizado con herramientas de medición manuales (cinta métrica y odómetro de rueda).

$$\% \text{ error relativo} = \frac{D_{UAV} - D_{suelo}}{D_{suelo}} \times 100 \quad (14)$$

Donde:

*% error relativo* = Porcentaje de error relativo entre  $D_{UAV}$  y  $D_{suelo}$ .

$D_{UAV}$ : Distancia en el plano “xy” obtenida a través de fotogrametría aérea empleado equipo UAV.

$D_{suelo}$ : Distancia en el plano “xy” obtenida a través de medición directa realizada a nivel de suelo y utilizando cinta métrica, flexómetro u odómetro de rueda.

### 1.3.6 Cinemática y ecuación para determinar la velocidad en la investigación de accidentes

#### Cinemática

Es la rama de la física que estudia el movimiento prescindiendo de las fuerzas que lo producen (RAE, 2019).

#### Ecuación para estimar el cambio de velocidad de un vehículo

En cinemática se utiliza la asunción de una desaceleración constante como la base para estimar el cambio de velocidad en función de la velocidad posterior al derrape ( $v_f$ ), la desaceleración del vehículo ( $a$ ) y la distancia de frenado ( $d$ ) Brown *et al.* (2007) como se ilustra en la expresión (15).

$$V_i = \sqrt{V_f^2 + 2ad} \quad (15)$$

Donde:

$V_i$  = Velocidad inicial, (m/seg).

$V_f$  = Velocidad final, (m/seg).

$a$  = Desaceleración efectiva, (m/seg<sup>2</sup>)

$d$  = Longitud de la marca de frenado, (m)

No obstante, la desaceleración, típicamente, es desconocida, por ende, cuando se reconstruye la escena de un accidente, los investigadores pueden utilizar valores publicados del coeficiente de fricción longitudinal entre el neumático y el pavimento para estimar los niveles de desaceleración alcanzados Brown *et al.* (2007). En ese sentido, se sugiere reemplazar el término “a” incluido en la expresión (15) por el valor del coeficiente de fricción longitudinal ( $\mu$ ) y el valor de aceleración de la gravedad como se muestra en la expresión (16) Brown *et al.* (2007).

Así pues, la máxima tasa de desaceleración que un vehículo puede obtener (considerando un vehículo en buenas condiciones mecánicas) está limitada al coeficiente de fricción longitudinal ( $\mu$ ) disponible. No obstante, el efecto de la pendiente ( $p$ ) también se considera debido a que las distancias de frenado en pendientes ascendentes son más cortas y en pendientes descendentes, más largas (SCT, 2018). Por tal motivo se plantea la siguiente ecuación para la estimación de las velocidades iniciales ( $V_i$ ):

$$V_i = \sqrt{254(\mu - p)d + V_f^2} \quad (16)$$

Donde:

$\mu$  = Coeficiente de fricción longitudinal entre el vehículo y el pavimento

$g$  = El valor de aceleración de la gravedad, (9.81 m/s<sup>2</sup>)

$p$  = Pendiente longitudinal de la carretera, (m/m)

Nota: la ecuación (16) será utilizada para obtener la velocidad de operación en esta investigación.

## 2. Antecedentes

La generación de escenas de incidentes de tránsito utilizadas para ayudar a la investigación de accidentes a partir de la fotogrametría ha sido estudiada desde 1990, sin embargo, se han generado varios retos, los cuales, han sido superados con el avance de las tecnologías, especialmente con la llegada de los drones (Cooner & Balke , 2000).

En relación a la generación e investigación de la escena de un accidente, actualmente, resulta ser muy claro que los avances presentados en investigaciones recientes se enfocan más en la exploración de los resultados del procesamiento de imágenes, teniendo como base factores externos de control sobre el dron durante la toma de fotografías, tales como: ángulo de disparo, altitud, deslumbramiento, por mencionar algunos Ardestani *et al.* (2016). De tal manera que, conforme la tecnología de drones avanza y los vuelos son más estables, el enfoque actual de las investigaciones va orientado más a explorar las capacidades avanzadas del software para mejorar los métodos usados en el procesamiento de imágenes y la reconstrucción de la escena Outay *et al.* (2020). Adicionalmente, esfuerzos en investigación (Liu et al., 2019; Ardestani et al., 2016; Raj et al., 2017; Pérez et al., 2019; Skorput et al., 2019) han propuesto sistemas que están basados en módulos clave tales como:

1. Planeación, vuelo y control de UAVs.
2. Captura de video de datos con UAV en el sitio del accidente a diferentes alturas y ángulos.
3. Mecanismo para la transferencia de datos obtenidos de video a la estación en tierra.
4. Procesamiento de imagen (rectificación, mosaicos, generación de modelos 3D y su optimización).
5. Aplicación y validación del sistema y un marco de referencia para la medición con precisión.

Por otra parte, y en relación a la precisión de la reconstrucción de la escena de un accidente, estudios han reportado diferentes índices para medirla. Por ejemplo, Liu *et al.* (2019) reportó la señal punta en relación al rango de ruido y estructura similar, Pérez *et al.* (2019) reportó la precisión planimetría y Skorput *et al.* (2019) reportó errores en porcentaje para varias mediciones. Estos estudios demuestran que sus metodologías propuestas son efectivas y tienen precisiones razonables a la hora de reconstruir la escena de un accidente. Tal como lo hizo Skorput *et al.* (2019) en esta investigación se reportarán errores en porcentaje, por ende, a continuación, se ilustran las precisiones expresadas en porcentaje que han documentado otros autores en sus investigaciones realizadas sobre la recreación de escenas de accidentes.

Investigaciones actuales, frecuentemente, describen el uso de fotogrametría de múltiples imágenes como una técnica que permite obtener mediciones objetivas a partir de imágenes. La principal ventaja de este método consiste en acelerar el trabajo de recolección de la información en la escena del accidente de tránsito con gran precisión Staña *et al.* (2017). Un ejemplo de ello, se muestra en la investigación realizada por Pádua *et al.* (2020), en la cual, se establecen errores en la medición de distancias que oscilan entre 0.44% y 4%, tras comparar los resultados arrojados por los modelos fotogramétricos digitales y las mediciones realizadas a nivel de terreno en el sitio del accidente y considerando condiciones de clima ideales para la operaciones de la aeronave no tripulada (días de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente y dentro de una amplia área abierta y libre de obstáculos). Asimismo, Jin *et al.* (2016) realizaron experimentación en las mismas condiciones de operación para el equipo UAV que definió Pádua *et al.* (2020), obteniendo un rango de porcentaje para el error relativo en la medición de distancias de entre el 1.20% y 9.94%. Por último, (Salas , 2019) realizó investigación con equipo UAV operado en días soleados y bajo presencia de obstáculos, lo que le brindó un error acumulado, en mediciones para el plano “xy”, que varía en un rango del 1.6% al 3.8%.

Entre los autores que han obtenido fotogrametría con el uso de vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) también destacan Kamnik *et al.* (2020). Estos autores realizaron croquis y bocetos simples a partir de mediciones obtenidas en campo con flexómetro. También obtuvieron mediciones complejas y modelos 3D de escenas de accidentes con Escáneres Laser Terrestres (TLS, por sus siglas en inglés). En su investigación, concluyen que las mediciones obtenidas en el lugar del accidente con una cinta métrica son lentas y podrían ser inexactas. Asimismo, mencionan que el uso de escáneres y UAV reducen el tiempo de recolección de datos.

Stáña *et al.* (2017) realizaron una investigación en la que se evaluó la eficacia de un método avanzado utilizado para la documentación de escenas de accidentes de tránsito, en la cual, se empleó la estación total geodésica y la documentación fotogramétrica de trazos a partir de puntos de control marcados, para su posterior rectificación con equipo UAV. Los resultados obtenidos sugieren que el método avanzado estudiado en el que se emplea la estación total geodésica y la rectificación mediante el uso de equipo UAV ha sido gradualmente utilizado por la policía para el uso práctico en la investigación de accidentes de tránsito serios por sus innegables ventajas y por ser un proceso de documentación más rápido y preciso.

Por su parte, Pádua *et al.* (2020) realizaron una comparación entre los enfoques disponibles para abordar la reconstrucción de escenas de accidentes de tránsito utilizando; el flexómetro u odómetro de rueda, esbozos y fotografías, la estación total geodésica, el escaneo mediante láser, receptores Global Navigation Satellite System (GNSS) y equipo UAV. Para probar diversos escenarios, los autores realizaron considerables misiones de vuelo con equipo UAV bajo circunstancias ideales (días de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente y dentro de una amplia área abierta y libre de obstáculos), estableciendo escenarios de accidentes en condiciones controladas. Como resultado de la investigación, se obtuvieron resultados alentadores de la evaluación de los

diferentes experimentos, que atestiguan la viabilidad de utilizar UAV para la investigación de accidentes de tránsito en muchos entornos caracterizados por varias condiciones controladas Pádua *et al.* (2020).

Atendiendo a lo anterior, Salas (2019) ha hecho un gran esfuerzo de investigación para identificar daños sobre la corona de un camino con gran precisión y confiabilidad al utilizar los equipos UAV Phantom 3 Pro e Inspire 1 Pro (DJI TECHNOLOGY CO., LTD, Shenzhen, China) para analizar las fallas superficiales e identificar grietas presentadas sobre un pavimento flexible a través de imágenes, las cuales, permitieron realizar el procesamiento y aplicación de filtros para la obtención de áreas de pavimento por medio de la segmentación con el filtro de Gabor y segundo, la obtención de grietas superficiales con la umbralización, aplicando el filtro Otsu. La umbralización es una de las técnicas más populares y es utilizada en el proceso digital de segmentación de imágenes Forero *et. al* (2016).

Como se mencionó anteriormente en las investigaciones realizadas por Salas (2019), Kamnik *et al.* (2020), Staña *et al.* (2017) y Pádua *et al.* (2020), se propone obtener ventaja de las imágenes obtenidas con equipo UAV debido a que la recolección de datos en campo empleando instrumentos y técnicas métricas tradicionales para la reconstitución de un accidente es lenta y podría ser inexacta si se compara con la facilidad y precisión generadas al conseguir información a partir de modelos creados con imágenes obtenidas utilizando aeronaves no tripuladas.

### **3. Hipótesis**

A través del uso de un vehículo aéreo no tripulado y operado bajo distintas condiciones climáticas y el procesamiento fotogramétrico digital georreferenciado a puntos de control terrestres, se corrige la variabilidad causada por efectos de clima sobre las coordenadas registradas en las fotografías aéreas y se obtiene un error relativo menor al cinco por ciento en la medición de distancias y huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco.

## **4. Objetivos**

### 4.1 Objetivo general

Mejorar el proceso de identificación y posicionamiento de huellas de frenado sobre un pavimento a través del uso de un vehículo aéreo no tripulado y el procesamiento fotogramétrico de imágenes.

### 4.2 Objetivos específicos

Documentar la escena de un accidente a nivel de superficie terrestre y vía aérea.

Establecer relaciones, grado de asociación y precisión entre las variables estudiadas y los métodos de evaluación y reconstrucción de escenarios de accidentes; tradicional y fotogramétrico con equipo UAV.

## 5. Metodología.

En la Figura 5-1 se ilustra el diagrama de la metodología empleado en la reconstitución de escenarios de accidentes.

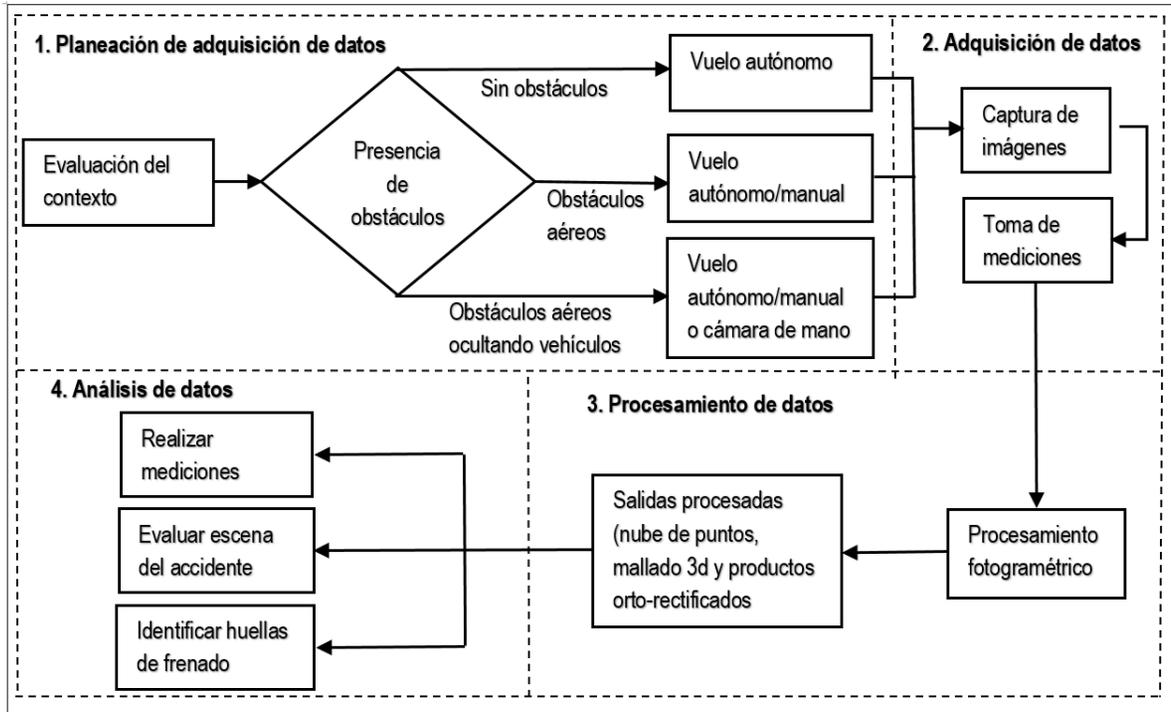


Figura 5-1 Metodología de reconstitución de accidentes de tránsito basada en vehículos aéreos no tripulados (UAV) - diagrama funcional. Elaboración propia a partir de Pádua *et al.* (2020).

### 5.1 Metodología propuesta para el proceso de recreación de eventos de accidentalidad

Levantamiento realizado por el método que emplean las fuerzas policiales

La metodología propuesta inicia cuando se evalúa la escena de un accidente que ya ha ocurrido por el método que emplean la mayoría de las fuerzas policiales y que es descrito en la sección de la justificación (área de influencia,

número de vehículos involucrados, así como la dispersión de los elementos de potencial interés) y las condiciones de contexto (condiciones ambientales, de luz y presencia de obstáculos). Asimismo, se documenta información relevante del estado de conservación de la vía y daños ocurridos, mismos que son medibles en términos de superficie (área), distancias y volúmenes, generalmente.

Durante el tiempo que se empleó en realizar el levantamiento habitual bajo la metodología que emplean las fuerzas policiales, se generó también, el levantamiento de puntos de control terrestres como se especifica a continuación.

Nota: Durante el levantamiento realizado en campo por el método que emplean las fuerzas policiales, se contó con señalización vial en la zona del accidente como lo indica la NOM-086-SCT2-2015 (SCT, 2015) y el equipo de protección personal (EPP) (chaleco reflejante y botas de seguridad, principalmente) que indica la NOM-017-STPS-2008 (STPS, 2008).

## 5.2 Levantamiento geodésico de puntos de control terrestres

En esta investigación se consideró la realización del levantamiento de puntos de control por el método estático, aunque se puede ejecutar con otro método en caso de no contar con disponibilidad de los equipos geodésicos necesarios para ello, o bien, cuando el tiempo asignado para el restablecimiento de las condiciones de operación habituales de la carretera afectada por el accidente así lo permita.

Nota: Durante el levantamiento geodésico en campo, se contó con señalización vial en la zona del accidente como lo indica la NOM-086-SCT2-2015 (SCT, 2015) y el equipo de protección personal (EPP) que indica la NOM-017-STPS-2008 (STPS, 2008)

## Configuración para el método estático

Este método es para proyectos en los que los traslados entre puntos no representan mucho tiempo, principalmente porque está en función de la relación distancia – tiempo de observación y se aplica en posicionamiento de vectores cuya distancia sea menor a 20 kilómetros aproximadamente (INEGI, 2015).

- Se establecieron tres puntos de control (como mínimo) para cada área dónde se presentó un accidente (INEGI, 2015).
- Los puntos de control fueron leídos con un receptor GNSS o GPS de alta precisión (INEGI, 2015).
- Las distancias observadas fueron menores a 20 kilómetros (INEGI, 2015).

Convenientemente, el levantamiento geodésico se realizó posterior a la toma de fotografías aéreas con equipo UAV, debido a que las condiciones de tránsito vehicular así lo permitieron, pudiendo realizarse también, previo al levantamiento fotogramétrico con equipo UAV.

### 5.3 Levantamiento fotogramétrico con equipo UAV

La metodología empleada se dividió en dos etapas:

Durante el proceso de obtención de imágenes, un pequeño número de distancias entre puntos de referencia, fueron medidas para asegurar la calidad de la reconstitución del escenario de un accidente carretero. Además, en ocasiones y con propósitos de calibración, se utilizaron: barras de dimensiones conocidas (colocándolas en el área de interés en direcciones concurrentes), la cinta métrica u odómetro de rueda, un GPS geodésico como receptor GNSS (Global Navigation Satellite System) o SSNG (Sistema Satelitales de Navegación Global) o una estación total geodésica.

Para tener mejor precisión en la captura de imágenes, el modo de vuelo preestablecido de la aeronave fue el autónomo, de tal manera que, se evitó la operación del equipo UAV en modo manual, con el objetivo de minimizar la intervención humana durante el proceso de adquisición de datos, reduciendo así la probabilidad potencial de generar errores.

Nota: Durante el levantamiento fotogramétrico en campo, se contó con señalización vial en la zona del accidente, como lo indica la NOM-086-SCT2-2015 (SCT, 2015) y el equipo de protección personal (EPP) que establece la NOM-017-STPS-2008 (STPS, 2008).

## Especificaciones de software y hardware utilizado

### Hardware

En el proceso de selección del vehículo aéreo no tripulado más adecuado para desarrollar la metodología propuesta, se consideraron aspectos relevantes tales como: el empaque para la protección del equipo, la disposición para el adecuado transporte y la facilidad de manejo. Además, se tomó en cuenta la disponibilidad del equipo y que perteneciera a la categoría micro según la clasificación que asigna la NOM-107-SCT3-2019 (SCT, 2019), ya que, a decir de (Vargas & Paneque, 2020), se exige menor regulación que para drones de otras categorías y no requiere de un permiso especial para su operación.

Entre los equipos disponibles de tamaño micro (menor a 2 kg), primero se seleccionó por tipo de ala, y el más conveniente fue el que cuenta con ala rotatoria, en lugar de un ala fija, esto debido a su habilidad para realizar despegues y aterrizajes totalmente verticales, así como su gran capacidad para permanecer en una posición estacionaria durante el vuelo Pádua *et al.* (2020). Asimismo, los drones de ala rotatoria, no requieren que el aire sea movido a través de sus alas para mantenerse a flote (Verbeke & De Schutter, 2018). El UAV de ala rotatoria más usual es el cuadricóptero (un UAV con cuatro rotores). No obstante, existen otros UAVs comunes como el helicóptero (UAV con un rotor), el hexacóptero (seis rotores) y el octacóptero (ocho rotores) Shraim *et. al* (2018). En este trabajo de investigación se utilizó un UAV del tipo cuadricóptero.

De conformidad con Pádua *et al.* (2020), varios autores con amplia experiencia en la operación de diferentes UAVs, recomiendan el uso de cualquiera de los siguientes dos equipos: DJI Phantom 4 o su predecesor, DJI Phantom 3 Standard (DJI TECHNOLOGY CO., LTD, Shenzhen, China). Para efecto de este estudio, se otorgó prioridad al uso del equipo DJI Phantom 4 ADVANCED.

Para complementar la captura de imágenes obtenidas con UAV, se tomaron capturas a nivel de suelo con cámaras incluidas en los equipos smartphones que, a su vez, cuenten con capacidades de GPS incorporadas y una calidad de cámara aceptable (12 MP) Pádua *et al.* (2020).

En las Tablas 5-1, 5-2 y 5-3 se enlistan las especificaciones del estabilizador, la aeronave y cámara del equipo que se utilizó, respectivamente.

Tabla 5-1 Especificación de estabilizador

| <b>Estabilizador</b>                      |  |
|---|--|
| <b>Estabilización</b>                     | 3-ejes (cabeceo, alabeo, guiñada)          |
| <b>Intervalo controlable</b>              | Inclinación: $-90^{\circ}$ a $+30^{\circ}$ |
| <b>Velocidad angular máx. controlable</b> | Cabeceo: $90^{\circ}/s$                    |
| <b>Precisión del control angular</b>      | $\pm 0.02^{\circ}$                         |

Fuente: (DJI, 2017)

Tabla 5-2 Especificación aeronave.

| Aeronave  |  |
|---|--|
| <b>Peso (batería y hélices incluidas)</b>             | 1 368 g  |
| <b>Tamaño diagonal (sin hélices)</b>                  | 350 mm   |
| <b>Velocidad de ascenso máx.</b>                      | Modo-S: 6 m/s (19.7 ft/s)                          |
|   | Modo-P: 5 m/s (16.4 ft/s)                          |
| <b>Velocidad de descenso máx.</b>                     | Modo-S: 4 m/s (13.1 ft/s)                          |
|   | Modo-P: 3 m/s (9.8 ft/s)                           |
| <b>Velocidad máx.</b>                                 | 72 km/h (45 mph) (Modo-S)                          |
|   | 58 km/h (36 mph) (Modo-A)                          |
|   | 50km/h (31mph) (Modo-P)                            |
| <b>Ángulo de inclinación máx.</b>                     | 42° (Modo-S)                                       |
|   | 35° (Modo-A)                                       |
|   | 25° (Modo-P)                                       |
| <b>Velocidad angular máx.</b>                         | 250°/s (Modo-S)                                    |
|   | 150°/s (Modo-A)                                    |
| <b>Altura máx. de servicio sobre el nivel del mar</b> | 6 000 m (19 685 pies)                              |
| <b>Resistencia al viento máx.</b>                     | 10 m/s   |
| <b>Tiempo de vuelo máx.</b>                           | 30 minutos aprox.                                  |
| <b>Rango de temperatura de funcionamiento</b>         | De 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)                      |
| <b>Sistemas de posicionamiento por satélite</b>       | GPS / GLONASS                                      |
| <b>Rango de precisión de vuelo estacionario</b>       | Vertical:<br>±0,1 m (con posicionamiento visual)   |
|   | ±0,5 m (con posicionamiento por GPS)               |
|   | Horizontal:<br>±0,3 m (con posicionamiento visual) |
|   | ±1,5 m (con posicionamiento por GPS)               |

Fuente: (DJI, 2017)

Tabla 5-3. Especificación cámara.

| Cámara  |  |
|---|--|
| <b>Sensor</b>                                       | 1" CMOS  |
|   | Píxeles efectivos: 20M   |
| <b>Objetivo</b>                                     | FOV 84° 8.8 mm / 24 mm (formato equivalente a 35 mm) f/2.8 - f/11, enfoque a 1 m - ∞ |
| <b>Rango ISO</b>                                    | Vídeo:   |
|   | 100 - 3200 (Automático)  |
|   | 100 - 6400 (Manual)  |
|   | Foto:  |
|   | 100 - 3200 (Automático)  |
|   | 100- 12800 (Manual)  |
| <b>Velocidad obturador mecánico</b>                 | 8 - 1/2000 s   |
| <b>Velocidad obturador electrónico</b>              | 8 - 1/8000 s   |
| <b>Tamaño de imagen</b>                             | Proporción de imagen 3:2: 5472 x 3648  |
|   | Proporción de imagen 4:3: 4864 x 3648  |
|   | Proporción de imagen 16:9: 5472 x 3078   |
| <b>Tamaño de imagen de video</b>                    | 4096×2160(4096×2160 24/25/30/48/50p)   |
|   | 3840×2160(3840×2160 24/25/30/48/50/60p)  |
|   | 2720×1530(2720×1530 24/25/30/48/50/60p)  |
|   | 1920×1080(1920×1080 24/25/30/48/50/60/120p)  |
|   | 1280×720(1280×720 24/25/30/48/50/60/120p)  |
|   | 1280×720(1280×720 24/25/30/48/50/60/120p)  |
| <b>Modos de fotografía</b>                          | Disparo único  |
|   | Disparo en ráfaga: 3/5/7/10/14 fotogramas  |
|   | Exposición Automática en Horquillado (AEB): 3/5 horquilla de exposición a 0.7EV bias |
|   | Intervalo: 2/3/5/7/10/15/20/30/60 s  |
| <b>Tasa de Bits Máx. de Almacenamiento de Vídeo</b> | 100 Mbps   |
| <b>Foto</b>   | JPEG, DNG (RAW), JPEG + DNG  |
| <b>Vídeo</b>  | MP4/MOV (AVC/H.264; HEVC/H.265)  |
| <b>Rango de temperatura de funcionamiento</b>       | de 0 a 40 °C (de 32 a 104 °F)  |

Fuente: (DJI, 2017)

## Software

Por otra parte, para la planeación y ejecución del vuelo, se utilizaron dos herramientas de software: DJI GO (DJI TECHNOLOGY CO., LTD, Shenzhen, China) y Pix4Dcapture (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland).

## Variabilidad de las condiciones ambientales

Durante el vuelo del equipo UAV, las siguientes condiciones del contexto influyeron en la calidad de las fotografías capturadas:

- a) La presencia de obstáculos inamovibles que impidieron parcial o totalmente el acceso de los vehículos UAV a la escena del accidente.
- b) Condiciones de luz adversa.
- c) Condiciones de clima desfavorables.

Las condiciones de clima particulares presentadas durante el vuelo del equipo UAV en las etapas número tres y cuatro de la metodología propuesta fueron, principalmente, días de cielo parcialmente nublado (condición desfavorable por presentar luz adversa) y velocidades de viento variables en el rango de cero hasta diez metros por segundo. Lo anterior, tomando en consideración el clima presentado en el área definida para llevar a cabo la investigación; en la ubicación de la zona de estudio, es semiseco semicálido y se caracteriza por tener temperaturas no muy elevadas, con escasas variaciones térmicas a lo largo del año, con una estación lluviosa durante los meses de julio, agosto y septiembre (PROINTEC, 2011), con precipitaciones que, ocasionalmente, pueden llegar a ser intensas en algunos períodos (Véase Figura 5-2). Es importante mencionar, que, en el presente trabajo de investigación, se evitó realizar vuelos en condiciones de clima extremo como la lluvia, además de que el estudio se enfoca a pavimento asfáltico seco, por ende, no se tomó en cuenta la condición climática de lluvia presentada en los meses de julio, agosto y septiembre en el área de investigación durante la operación del equipo UAV.

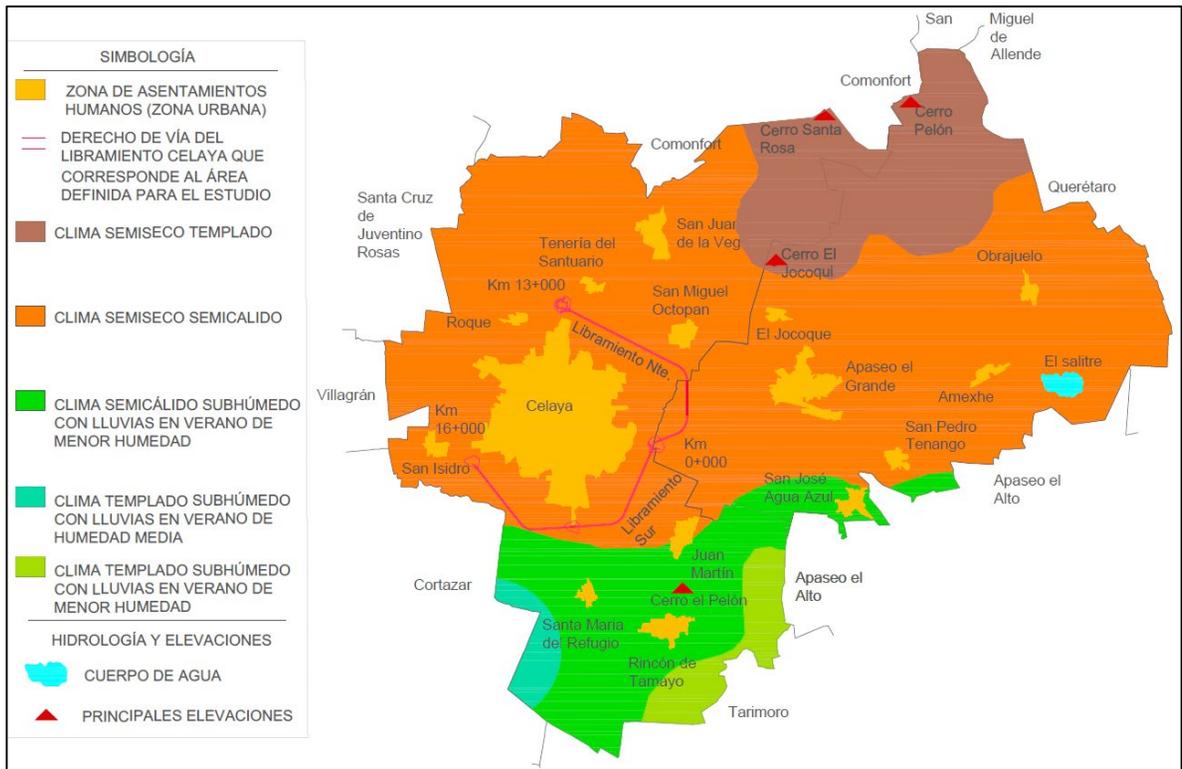


Figura 5-2 Climas presentados en la zona definida para realizar la investigación.

Fuente: Elaboración propia a partir de INEGI (2009)

De conformidad con las variaciones en las condiciones ambientales y de luz presentadas anteriormente, en la Tabla 5-4, se muestra la forma de recabar la captura de imágenes en cada caso.

Tabla 5-4 Metodología propuesta para la reconstitución de escenarios de accidentes y sus respectivos procesos para la captura de imágenes

|  |   |
|--|---|
| Ausencia de obstáculos (situación ideal)   | se<br>Un UAV puede realizar un vuelo autónomo, planeado con el software adecuado.   |
| Presencia de algunos obstáculos, restringiendo el acceso del UAV a al menos una perspectiva. | de<br>Un UAV puede realizar un vuelo autónomo, planeado con el software adecuado. En caso de ser necesario, la captura de imágenes se complementará usando el modo de vuelo manual, o bien, una cámara a nivel de suelo, pudiendo ser la de un smartphone (para áreas confinadas de pocos metros cuadrados; capturas de estilo orbital) |
| Condiciones de luz adversa   | Fuentes de luz artificial se pueden configurar alrededor del área de interés como una alternativa/complemento. Además, siempre que el uso de UAVs lo permita, fuentes portátiles ligeras de luz, pueden ser montadas en un UAV, asegurándose que la cámara no este ocluida ni sobreexpuesta.  |

Fuente: Elaboración propia a partir de Pádua *et al.* (2020).

#### 5.4 Procesamiento fotogramétrico con software

Por último, los datos adquiridos sobre el escenario del accidente de tránsito fueron procesados utilizando un software fotogramétrico para obtener un mosaico de ortofoto o una reconstrucción tridimensional de un modelo para documentar digitalmente el accidente. En esta investigación se utilizó el software denominado Autodesk ReCap Photo versión 2021 y Autodesk Recap Pro versión 2021.

La reconstitución del escenario de un accidente está representada por un modelo 3D georreferenciado o una nube de puntos o una ortofoto, a partir de las cuales, una medición precisa puede ser tomada, editada o complementada en cualquier parte del tiempo a través del uso de un software específico capaz de lidiar con datos de Sistemas de Información Geográfica (GIS) y/o modelos de Diseño Asistido por Computadora (CAD) Pádua *et al.* (2020).

### 5.5 Determinación de velocidades a partir de huellas de frenado

Una vez concluido el procesamiento fotogramétrico con software, se procedió a identificar y medir huellas de frenado en los modelos tridimensionales, ortofotos o nube de puntos creados. A partir de la medición de la longitud de dichas huellas, se determinó la velocidad de operación de los vehículos involucrados en la escena de un accidente utilizando la expresión (16), la cual, aplica para huellas marcadas por el derrape de los vehículos.

### 5.6 Etapas desarrolladas en la metodología propuesta

La investigación se divide en seis etapas que se describen de manera breve a continuación:

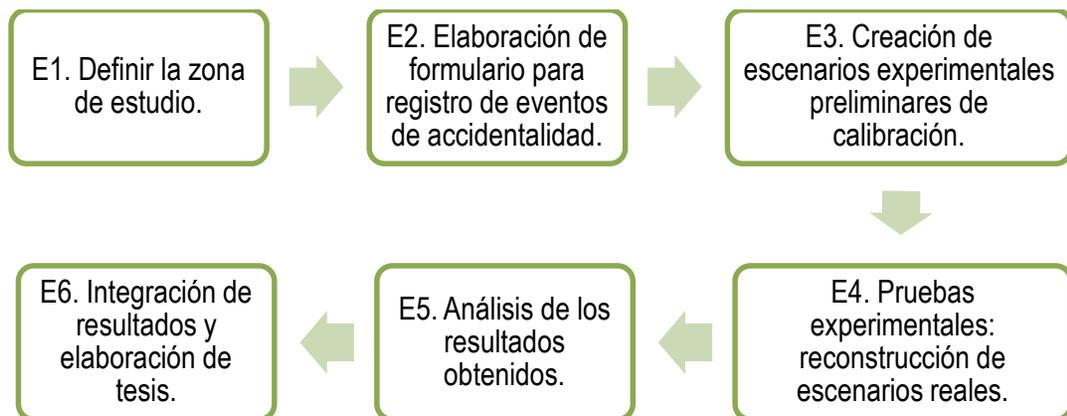


Figura 5-3 Etapas para el desarrollo de la metodología.

## Descripción de las etapas desarrolladas

### Etaapa 1. Definir la zona de estudio

La zona donde se realizó el presente trabajo de investigación fue dentro del derecho de vía de la autopista de cuota denominada Libramiento de Celaya. El “Libramiento de Celaya” hace referencia al Libramiento Sur y el Libramiento Nororiental en su conjunto (Poder Ejecutivo , 2010).

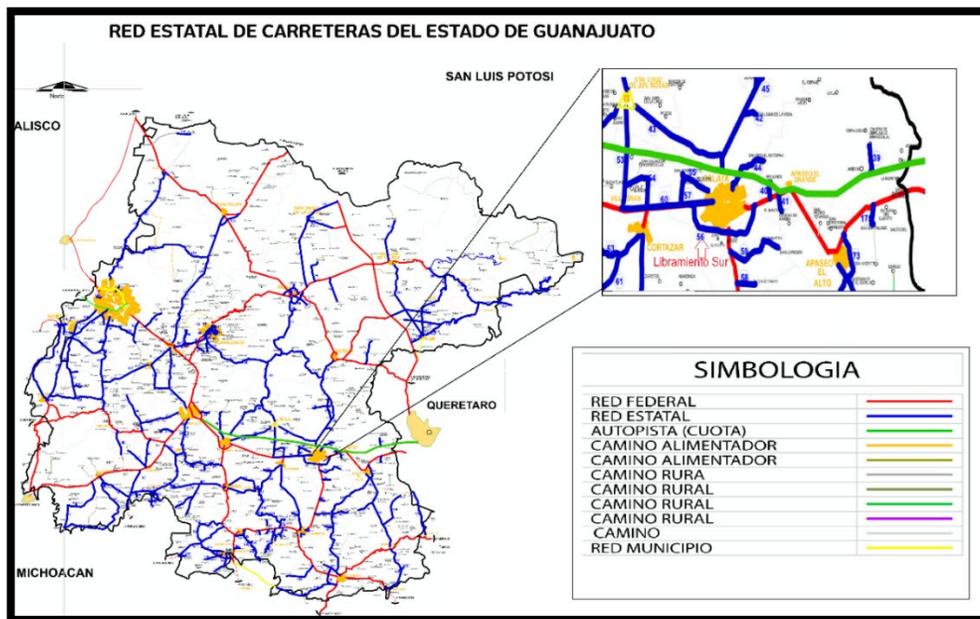


Figura 5-4 Red estatal de carreteras del estado de Guanajuato. Fuente: (Dirección General de Infraestructura Vial de la Secretaría de Obra Pública del Estado de Guanajuato, 2018)

“El Libramiento de Celaya, Gto.” corresponde a una concesión administrativa entre Asociaciones Público-Privadas (APP) conforme se estipula en el título que rige esta concesión y de acuerdo a los programas de conservación desarrollados por la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) y descritos en ese mismo documento (Poder Ejecutivo , 2010).

Para tener un acercamiento conceptual a la definición de APP referimos a Engel, Fisher y Galetovic:

*“...Una APP se define como un acuerdo mediante el cual el gobierno contrata a una empresa privada para construir o mejorar las obras de infraestructura, así como para mantenerlas y operarlas por un periodo prolongado (por ejemplo, 30 años). Como compensación, la empresa recibe un flujo de ingreso a lo largo de la vida del contrato...” Engel et. al (2014).*

Para realizar la clasificación del Libramiento de Celaya no basta con identificársele como una carretera estatal como se ilustra en la Figura 5-4, sino que se le atribuyen normas específicas aplicables en las cuestiones política, administrativa y legal, las cuales, difieren de las que presenta una carretera federal de cuota, principalmente en regulaciones y jurisdicción territorial, así como, en el grado de jerarquía y responsabilidades que asumen las Secretarías encargadas de vigilar su funcionalidad y rentabilidad. Por ende, la correcta clasificación administrativa en México alude a la siguiente expresión: una carretera estatal se describe como aquella a cargo de las Juntas Locales de Caminos y una carretera federal se identifica como directamente a cargo de la Federación (Cal y Mayor & Cárdenas, 2007) .

Es necesario conocer las condiciones y aspectos que imperan en la zona de estudio, así como su demarcación y delimitación, por lo que para georreferenciar adecuadamente la ubicación de esta infraestructura es necesario remitirse a los límites territoriales como se ilustra en la Figura 5-5.

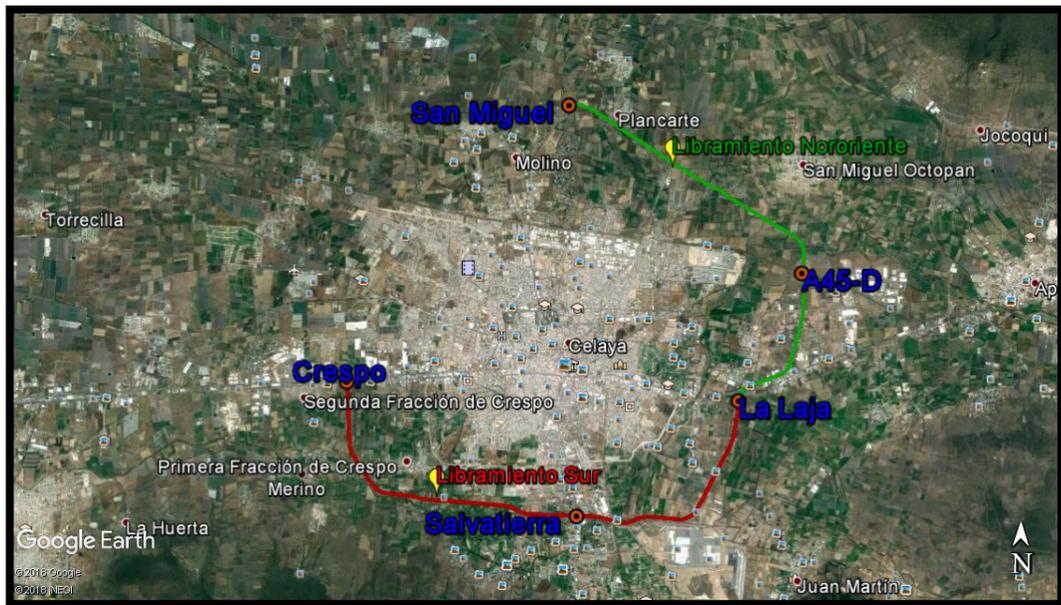


Figura 5-5 Ubicación y trayectoria del Libramiento de Celaya en el sistema geográfico de mapas. Fuente: (Google Earth, 2018)

Al margen del Libramiento de Celaya se sitúan las ciudades de Celaya, Cortázar, Apaseo el Alto, Apaseo el Grande y comunidades aledañas, todas dentro del estado de Guanajuato.

También resulta indispensable identificar las características geométricas de cada uno de los dos Libramientos por separado como se describe a continuación:

*“**Libramiento Nororiental** significa el tramo carretero de cuota tipo A2 con una longitud de 12.93 kilómetros que iniciará en el entronque a desnivel La Laja km (0+000) en el cruce con la carretera federal libre de peaje no. 45 Querétaro – Irapuato, y terminará en el entronque San Miguel (kilómetro 12+930) en el cruce con la carretera estatal Celaya – San Miguel de Allende, con una corona de 12 metros para albergar 2 carriles de 3.50 metros de ancho cada uno y acotamientos exteriores de 2.5 m por acotamiento” (Poder Ejecutivo , 2010).*

*“**Libramiento Sur** significa el tramo carretero de cuota conocido como el Libramiento Sur o Arco Vial Sur de Celaya, el cual tiene una longitud de 16.45 kilómetros, inicia en el Entronque La Laja (kilómetro 0+000) y termina en el entronque Crespo (kilómetro 16+450), ambos cruces con la carretera federal libre de peaje no. 45 Querétaro – Irapuato, y presenta características de autopista de sección tipo A4S con dos cuerpos de corona de 10.50 metros cada uno con 2 carriles de 3.5 metros de ancho y acotamientos externos de 2.5 metros e interior de 1.0 metros” (Poder Ejecutivo , 2010).*

## Etapa 2. Elaboración de formulario para registro de eventos de accidentalidad

La creación del formulario fue una etapa muy importante ya que este registro fue completado en campo por el responsable de ejecutar la investigación para documentar los datos de la escena del accidente de la manera tradicional, y posteriormente, fueron comparados con los obtenidos en la recreación de la escena del accidente con los modelos 3D o nube de puntos obtenidos a partir de fotogrametría recabada con equipo UAV. El formulario contiene (al menos) las siguientes secciones específicas, los parámetros de vuelo, condiciones de clima presentadas, registros de mediciones realizadas en campo con flexómetro y odómetro de rueda, así como la documentación de obstáculos y sus características, además de un croquis realizado a mano alzada para cada escenario correspondiente. El formulario utilizado se incluye como Anexo 1 en la sección Anexos de este documento.

### Etapa 3. Creación de escenarios experimentales preliminares de calibración

Un conjunto de pruebas de experimentación preliminares, considerando las condiciones de contexto más adecuadas (días de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente y dentro de una amplia área abierta y libre de obstáculos) fueron desarrolladas (un mínimo de dos escenarios) considerando los siguientes parámetros de vuelo del equipo UAV:

- Modo de vuelo: Autónomo.
- Tipo de malla: Malla doble (Double Grid; DG)
- Altura de vuelo: mayor a 10 metros y menor a 50 metros.
- Ángulo de cámara (°): Entre 30 a 90.
- Traslape de imágenes (%): entre 60 a 90.

Los parámetros anteriores se definieron desde que Pádua *et al.* (2020) indicó en su investigación que utilizando un equipo DJI Phantom 4 y bajo condiciones ideales o adecuadas para el vuelo; los resultados más precisos, se obtuvieron utilizando como parámetros de vuelo: una malla doble para la toma de las fotografías aéreas en vuelo autónomo del equipo UAV a 15 metros de altura con orientación de la cámara en un ángulo de 65°.

Los escenarios se presentaron únicamente en zona de carretera, excluyendo la zona urbana por las características propias del área de estudio y debido a que Pádua *et al.* (2020) establece que el error relativo obtenido en la medición de distancias en el plano “xy” es similar en el contexto urbano y zona de carretera. La única diferencia existente es que en el contexto urbano se presenta un mayor número de obstáculos.

La metodología realizada para el desarrollo de esta etapa se describe a continuación:

Para realizar el levantamiento preliminar de puntos de control terrestres en las escenas de accidentes ocurridos, se utilizó un dispositivo GPS de mano de la marca Garmin, modelo 64csx con las características físicas y de rendimiento mostradas en la Tabla 5-5.

Tabla 5-5 Características físicas y de rendimiento de GPS

|  |   |
|--|---|
| Dimensiones físicas                            | 6,1 x 16,0 x 3,6 cm                                   |
| Tamaño de la pantalla (anchura x altura)       | 3,6 x 5,5 cm; 6,6 cm de diagonal                      |
| Resolución de la pantalla (anchura por altura) | 160 x 240 píxeles                                     |
| Tipo de pantalla                               | TFT transflectiva de 65.000 colores                   |
| Peso   | 260,1 g con pilas                                     |
| Batería  | 2 pilas AA (no incluidas); se recomienda NiMH o litio |
| Autonomía de la batería                        | 16 horas  |
| Clasificación de resistencia al agua           | IPX7  |
| Interfaz del equipo                            | Compatible con USB de alta velocidad y NMEA 0183      |
| Altímetro barométrico                          | Si  |
| Cámara fotográfica                             | Si. 8 Mega Pixeles                                    |
| Brújula electrónica                            | Sí (tres ejes con inclinación compensada)             |

Fuente: (Garmin, 2013)

El dispositivo GPS utilizado cuenta con los sensores especificados en la Tabla 5-6

Tabla 5-6 Sensores de GPS Garmin, modelo 64csx

|  |   |
|--|---|
| GPS  | X   |
| GLONASS                                      | X   |
| GALILEO                                      | X   |
| Altímetro barométrico                        | X   |
| Brújula                                      | Sí (tres ejes con inclinación compensada) |
| Brújula GPS (mientras se está en movimiento) | X   |

Fuente: (Garmin, 2013)

La configuración de GPS utilizada para marcar los puntos de control terrestres fue la indicada en la Tabla 5-7.

Tabla 5-7 Configuración del GPS

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Sistema de satélite          | GPS+GLONASS                                |
| Formato de posición          | UTM UPS                                    |
| Datum del mapa               | WGS 84                                     |
| Esferoide del mapa           | WGS 84                                     |
| Altimetro                    | Calibración automática activada            |
| Precisión de posicionamiento | 3 m promedio                               |
| Modo barómetro               | Altura variable                            |
| Cámara                       | Resolución de foto: Alta (8 MP) 999+ fotos |
| Tiempo para marcar el punto  | Aproximadamente 60 segundos                |

Elaboración propia a partir de (Garmin, 2013)

Nota: Para el registro de puntos de control se acudió al lugar del accidente y se tomaron al menos tres puntos. Asimismo, se realizó el vuelo de dron con los parámetros descritos en esta etapa de la metodología propuesta. También se llevó a cabo el levantamiento y medición de huellas de frenado en campo con el procedimiento y equipos que utilizan comúnmente las fuerzas policiales.

- Una vez recolectados los puntos de control terrestres con el GPS Garmin modelo 64csx, se utilizó el software MapSource de Garmin (Véase Figura 5-6) para visualizar y exportar los puntos de control terrestres (Waypoints) en formato de texto y poder ingresar de una manera correcta las coordenadas y altitud en el software de procesamiento fotogramétrico.

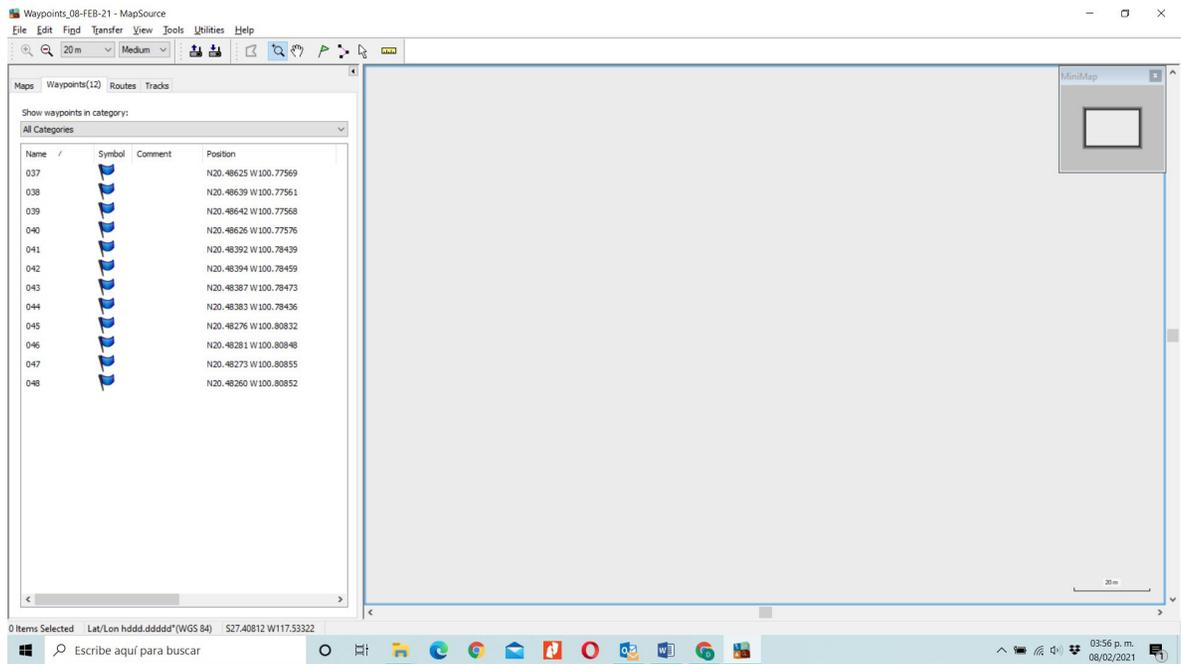


Figura 5-6 Software MapSource para visualización de Waypoints (Garmin, 2013)

Una vez exportados los Waypoints a un archivo de texto, se ingresaron en el software Autodesk ReCap Photo 2021 (Autodesk , 2020) y/o en Pix4Dcapture (Pix4D SA, Lausanne, Switzerland) y se ubicaron en las imágenes obtenidas con UAV.

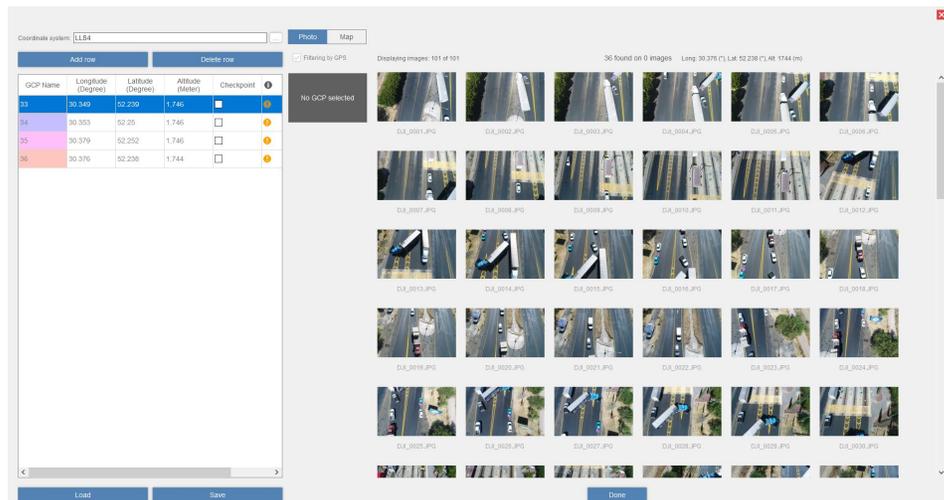


Figura 5-7 Waypoints de imágenes aéreas ingresadas al software ReCap Photo

Posterior a que los puntos de control terrestres y las fotografías aéreas fueron cargados en el software de procesamiento fotogramétrico, se inició con la creación de la ortofoto, nube de puntos y modelo 3D de la escena de cada uno de los accidentes analizados. Al finalizar el procesamiento fotogramétrico se tomaron medidas de huellas de frenado directamente en el software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022 y se registran en la tabla correspondiente.

Con la información obtenida del procesamiento fotogramétrico se registró el error de posicionamiento y el porcentaje de error en la distancia obtenida para huellas de frenado.

Finalmente, para determinar la velocidad inicial a la que viajaban los vehículos previo a la ocurrencia del accidente, se ingresan a la ecuación (16) los siguientes datos:

- Distancia obtenida a través del procesamiento de fotografías obtenidas con UAV.
- El valor de aceleración de la gravedad, (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- Velocidad final (m/seg) del vehículo.
- Pendiente longitudinal de la carretera, (m/m).
- Coeficiente de fricción entre un pavimento flexible seco y el neumático del vehículo, el cual, se describe en la Tabla 5-8 extraída de la Publicación Técnica número 245 del IMT (2004).

Tabla 5-8 Límites permisibles del coeficiente de fricción para pavimento seco

| Pavimento \ Vehículo | C2, C3, C4 | A, B1, B2 | T2-S2, T3-S2, T3-S3 | T3-S2-R2, T3-S2-R4 |
|----------------------|------------|-----------|---------------------|--------------------|
| Rígido               | 0.80       | 0.85      | 0.80                | 0.80               |
| Flexible             | 0.80       | 0.85      | 0.85                | 0.85               |
| Poroso               | 0.75       | 0.85      | 0.85                | 0.85               |
| Lechadas             | 0.80       | 0.90      | 0.80                | 0.85               |
| Sellos               | 0.85       | 0.90      | 0.75                | 0.80               |

Fuente: (IMT, 2004)

#### Etapa 4. Pruebas experimentales: reconstrucción de escenarios reales

Recreación de accidentes bajo condiciones climáticas no extremas, pero desfavorables

En esta etapa se presentó la reconstrucción de escenas de accidentes reales (un mínimo de tres escenarios) a partir de fotogrametría obtenida con equipo UAV y los resultados fueron comparados con el método de reconstrucción que utilizan las fuerzas policiales en autopistas, actualmente.

Se realizó la operación del equipo UAV, específicamente, en días nublados Ranquist *et al.* (2017) y/o con una velocidad de viento de hasta 10 m/s (DJI, 2017).

Fueron considerados los siguientes parámetros de vuelo con equipo UAV:

- Modo de vuelo: Autónomo.
- Tipo de malla: Malla doble (Double Grid; DG)
- Altura de vuelo: mayor a 10 metros.
- Ángulo de cámara (°): Entre 30 a 90.
- Traslape de imágenes (%): entre 60 a 90.

El tamaño de la muestra fue de seis accidentes, debido a que la selección se ejecutó según su ocurrencia, ya que se presentó gran dificultad en la predicción de la fecha y hora en que ocurriría un accidente y su ubicación. En ese sentido, solo se tomaron en cuenta aquellos accidentes reales reportados al Centro de Control de Operaciones (CCO) ubicado en Libramiento Sur caseta Laja Km 0+820, Col. San Isidro de Trojes, C.P. 38143, Celaya, Guanajuato, los cuales, fueron del conocimiento y difusión pública e informados a través de los medios electrónicos oficiales de la Secretaría de Infraestructura, Conectividad y Movilidad (SICOM) y su ubicación fue accesible y la gravedad de los hechos ocurridos, o bien, el flujo del tránsito vehicular, no puso en riesgo la salud física y mental del investigador.

Asimismo, en esta etapa, se replicó la metodología propuesta, a excepción de las condiciones de clima ideales para el vuelo del equipo UAV.

Los escenarios se presentaron únicamente en zona de carretera, excluyendo la zona urbana por las características propias del área de estudio y debido a que Pádua *et al.* (2020) establece que el error relativo obtenido en la medición de distancias en el plano “xy” es similar en el contexto urbano y zona de carretera. La única diferencia existente es que en el contexto urbano se presenta un mayor número de obstáculos.

#### 6. Levantamiento geodésico y localización de puntos de control terrestres

##### 7.

El levantamiento geodésico se realizó por el método estático debido a que tiene mayor precisión (entre 3 mm y 1 cm de error) Salas (2019), en relación a los otros métodos aceptados por INEGI (2015).

#### 8. Herramientas y equipo utilizados para realizar el levantamiento geodésico

##### 9.

Un mínimo de tres puntos de control terrestres por zona de accidente fueron leídos con un receptor GNSS o GPS de alta precisión con receptor de la marca SOKKIA, modelo GRX2 de doble constelación (GPS/GLONASS) y una colectora genérica para el registro de datos equipada con el software Topcon Tools en su versión 7.5.1 o más reciente. Las especificaciones del receptor GNSS SOKKIA GRX2 se listan en la Tabla 5-9.

Tabla 5-9 Especificaciones de receptor GNSS SOKKIA GRX2

|                                |                                     |
|--------------------------------|-------------------------------------|
| Número de canales              | 226                                 |
| Señales rastreadas             | GPS, Glonass, SBAS                  |
| GPS                            | L1 CA, L1 / L2 P-Code, L2C, L5      |
| GLONASS                        | L1 / L2 CA, L1 / L2 P-Code          |
| SBAS                           | WASS, EGNOS, MSAS, QZSS             |
| Precisión Estático L1 + L2     | H: 3 mm + 0.5 ppm, V: 5 mm + 0.5 mm |
| Precisión Estático L1 Solo     | H: 3 mm + 0.8 ppm, V: 4 mm + 1 mm   |
| Puertos de comunicación        | Bluetooth, Serial, SD/SDHD          |
| Comunicación inalámbrica       | Bluetooth, UHF, GSM/HSPA, CDMA      |
| Protección contra polvo y agua | IP67                                |
| Tamaño                         | Diá. 184 x H95mm                    |
| Peso: GRX2/batería BDC70       | 1kg / 195g                          |

Fuente: (SOKKIA Corporation, 2013)

10. Software utilizado para realizar el levantamiento geodésico

11.

El software utilizado para registrar los datos en la colectora (directamente en el sitio del accidente) fue Topcon Tools en su versión 7.5.1 o más reciente. No obstante, también se utilizó el software Topcon Tools para computadora en su versión 8.2.3. para realizar el postproceso de los puntos de control terrestre registrados en el sitio del accidente.

Configuración del método estático

En la Tabla 5-10 se muestran, a manera de resumen, los parámetros asignados a la configuración del levantamiento geodésico por el método estático.

Tabla 5-10 Parámetros de configuración para el levantamiento geodésico por el método estático

|  |  |
|--|--|
| Sistema de satélite  | GPS+GLONASS ( <i>Track L2C Signal</i> )                |
| Tiempo de ocupación por cada GCP   | Una hora   |
| Zona horaria   | (UTC-06:00) Guadalajara, Ciudad de México y Monterrey. |
| Sistema de Coordenadas (Proyección)  | Zona_14: 102 W a 96 W                                  |
| Datum  | ITRF2008 época 2010.0                                  |
| Referencia de GCPs a estaciones de la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) | A través de estaciones: UQRO Y UGTO                    |
| Máscara de elevación del receptor  | 13°  |
| Precisión horizontal por el método estático                                | <0.02 m  |
| Precisión vertical por el método estático                                  | <0.05 m  |

Fuente: Elaboración propia

#### Procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas

Las fotografías aéreas adquiridas con UAV sobre los escenarios de los accidentes de tránsito fueron procesadas en el software fotogramétrico denominado Autodesk ReCap Photo versión 2021 para obtener un mosaico de ortofoto.

En el software Autodesk ReCap Photo versión 2021 también se ingresaron como datos de entrada las coordenadas de los puntos de control terrestres referenciadas a la RGNA y se ubicaron dichos puntos en las fotografías aéreas previo a realizar el procesamiento fotogramétrico para obtener el mosaico de ortofoto.

#### Proceso empleado para la medición de huellas de frenado

El proceso para la medición de huellas de frenado se realizó de dos maneras; por el método tradicional y a partir del procesamiento fotogramétrico de manera directa sobre el mosaico de ortofoto creado. Para el método tradicional, las mediciones se realizaron físicamente en el lugar del accidente utilizando dos instrumentos de medición: el flexómetro y el odómetro de rueda.

La precisión de los equipos de medición empleados es milimétrica y decimétrica, respectivamente. En la subsecuente se describe el proceso de medición por cada método.

#### Método tradicional

El método tradicional es el más utilizado por las fuerzas policiales para la investigación y recreación de escenarios de accidentes y consiste en medir las huellas de frenado en campo utilizando una cinta métrica y / o un odómetro de rueda; un bloc de notas, para dibujar el boceto; un lápiz; tiza, para marcar el pavimento y una cámara para documentación fotográfica Pádua *et al.* (2020).

A continuación, se muestran los pasos metodológicos seguidos para realizar la medición de huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco:

- En la ubicación del escenario donde ocurrido el accidente, se marcaron los extremos de las huellas de frenado con una tiza directamente en el pavimento.
- Con ayuda del odómetro de rueda se midió la distancia de las huellas de frenado partiendo de la marca realizada con tiza en un extremo y avanzando en un solo sentido de circulación hasta llegar a la marca del otro extremo.
- Se repitió el paso anterior, empleando un flexómetro.
- Las distancias obtenidas con odómetro de rueda y flexómetro solo se registraron en un solo sentido de medición.
- Al final de la medición, las distancias fueron documentadas en un formulario de reconstitución de escenarios de accidentes junto con un croquis para su mejor identificación.

En la Figura 5-8 se ilustran los extremos de las huellas de frenado identificadas en un accidente. El sentido de medición en todos los escenarios fue del punto A al punto B.

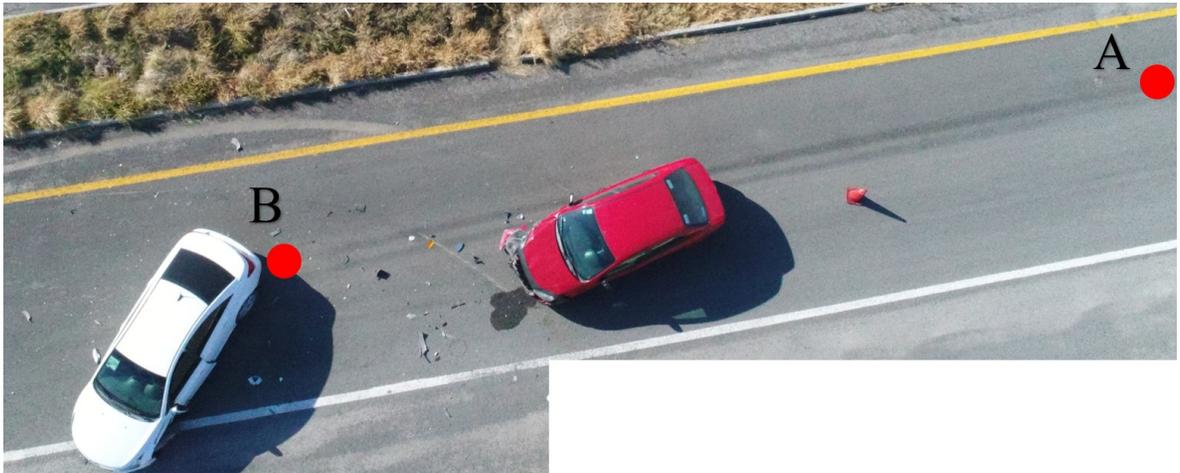


Figura 5-8 Identificación de extremos de huellas de frenado con los puntos A y B

Método a partir de fotogrametría aérea

Con la implementación de este método se obtuvieron las mediciones de distancias de huellas de frenado sobre un pavimento asfáltico seco de manera digital y directamente sobre la ortofoto referenciada en un software especializado. Los pasos metodológicos seguidos se muestran a continuación:

- Una vez realizado el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas en el software Autodesk ReCap Photo versión 2021, de los productos resultantes, se seleccionó la ortofoto y se exportó al software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022.
- En el software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022 se verificó que la ortofoto estuviera georreferenciada de manera correcta.
- Se identificaron las marcas de tiza o testigos colocados en los extremos de las huellas de frenado y se midió la huella directamente con la herramienta de medición del software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022 en el mismo sentido que se tomó la medida en campo con el método tradicional.

## Estimación del error relativo en la medición de huellas de frenado

El cálculo del error relativo en la medición de huellas de frenado entre los resultados obtenidos con el método tradicional y el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV se generó con la Ec. (14).

## Estimación de la velocidad inicial de investigación de los vehículos

El dato fue estimado a partir de la medición de la longitud de las huellas de frenado. Con ello, se determinó la velocidad inicial de los vehículos involucrados en el escenario de cada accidente utilizando la Ec. (16) , la cual, aplica para huellas marcadas por el derrape de los vehículos (Borrel, 2018).

## Recreación de accidentes bajo condiciones climáticas ideales

Se realizó la operación del equipo UAV, específicamente, en días de cielo despejado y soleado con viento débil (menor a 1 m/s) o inexistente y dentro de una amplia área abierta y libre de obstáculos.

Fueron considerados los siguientes parámetros de vuelo con equipo UAV:

- Modo de vuelo: Autónomo.
- Tipo de malla: Malla doble (Double Grid; DG)
- Altura de vuelo: mayor a 10 metros.
- Ángulo de cámara (°): Entre 30 a 90.
- Traslape de imágenes (%): entre 60 a 90.

El tamaño de la muestra fue de cuatro accidentes, debido a que la selección se ejecutó según su ocurrencia, ya que se presentó gran dificultad en la predicción de la fecha y hora en que ocurriría un accidente y su ubicación.

### Configuración del método estático

La configuración del método estático fue la indicada en la Tabla 5-10 y se realizó con los mismos equipos utilizados en la etapa cuatro de esta investigación para los vuelos realizados con equipo UAV bajo condiciones climáticas no extremas, pero desfavorables.

### Proceso empleado para la medición de huellas de frenado

El proceso para la medición de huellas de frenado se realizó de dos maneras; por el método tradicional y a partir del procesamiento fotogramétrico de manera directa sobre el mosaico de ortofoto creado.

### Estimación del error relativo en la medición de huellas de frenado

El cálculo del error relativo en la medición de huellas de frenado entre los resultados obtenidos con el método tradicional y el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV se generó con la Ec. (14).

### Estimación de la velocidad inicial de investigación de los vehículos

El dato fue estimado a partir de la medición de la longitud de las huellas de frenado. Con ello, se determinó la velocidad inicial de los vehículos involucrados en el escenario de cada accidente utilizando la Ec. (16) , la cual, aplica para huellas marcadas por el derrape de los vehículos (Borrel, 2018).

## Etapa 5. Análisis de los resultados obtenidos

Se realizó un análisis reflexivo y comparativo entre los principales datos y productos obtenidos que hacen referencia al error relativo en la medición de distancias que arrojan los modelos creados con fotogrametría aérea y su comparación con aquellos obtenidos por técnicas convencionales utilizadas en la recreación de escenas de accidentes como lo son el uso de herramientas de medición en tierra y dibujos a mano alzada. Implica el razonamiento de datos cuantitativos, principalmente.

## Etapa 6. Integración de resultados y elaboración de tesis

Se concluyó el razonamiento de los datos obtenidos y se documentaron en la tesis, a razón de los cambios, mejoras, adiciones o comparaciones realizadas o adoptadas para la metodología propuesta y referente a la reconstitución de escenas de accidentes con fotogrametría obtenida a través del uso de equipos UAV, sus ventajas, desventajas y grado de precisión obtenido.

## **6. Resultados y discusión**

6.1 Resultados obtenidos durante el desarrollo de la etapa tres de la metodología propuesta.

A los eventos de accidentalidad ocurridos y documentados se les asignó la codificación (clave) correspondiente:

AGAAMMDD\_00 / ACAAMMDD\_00 / INAAMMDD\_00

Donde:

- AG: Accidente Grave: Evento en el que se presentaron decesos de personas o personas con lesiones graves.
- AC: Accidente: Evento en el que se presentaron personas con lesiones leves.
- IN: Incidente: Evento en el que solo se registraron daños materiales.
- AA: Últimos 2 dígitos del año en curso.
- MM: Los 2 dígitos del mes corriente.
- DD: Los 2 dígitos del día de la ocurrencia del evento.
- ##: Los 2 dígitos del número del evento ocurrido en ese día.

A continuación, se describen los escenarios para accidentes recreados.

### **Breve descripción del evento con clave: IN201017\_01**

Un vehículo clase seis (seis ejes) T3-S3 circulaba por el Libramiento Sur de Celaya en el cuerpo A con dirección Laja – Crespo cuando al llegar al km 3+600 sufre falla mecánica en partes bajas (suspensión) lo que provocó su salida de la corona y posterior volcadura en faja lateral del derecho de vía.

En la Figura 6-1 se ilustra la posición número uno del vehículo pesado cuando circulaba por el km 3+400 cuerpo A del Libramiento Sur aproximadamente y sobre el carril de baja velocidad. La posición número dos muestra que el conductor comienza a desviar su trayectoria hacia el acotamiento cuando circulaba por el km 3+500 aproximadamente. Finalmente, la posición número tres del vehículo, muestra su volcadura en la faja lateral a la altura del km 3+600.

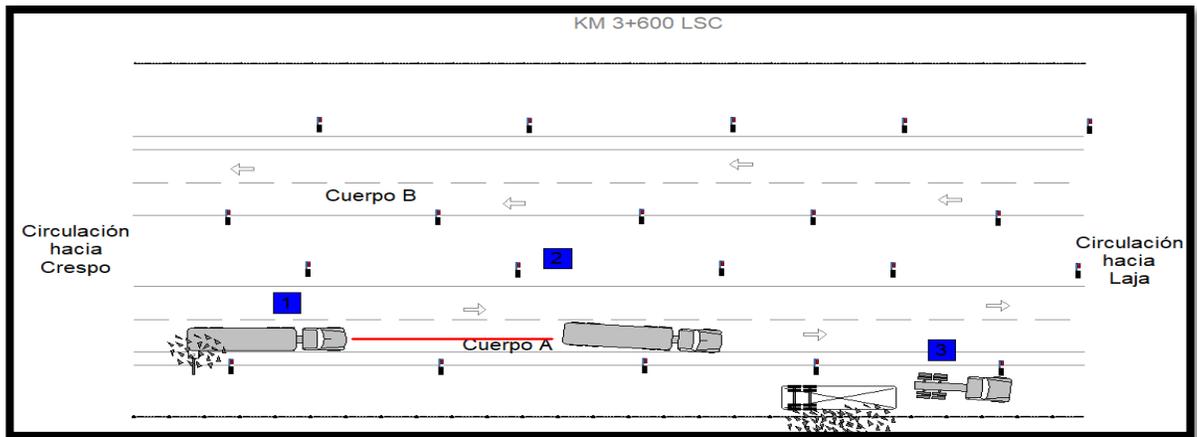


Figura 6-1 Croquis de evento IN201017\_01

En la Tabla 6-1 se muestran los datos preliminares obtenidos del evento de accidentalidad y la fuente proveedora de dichos datos, así como fecha y hora del evento ocurrido.

Tabla 6-1 Fuente de información del evento IN201017\_01

|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| <b>Clave del evento:</b>  | IN201017_01     |
| <b>Tipo de siniestro:</b> | Incidente       |
| <b>Avisó:</b>             | CCO             |
| <b>Jurisdicción:</b>      | Libramiento Sur |

|                      |       |                |   |
|----------------------|-------|----------------|---|
| <b>Cadenamiento:</b> | 3+600 | <b>Cuerpo:</b> | A |
|----------------------|-------|----------------|---|

|                        |            |              |            |
|------------------------|------------|--------------|------------|
| <b>Fecha de aviso:</b> | 10/17/2020 | <b>Hora:</b> | 2:18:00 AM |
|------------------------|------------|--------------|------------|

|                          |            |              |            |
|--------------------------|------------|--------------|------------|
| <b>Fecha de llegada:</b> | 10/17/2020 | <b>Hora:</b> | 7:48:00 AM |
|--------------------------|------------|--------------|------------|

La Tabla 6-2 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV y el tiempo requerido para el procesamiento fotogramétrico.

Tabla 6-2 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN201017\_01

| <b>Parámetro</b>                                       | <b>Resultado</b>           |
|--|----------------------------|
| <b>Altura (m)</b>                                      | 35                         |
| <b>Ángulo de cámara (°)</b>                            | 65                         |
| <b>Tipo/Modo de vuelo</b>                              | Autónomo: Double Grid (DG) |
| <b>Tiempo de vuelo min:seg</b>                         | 05:00                      |
| <b>Número de imágenes</b>                              | 50                         |
| <b>Duración de vuelo (min:s)</b>                       | 05:00                      |
| <b>Traslape de imágenes (%)</b>                        | 80                         |
| <b>GSD: Ground Sample Distance (cm/px)</b>             | 1.6899999999999999         |
| <b>PPD (Photogrammetric Processing Duration) min:s</b> | 30:00:00                   |
| <b>Área (Lado X Lado; m):</b>                          | 34X86                      |
| <b>Área (m<sup>2</sup>):</b>                           | 2,924                      |

En la Tabla 6-3 se describen las condiciones de clima presentadas durante el siniestro y la velocidad del viento obtenida en campo.

Tabla 6-3 Condiciones de clima presentadas en el evento IN201017\_01

|   |   |
|---|---|
| <b>Condición de clima presentada:</b>         | Cielo parcialmente nublado (condición desfavorable) |
| <b>Velocidad promedio del viento (m/seg):</b> | 1.8   |
| <b>Velocidad máxima del viento (m/seg):</b>   | 3.2   |
| <b>Velocidad mínima (m/seg):</b>              | 0.7   |

En la Figura 6-2 y la Figura 6-3, se puede observar el resumen del procesamiento fotogramétrico y la ortofoto creada a partir de ello, correspondientemente.

**Summary**

**Project:**  
Inc17oct2020

**Date:**  
Thu Feb 11 12:22:51 2021

**Number of Cameras:**  
1

**Camera Model(s):**  
[0] DJI FC6310

**Average Ground Sampling Distance (GSD):**  
1.000066 cm / 0.010001 m

**Area Covered:**  
3279.492432 m sq / 0.003279 km sq

**Processing Time:**  
21 minutes 57 seconds

**Target Coordinate System:**  
UTM84-14N

**Calibration:**  
50 out of 50

**Images with GPS:**  
50 out of 50

Figura 6-2 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo versión 2021 para el evento con clave IN201017\_01

**Orthophoto**



**Orthophoto Dimensions:**  
7686 x 9726 (in 1 chunks)

**Orthophoto Elevation Dimensions:**  
768 x 971

**3D Texturing Parameters - Texture Size:**  
8192 x 8192 (1)

Figura 6-3 Ortofoto obtenida del evento con clave IN201017\_01

En la Figura 6-4 se muestran las coordenadas de los puntos de control terrestres marcados en la escena del accidente e ingresados en el software AutoDesk ReCap Photo 2021 para realizar el procesamiento fotogramétrico. El error de posicionamiento en el plano “XY” es de 2 centímetros en relación a la ubicación real de los puntos con nombres “38” y “40”, mientras que para el punto nombrado como “39” el error se elevó a 2.067 m en el plano “XY” y a 30.95 m en “Z”. Es importante mencionar que el ajuste obtenido durante el procesamiento fotogramétrico, se realiza en relación a la ubicación original en la que se marcó el punto en campo con el GPS de mano. Incluyendo el error de posicionamiento (3 m) con que cuenta el GPS de mano, por lo que para obtener mayor precisión de posicionamiento en el desarrollo de la etapa cuatro de esta investigación se utilizó una antena receptora GPS o receptor GNSS.

| <b>Ground Control Points</b>     |       |                   |                 |                   |                          |                         |
|----------------------------------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| <b>Coordinate System:</b>        |       |                   |                 |                   |                          |                         |
| LL84                             |       |                   |                 |                   |                          |                         |
| <b>User Input Control Points</b> |       |                   |                 |                   |                          |                         |
| Name                             | Valid | X                 | Y               | Z                 | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
| 40                               | Yes   | -100.775760000000 | 20.486260000000 | 1754.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 38                               | Yes   | -100.775610000000 | 20.486390000000 | 1738.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 39                               | No    | -100.775680000000 | 20.486420000000 | 1754.000000000000 | 2.067                    | 30.950                  |
| <b>User Input Check Points</b>   |       |                   |                 |                   |                          |                         |
| Name                             | Valid | X                 | Y               | Z                 | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
| Check Point                      | N/A   | N/A               | N/A             | N/A               | N/A                      | N/A                     |

\*XY Error(m) and Z Error(m) are the differences between user's inputs and system calculated coordinate points and is related to the GSD.

Figura 6-4 Puntos de control terrestres de evento con clave 210113\_01

En la Figura 6-5 se muestran los puntos marcados (con un círculo y una letra) entre los cuales se ubican las huellas de frenado dejadas por el vehículo involucrado en el siniestro.



Figura 6-5 Fotografías del lugar del accidente con clave IN201017\_01

De conformidad con la Tabla 6-4, se tiene un error del 0.53% en la medición de huellas de frenado sobre el pavimento asfáltico entre los puntos A y B ilustrados en la Figura 6-5 y medidas a partir de las imágenes obtenidas con UAV; en relación a la distancia obtenida con el flexómetro. También se obtuvo un porcentaje de error del 0.2 %, considerando la distancia obtenida con el UAV en relación a la obtenida con el odómetro de rueda. Los porcentajes de error mencionados en este párrafo se obtuvieron para una velocidad de viento promedio de 1.8 m/seg con una máxima de 3.2 m/seg medida en campo con un anemómetro de mano en un día con cielo parcialmente nublado.

Tabla 6-4 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN201017\_01

| No. | Del punto: | Al punto: | Flexómetro/cinta métrica (mm) | Odómetro de rueda (mm) | UAV (mm) |
|-----|------------|-----------|-------------------------------|------------------------|----------|
| 1   | A          | B         | 9550                          | 9620                   | 9600.966 |

La estimación de la velocidad inicial a la que viajaba el vehículo involucrado en el accidente, se determinó como sigue:

$$V_i = \sqrt{254(\mu - p)d + V_f^2} \rightarrow \sqrt{254(0.85 - (-0.0145)) * (9.6) + 0} \rightarrow 45.9 \text{ km/h}$$

**Breve descripción del evento con clave: IN210113\_01**

En la Figura 6-6 se observa que un vehículo clase dos (C2) circulaba sobre la carretera libre Panamericana en dirección Querétaro a Celaya (punto no. 1). El usuario de la unidad ingresa a la gaza Querétaro-Laja del distribuidor Laja a exceso de velocidad (punto no. 2 del croquis), esto último sustentado por las marcas de frenado presentes en el lugar del incidente. Finalmente, el usuario vuelca en la faja lateral del derecho de vía (punto no. 3).

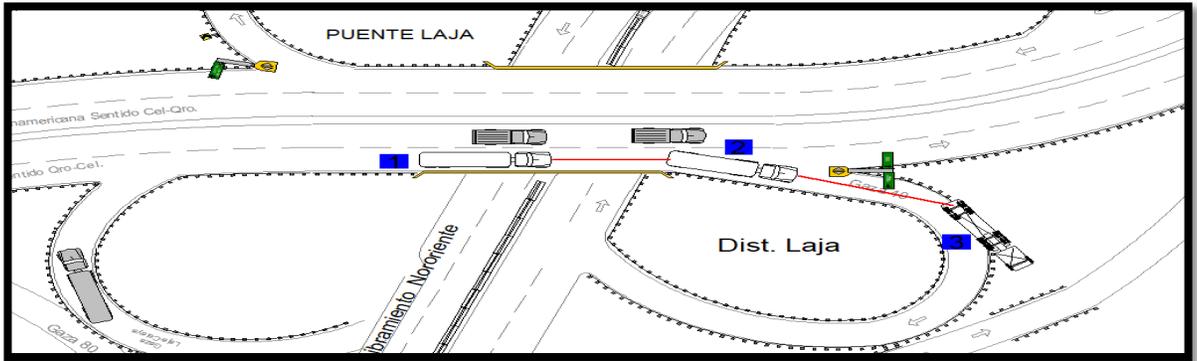


Figura 6-6 Croquis de evento IN210113\_01

En la Tabla 6-5 se muestran los datos preliminares obtenidos del evento de accidentalidad IN210113\_01 y la fuente proveedora de dichos datos, así como fecha y hora del evento ocurrido.

Tabla 6-5 Fuente de información del evento IN210113\_01

|                           |                           |
|---------------------------|---------------------------|
| <b>Clave del evento:</b>  | IN210113_01               |
| <b>Tipo de siniestro:</b> | Incidente                 |
| <b>Avisó:</b>             | CCO                       |
| <b>Jurisdicción:</b>      | Libramiento Sur de Celaya |

|                      |                     |                |   |
|----------------------|---------------------|----------------|---|
| <b>Cadenamiento:</b> | «Cadenamiento_real» | <b>Cuerpo:</b> | A |
|----------------------|---------------------|----------------|---|

|                        |           |              |            |
|------------------------|-----------|--------------|------------|
| <b>Fecha de aviso:</b> | 1/13/2021 | <b>Hora:</b> | 8:03:00 AM |
|------------------------|-----------|--------------|------------|

|                          |           |              |            |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|
| <b>Fecha de llegada:</b> | 1/13/2021 | <b>Hora:</b> | 8:36:00 AM |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|

La Tabla 6-6 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV y el tiempo requerido para el procesamiento fotogramétrico.

Tabla 6-6 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN210113\_01

| <b>Parámetro</b>                                       | <b>Resultado</b>           |
|--|----------------------------|
| <b>Altura (m)</b>                                      | 20                         |
| <b>Ángulo de cámara (°)</b>                            | 75                         |
| <b>Tipo/Modo de vuelo</b>                              | Autónomo: Double Grid (DG) |
| <b>Tiempo de vuelo min:seg</b>                         | 08:40                      |
| <b>Número de imágenes</b>                              | 100                        |
| <b>Duración de vuelo (min:s)</b>                       | 08:40                      |
| <b>Traslape de imágenes (%)</b>                        | 70                         |
| <b>GSD: Ground Sample Distance (cm/px)</b>             | 0.91000000000000003        |
| <b>PPD (Photogrammetric Processing Duration) min:s</b> | 42:53                      |
| <b>Área (Lado X Lado; m):</b>                          | 60X70                      |
| <b>Área (m<sup>2</sup>):</b>                           | 4,200                      |

En la Tabla 6-7 se describen las condiciones de clima presentadas durante el siniestro y la velocidad del viento obtenida en campo.

Tabla 6-7 Condiciones de clima presentadas en el evento IN210113\_01

|   |   |
|---|---|
| <b>Condición de clima presentada:</b>         | Cielo parcialmente nublado (condición desfavorable) |
| <b>Velocidad promedio del viento (m/seg):</b> | 2.2   |
| <b>Velocidad máxima del viento (m/seg):</b>   | 2.6   |
| <b>Velocidad mínima (m/seg):</b>              | 2   |

En la Figura 6-7 y la Figura 6-8, se puede observar el resumen del procesamiento fotogramétrico y la ortofoto creada a partir de ello, correspondientemente.

**Summary**

**Project:**  
IN210113\_01

**Date:**  
Thu Feb 25 08:45:00 2021

**Number of Cameras:**  
1

**Camera Model(s):**  
[0] DJI FC6310

**Average Ground Sampling Distance (GSD):**  
1.000037 cm / 0.010000 m

**Area Covered:**  
7533.010742 m sq / 0.007533 km sq

**Processing Time:**  
42 minutes 53 seconds

**Target Coordinate System:**  
UTM84-14N

**Calibration:**  
99 out of 100

**Images with GPS:**  
100 out of 100

Figura 6-7 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo versión 2021 para el evento con clave IN210113\_01

**Orthophoto**



**Orthophoto Dimensions:**  
12342 x 9460 (in 1 chunks)

**Orthophoto Elevation Dimensions:**  
1234 x 945

**3D Texturing Parameters - Texture Size:**  
8192 x 8192 (1)

Figura 6-8 Ortofoto obtenida del evento con clave IN210113\_01

En la Figura 6-9 se muestran las coordenadas de los puntos de control terrestres marcados en la escena del accidente e ingresados en el software AutoDesk ReCap Photo 2021 para realizar el procesamiento fotogramétrico. El error de posicionamiento en el plano “XY” y “Z” es menor a 2 centímetros en relación a la ubicación marcada con el GPS de mano para los puntos con nombres “29”, “30” y “31”. En relación al punto con el nombre “32” el error en el plano “XY” es de 65 cm y para “Z” es de 2.779 m. Esto se debe a que la precisión del GPS de mano, sobre todo en “Z” es mayor a tres metros.

Es importante mencionar que el ajuste obtenido durante el procesamiento fotogramétrico, se realiza en relación a la ubicación original en la que se marcó el punto en campo con el GPS de mano. Incluyendo el error de posicionamiento (3 m) con que cuenta el GPS de mano, por lo que para obtener mayor precisión de posicionamiento en el desarrollo de la etapa cuatro de esta investigación se utilizó una antena receptora GPS o receptor GNSS.

**Ground Control Points**

Coordinate System:  
LL84

User Input Control Points

| Name | Valid | X                 | Y               | Z                 | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
|------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| 32   | No    | -100.764860000000 | 20.516120000000 | 1766.000000000000 | 0.652                    | 2.779                   |
| 31   | Yes   | -100.764870000000 | 20.516240000000 | 1761.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 29   | Yes   | -100.764690000000 | 20.516050000000 | 1765.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 30   | Yes   | -100.764870000000 | 20.515950000000 | 1766.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |

User Input Check Points

| Name        | Valid | X   | Y   | Z   | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
|-------------|-------|-----|-----|-----|--------------------------|-------------------------|
| Check Point | N/A   | N/A | N/A | N/A | N/A                      | N/A                     |

\*XY Error(m) and Z Error(m) are the differences between user's inputs and system calculated coordinate points and is related to the GSD.

Figura 6-9 Puntos de control terrestres de evento con clave IN210113\_01

En la Figura 6-10 se muestran los puntos marcados (con un círculo y una letra) entre los cuales se ubican las huellas de frenado dejadas por el vehículo involucrado en el siniestro.



Figura 6-10 Fotografías del lugar del accidente con clave IN201017\_01

De conformidad con la Tabla 6-8, se tiene un error del 2.66% en la medición de huellas de frenado sobre el pavimento asfáltico entre los puntos A y B ilustrados en la Figura 6-10 y medidas a partir de las imágenes obtenidas con UAV; en relación a la distancia obtenida con el flexómetro. También se obtuvo un porcentaje de error del 3.28 %, considerando la distancia obtenida con el UAV en relación a la obtenida con el odómetro de rueda. Los porcentajes de error mencionados en este párrafo se obtuvieron para una velocidad de viento promedio de 2.2 m/seg con una máxima de 2.6 m/seg medida en campo con un anemómetro de mano en un día con cielo parcialmente nublado.

Tabla 6-8 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN210113\_01

| No. | Del punto: | Al punto: | Flexómetro/cinta métrica (mm) | Odómetro de rueda (mm) | UAV (mm) |
|-----|------------|-----------|-------------------------------|------------------------|----------|
| 1   | A          | B         | 40500                         | 40750                  | 39423    |

La estimación de la velocidad inicial a la que viajaba el vehículo involucrado en el accidente, se determinó como sigue:

$$V_i = \sqrt{254(\mu - p)d + V_f^2} \rightarrow \sqrt{254(0.80 - (-0.08)) * (39.42) + 0} \rightarrow 93.87 \text{ km/h}$$

## Breve descripción del evento con clave: IN210130\_01

En la Figura 6-11 se muestra a un vehículo clase cinco (cinco ejes) T3-S2 cuando se incorpora a la fila de vehículos para pagar peaje en el carril número 334 de la plaza de cobro Crespo (punto no. 1 de la imagen). Simultáneamente un vehículo ligero clase uno llega y se perfila para ingresar al carril número 331. En ese momento, el camión pesado sale del carril número 334 y se incorpora rápidamente al carril número 331 sin percatarse que la unidad clase uno estaba posicionándose en ese carril (punto no. 2 de la imagen), fue entonces, que el vehículo clase uno frenó intempestivamente pero no logró detenerse. Mientras tanto, el vehículo de cinco ejes impactó en un costado al vehículo ligero (punto no. 3 de la imagen).

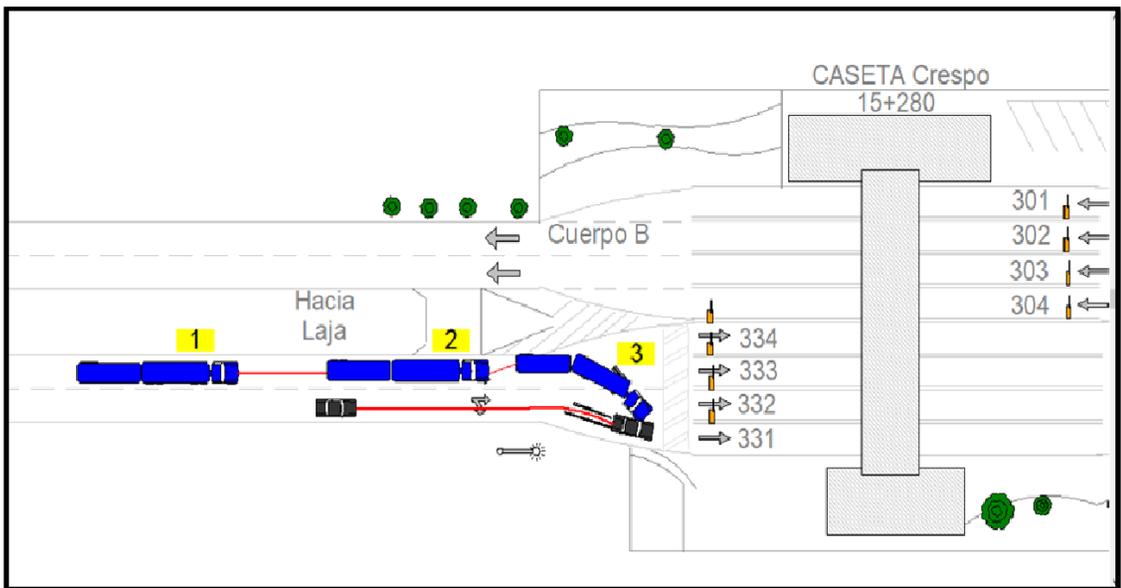


Figura 6-11 Croquis de evento IN210130\_01

En la Tabla 6-5 se muestran los datos preliminares obtenidos del evento de accidentalidad IN210130\_01 y la fuente proveedora de dichos datos, así como fecha y hora del evento ocurrido.

Tabla 6-9 Fuente de información del evento IN210130\_01

|                           |                 |
|---------------------------|-----------------|
| <b>Clave del evento:</b>  | IN210130_01     |
| <b>Tipo de siniestro:</b> | Incidente       |
| <b>Avisó:</b>             | CCO             |
| <b>Jurisdicción:</b>      | Libramiento Sur |

|                      |        |                |   |
|----------------------|--------|----------------|---|
| <b>Cadenamiento:</b> | 15+280 | <b>Cuerpo:</b> | A |
|----------------------|--------|----------------|---|

|                        |           |              |             |
|------------------------|-----------|--------------|-------------|
| <b>Fecha de aviso:</b> | 1/30/2021 | <b>Hora:</b> | 12:35:00 PM |
|------------------------|-----------|--------------|-------------|

|                          |           |              |            |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|
| <b>Fecha de llegada:</b> | 1/30/2021 | <b>Hora:</b> | 1:22:00 PM |
|--------------------------|-----------|--------------|------------|

La Tabla 6-6 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV y el tiempo requerido para el procesamiento fotogramétrico.

Tabla 6-10 Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico del evento IN210130\_01

| <b>Parámetro</b>                                       | <b>Resultado</b>           |
|--|----------------------------|
| <b>Altura (m)</b>                                      | 25                         |
| <b>Ángulo de cámara (°)</b>                            | 70                         |
| <b>Tipo/Modo de vuelo</b>                              | Autónomo: Double Grid (DG) |
| <b>Tiempo de vuelo min:seg</b>                         | 07:30                      |
| <b>Número de imágenes</b>                              | 100                        |
| <b>Duración de vuelo (min:s)</b>                       | 07:30                      |
| <b>Traslape de imágenes (%)</b>                        | 80                         |
| <b>GSD: Ground Sample Distance (cm/px)</b>             | 1.1599999999999999         |
| <b>PPD (Photogrammetric Processing Duration) min:s</b> | 46:27                      |
| <b>Área (Lado X Lado; m):</b>                          | 49X70                      |
| <b>Área (m<sup>2</sup>):</b>                           | 3,430                      |

En la Tabla 6-7 se describen las condiciones de clima presentadas durante el siniestro y la velocidad del viento obtenida en campo.

Tabla 6-11 Condiciones de clima presentadas en el evento IN210130\_01

|   |     |
|---|-----|
| <b>Condición de clima presentada:</b>         |     |
| <b>Velocidad promedio del viento (m/seg):</b> | 1.6 |
| <b>Velocidad máxima del viento (m/seg):</b>   | 2.3 |
| <b>Velocidad mínima (m/seg):</b>              | 1.4 |

En la Figura 6-7 y la Figura 6-8, se puede observar el resumen del procesamiento fotogramétrico y la ortofoto creada a partir de ello, correspondientemente.



Figura 6-12 Resumen de procesamiento fotogramétrico realizado con Recap Photo versión 2021 para el evento con clave IN210130\_01

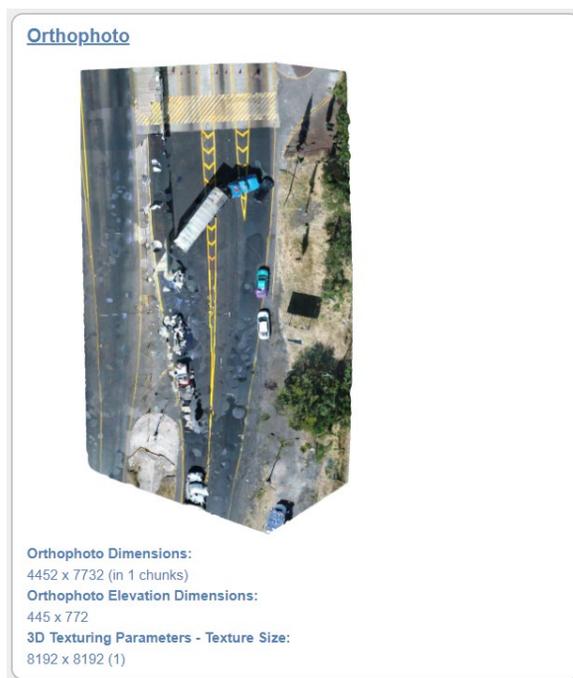


Figura 6-13 Ortofoto obtenida del evento con clave IN210130\_01

En la Figura 6-9 se muestran las coordenadas de los puntos de control terrestres marcados en la escena del accidente e ingresados en el software AutoDesk ReCap Photo 2021 para realizar el procesamiento fotogramétrico. El error de posicionamiento en el plano “XY” y “Z” es menor a 2 centímetros en relación a la ubicación real de los puntos con nombres “33”, “34” y “36”.

Es importante mencionar que el ajuste obtenido durante el procesamiento fotogramétrico, se realiza en relación a la ubicación original en la que se marcó el punto en campo con el GPS de mano. Incluyendo el error de posicionamiento (3 m) con que cuenta el GPS de mano, por lo que para obtener mayor precisión de posicionamiento en el desarrollo de la etapa cuatro de esta investigación se utilizó una antena receptora GPS o receptor GNSS.

**Ground Control Points**

Coordinate System:  
LL84

User Input Control Points

| Name | Valid | X                 | Y               | Z                 | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
|------|-------|-------------------|-----------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|
| 36   | Yes   | -100.870640000000 | 20.506270000000 | 1744.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 33   | Yes   | -100.870660000000 | 20.505810000000 | 1746.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |
| 34   | Yes   | -100.870830000000 | 20.505880000000 | 1746.000000000000 | < 0.020                  | < 0.020                 |

User Input Check Points

| Name        | Valid | X   | Y   | Z   | Calculated XY Error (m)* | Calculated Z Error (m)* |
|-------------|-------|-----|-----|-----|--------------------------|-------------------------|
| Check Point | N/A   | N/A | N/A | N/A | N/A                      | N/A                     |

\*XY Error(m) and Z Error(m) are the differences between user's inputs and system calculated coordinate points and is related to the GSD.

Figura 6-14 Puntos de control terrestres de evento con clave IN210130\_01

En la Figura 6-10 se muestran los puntos marcados (con un círculo y una letra) entre los cuales se ubican las huellas de frenado dejadas por el vehículo involucrado en el siniestro.

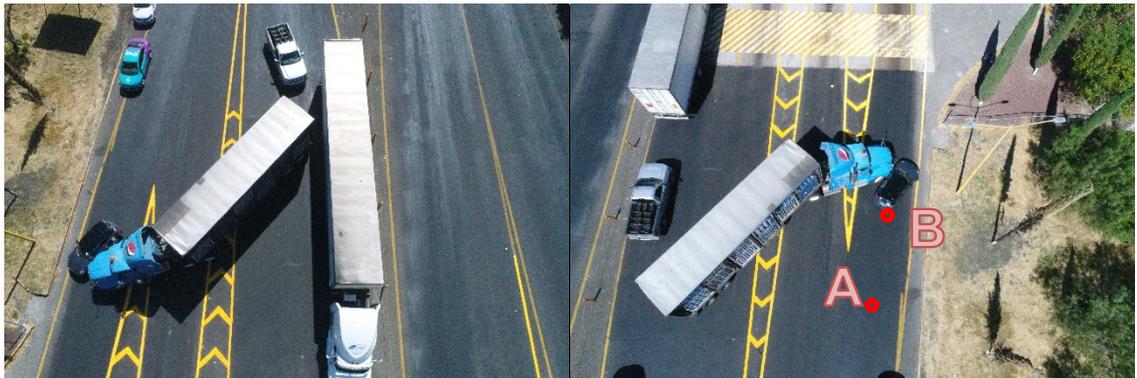


Figura 6-15 Fotografías del lugar del accidente con clave IN210130\_01

De conformidad con la Tabla 6-8, se tiene un error del 1.26% en la medición de huellas de frenado sobre el pavimento asfáltico entre los puntos A y B ilustrados en la Figura 6-10 y medidas a partir de las imágenes obtenidas con UAV; en relación a la distancia obtenida con el flexómetro. También se obtuvo un porcentaje de error del 2.20 %, considerando la distancia obtenida con el UAV en relación a la obtenida con el odómetro de rueda. Los porcentajes de error mencionados en este párrafo se obtuvieron para una velocidad de viento promedio de 1.6 m/seg con una máxima de 2.3 m/seg medida en campo con un anemómetro de mano en un día con cielo parcialmente nublado.

Tabla 6-12 Huellas de frenado obtenidas en el evento con clave IN210130\_01

| No. | Del punto: | Al punto: | Flexómetro/cinta métrica (mm) | Odómetro de rueda (mm) | UAV (mm) |
|-----|------------|-----------|-------------------------------|------------------------|----------|
| 1   | A          | B         | 5300                          | 5350                   | 5233.198 |

La estimación de la velocidad inicial a la que viajaba el vehículo involucrado en el accidente, se determinó como sigue:

$$V_i = \sqrt{254(\mu - p)d + V_f^2} \rightarrow \sqrt{254(0.85 - (+0.0185)) * (5.23) + 0} \rightarrow 33.24 \text{ km/h}$$

6.2 Resultados obtenidos durante el desarrollo de la etapa cuatro de la metodología propuesta.

Resultados para los accidentes recreados a través de la operación de equipo UAV en condiciones climáticas no extremas, pero desfavorables

Duración del registro de datos para el escenario de un accidente

Método tradicional

La Tabla 6-13 muestra el tiempo requerido para obtener distancias con el método que utilizan las fuerzas policiales empleando una cinta métrica y el odómetro de rueda en campo. También se incluye el tiempo designado para completar el registro y realización del boceto a mano.

Tabla 6-13 Tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional

| Parámetro  | Resultados    |       |       |       |        |       |           |
|--|---------------|-------|-------|-------|--------|-------|-----------|
|  | Accidente No. |       |       |       |        |       |           |
|  | 1             | 2     | 3     | 4     | 5      | 6     | Promedio  |
| Hora de inicio de las mediciones:                  | 12:00         | 13:35 | 08:59 | 14:30 | 09:30  | 07:05 | No aplica |
| Hora final de las mediciones:                      | 13:30         | 14:10 | 10:20 | 15:20 | 11:15  | 07:45 | No aplica |
| Tiempo total obtenido en campo (minutos:segundos): | 90:00         | 35:00 | 81:00 | 50:00 | 105:00 | 40:00 | 66:50     |

Fuente: Elaboración propia

#### Método a partir de fotogrametría aérea

En la Tabla 6-14 se muestra el tiempo requerido para obtener distancias con el método de procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV.

Tabla 6-14 Tiempo necesario para realizar el levantamiento a partir de  
fotogrametría aérea obtenida con UAV

| Parámetro   | Resultados    |        |        |        |        |        |           |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
|   | Accidente No. |        |        |        |        |        |           |
|   | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | Promedio  |
| Duración de vuelo con UAV (min:seg)   | 05:00         | 07:30  | 08:15  | 05:30  | 07:15  | 08:30  | 07:00     |
| Duración del procesamiento fotogramétrico (min:seg)   | 30:00         | 46:27  | 44:36  | 47:05  | 40:57  | 33:21  | 40:24     |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico (min:seg)                           | 35:00         | 53:57  | 52:51  | 52:35  | 48:12  | 41:51  | 47:24     |
| Tiempo necesario para realizar levantamiento geodésico en sitio por el método estático (min:seg)      | 291:15        | 285:45 | 246:45 | 262:45 | 322:30 | 248:15 | 276:12    |
| No. de GCPs considerados en cada área de accidente.   | 4             | 4      | 4      | 4      | 5      | 4      | No aplica |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico y levantamiento geodésico (min:seg) | 326:15        | 339:42 | 299:36 | 315:20 | 370:42 | 290:06 | 323:37    |

Fuente: Elaboración propia

### Características de los vuelos programados realizados con UAV

#### Condiciones climáticas registradas durante el vuelo de dron

La Tabla 6-15 describe las condiciones climáticas presentadas bajo las que se realizó el vuelo con equipo UAV en cada accidente y la velocidad del viento medida en campo con un anemómetro convencional.

Tabla 6-15 Condiciones climáticas presentadas durante el vuelo del equipo UAV

| Parámetro                              | Resultados  |     |     |     |     |     |          |
|--|---|-----|-----|-----|-----|-----|----------|
|  | Accidente No.                                       |     |     |     |     |     |          |
|  | 1   | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | Promedio |
| Condición de luz presentada:           | Cielo parcialmente nublado (condición desfavorable) |     |     |     |     |     |          |
| Velocidad promedio del viento (m/seg): | 1.8   | 1.6 | 2.1 | 1.7 | 2.1 | 2.4 | 2.0      |
| Velocidad máxima del viento (m/seg):   | 3.2   | 2.3 | 2.5 | 2.6 | 3.1 | 3.7 | 2.9      |
| Velocidad mínima (m/seg):              | 0.7   | 1.4 | 1.8 | 1.3 | 1   | 1.2 | 1.2      |

Fuente: Elaboración propia

#### Parámetros de vuelo asignados y tiempo de procesamiento fotogramétrico

La Tabla 6-16 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV previo a iniciar su operación y el número de imágenes captadas una vez terminado el vuelo.

Tabla 6-16 Parámetros de vuelo asignados al equipo UAV

| Parámetro                  | Resultados                 |       |       |       |       |       |           |
|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|                            | Accidente No.              |       |       |       |       |       |           |
|                            | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | Promedio  |
| Altura (m)                 | 30                         | 25    | 30    | 20    | 20    | 25    | No aplica |
| Ángulo de cámara (°)       | 65                         | 70    | 70    | 70    | 65    | 70    | No aplica |
| Tipo/Modo de vuelo         | Autónomo: Double Grid (DG) |       |       |       |       |       | No aplica |
| Número de imágenes         | 50                         | 100   | 100   | 84    | 100   | 100   | No aplica |
| Duración de vuelo (min:s)  | 05:00                      | 07:30 | 08:15 | 05:30 | 07:15 | 08:30 | No aplica |
| Traslape de imágenes (%)   | 80                         | 80    | 90    | 80    | 80    | 70    | No aplica |
| Tamaño de pixel (cm/pixel) | 1.45                       | 1.16  | 1.45  | 0.93  | 0.91  | 1.21  | No aplica |
| Área (m <sup>2</sup> ):    | 2,924                      | 3,430 | 3,267 | 2,000 | 5,928 | 9,230 | No aplica |

Fuente: Elaboración propia

## Resultados del levantamiento geodésico

En la Tabla 6-17 se ilustra el tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres por el método estático. Asimismo, se menciona la cantidad de puntos de control terrestres marcados en cada una de las áreas donde ocurrió un accidente.

Tabla 6-17 Tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico por el método estático

| Parámetro   | Resultados    |        |        |        |        |        | Promedio  |
|---|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
|   | Accidente No. |        |        |        |        |        |           |
|   | 1             | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |           |
| Tiempo necesario para realizar levantamiento geodésico en sitio por el método estático (min:seg)      | 291:15        | 285:45 | 246:45 | 262:45 | 322:30 | 248:15 | 276:12    |
| No. de GCPs considerados en cada área de accidente.   | 4             | 4      | 4      | 4      | 5      | 4      | No aplica |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico y levantamiento geodésico (min:seg) | 326:15        | 339:42 | 299:36 | 315:20 | 370:42 | 290:06 | 323:37    |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 6-17 indican que el tiempo mínimo para realizar el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres fue de 248 minutos y el tiempo promedio fue de 276 minutos.

Vinculación de puntos de control terrestres y su traslado a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA)

La vinculación de todos los puntos de control registrados en el levantamiento geodésico se realizó a través del software Topcon Tools para computadora en su versión 8.2.3. ingresando los archivos de observación con extensión .tps resultantes del levantamiento geodésico estático realizado con el receptor GNSS SOKKIA GRX2. También fue necesario descargar los archivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*, por sus siglas en inglés) de la página oficial de INEGI correspondientes a las estaciones denominadas “UGTO” y “UQRO” y pertenecientes a la RGNA. Las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de cada estación se ilustran en la Tabla 6-18.

Tabla 6-18 Coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de las estaciones UGTO y UQRO pertenecientes a la RGNA

| Nombre de la Estación | Latitud Norte  | Longitud Oeste  | Altura Geodésica (m) | Altura vertical de la Antena (m) | Antena según National Geodetic Survey |
|-----------------------|----------------|-----------------|----------------------|----------------------------------|---------------------------------------|
| UGTO                  | 21 00 09.75456 | 101 16 17.99246 | 2062.282             | 0.071                            | TRM115000.00                          |
| UQRO                  | 20 35 28.09773 | 100 24 45.69377 | 1817.973             | 0.084                            | Zephyr Geodetic 3                     |

Fuente: (INEGI, 2021)

La precisión en la corrección de las coordenadas de los puntos de control terrestres en relación a las estaciones de la RGNA se distingue por aquellas registradas en el plano horizontal (xy) y vertical (z), las cuales, se obtuvieron para cada GCPs durante el postproceso de las observaciones registradas en campo con el receptor GNSS SOKKIA GRX2. Las precisiones obtenidas se ilustran en la Tabla 6-19.

Tabla 6-19 Precisión de ajuste de los GCPs a la RGNA

| No. accidente | 1                       |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       | 5     |       | 6     |       |
|---------------|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|               | Precisión (centímetros) |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
| Punto         | Horiz                   | Verti | Horiz | Verti | Horiz | Verti | Horiz | Verti | Horiz | Verti | Horiz | Verti |
|               | ntal                    | cal   | ntal  | cal   | ntal  | cal   | ntal  | cal   | ntal  | cal   | ntal  | cal   |
| GCP1          | 1.20                    | 2.40  | 1.40  | 3.00  | 3.40  | 3.20  | 0.90  | 2.30  | 3.30  | 1.90  | 1.60  | 3.50  |
| GCP2          | 1.10                    | 2.50  | 2.60  | 3.40  | 3.90  | 3.10  | 0.80  | 2.30  | 1.80  | 3.00  | 1.50  | 3.60  |
| GCP3          | 1.60                    | 2.30  | 1.90  | 2.70  | 3.90  | 1.90  | 1.00  | 2.30  | 1.10  | 3.00  | 1.30  | 2.60  |
| GCP4          | 1.80                    | 2.40  | 1.60  | 3.30  | 1.50  | 2.40  | 1.30  | 2.30  | 1.10  | 3.00  | 1.20  | 2.60  |
| GCP5          |                         |       |       |       |       |       |       |       | 1.50  | 2.90  |       |       |
| Media         | 1.43                    | 2.40  | 1.88  | 3.10  | 3.18  | 2.65  | 1.00  | 2.30  | 1.76  | 2.76  | 1.40  | 3.08  |

Fuente: Elaboración propia

De conformidad con los datos mostrados en la Tabla 6-19 se documentó una precisión mínima de 0.80 cm y una máxima de 3.90 cm para los GCPs en relación a la RGNA. Es decir, la precisión del ajuste de los puntos de control terrestre varía en el rango de 0.80 cm como mínimo y 3.90 cm como máximo. Si se desea ser más específico; la precisión horizontal del ajuste a la RGNA se encuentra en el rango de 0.80 cm como mínimo y 3.90 cm como máximo. En cambio, la precisión vertical varía en un rango de 1.90 cm como mínimo y 3.60 cm como máximo. Los resultados sugieren que existe un porcentaje mínimo de variación en la georreferenciación de las coordenadas geográficas de los puntos de control terrestres en relación a la RGNA.

## Duración del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas

El procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas captadas con equipo UAV se realizó con el software Autodesk ReCap Photo versión 2021. El tiempo necesario para el procesamiento se ilustra en la Tabla 6-20.

Tabla 6-20 Tiempo de procesamiento fotogramétrico

| Parámetro  | Resultados<br>Accidente No. |       |       |       |       |       | Promedio  |
|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
|  | 1                           | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     |           |
| Número de imágenes                                 | 50                          | 100   | 100   | 84    | 100   | 100   | No aplica |
| Duración del procesamiento<br>fotogramétrico min:s | 30:00                       | 46:27 | 44:36 | 47:05 | 40:57 | 33:21 | 40:24     |

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la estimación del error relativo en la medición de huellas de frenado

En la Tabla 6-21 se establece la comparativa de las distancias obtenidas con flexómetro, odómetro de rueda y UAV. También se indica el error relativo calculado con la Ec. (14).

Tabla 6-21 Error relativo en huellas de frenado

|            | Accidente No.                                  | 1   | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | Promedio  |
|------------|--|---|-------|-------|-------|-------|-------|-----------|
| Clima      | Velocidad máxima del viento (m/seg):           | 3.2   | 2.3   | 2.5   | 2.58  | 3.09  | 3.70  | 2.90      |
|            | Condición de luz presentada                    | Cielo parcialmente nublado (condición desfavorable) |       |       |       |       |       |           |
| Distancias | Flexómetro (mm)                                | 9550  | 5300  | 26200 | 14650 | 50000 | 33600 | No aplica |
|            | Odómetro de rueda (mm)                         | 9620  | 5350  | 26250 | 14700 | 51000 | 35400 | No aplica |
|            | UAV (mm)                                       | 9500  | 5250  | 26150 | 14500 | 50500 | 34350 | No aplica |
|            | % de error obtenido entre el flexómetro y UAV  | 0.53%   | 0.95% | 0.19% | 1.03% | 0.99% | 2.18% | 0.98%     |
|            | % de error obtenido entre el odómetro y el UAV | 1.26%   | 1.90% | 0.38% | 1.38% | 0.99% | 3.06% | 1.50%     |

Fuente: Elaboración propia

Velocidad inicial de investigación estimada para los vehículos involucrados en los accidentes recreados

Una vez obtenidas las distancias de las huellas de frenado y el error relativo a partir de las ortofotos creadas en el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, se calcularon las velocidades iniciales a la que circulaban los vehículos involucrados en los accidentes utilizando la Ec. (16). Los resultados se ilustran en la Tabla 6-22.

Tabla 6-22 Velocidad inicial de investigación con efecto de la pendiente

| Accidente No.   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5      | 6        |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Configuración de la unidad vehicular  | T3-S2 | T3-S2 | A     | A     | T3-S2  | T3-S2-R4 |
| Coefficiente de fricción longitudinal para pavimento asfáltico seco   | 0.85  | 0.85  | 0.85  | 0.85  | 0.85   | 0.85     |
| Distancia de huella de frenado obtenida de la ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes captadas con UAV (m) | 9.50  | 5.25  | 26.15 | 14.5  | 5.05   | 11.45    |
| Pendiente longitudinal de la carretera, (%)   | -1.45 | 1.85  | -2.1  | 1.17  | 0.85   | 5.93     |
| Velocidad inicial de investigación obtenida (km/h)  | 45.67 | 33.30 | 76.06 | 55.56 | 103.89 | 83.06    |

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se utilizó la ecuación (15) que no considera el efecto de la pendiente para establecer la velocidad inicial de investigación y los resultados se muestran en la Tabla 6-23.

Tabla 6-23 Velocidad inicial de investigación sin efecto de la pendiente

| Accidente No.   | 1     | 2     | 3     | 4     | 5      | 6        |
|---|-------|-------|-------|-------|--------|----------|
| Configuración de la unidad vehicular  | T3-S2 | T3-S2 | A     | A     | T3-S2  | T3-S2-R4 |
| Coefficiente de fricción longitudinal para pavimento asfáltico seco   | 0.85  | 0.85  | 0.85  | 0.85  | 0.85   | 0.85     |
| Distancia de huella de frenado obtenida de la ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes captadas con UAV (m) | 9.50  | 5.25  | 26.15 | 14.5  | 5.05   | 11.45    |
| Velocidad inicial de investigación obtenida (km/h)  | 45.31 | 33.69 | 75.18 | 55.98 | 104.47 | 86.16    |

Fuente: Elaboración propia

Analizando la Tabla 6-22 y la Tabla 6-23 se establece que en la estimación de la velocidad inicial de investigación existe una diferencia no apreciable cuando se considera la pendiente. Por ejemplo, para la pendiente máxima documentada en el accidente seis (5.93%) la diferencia en velocidad fue de apenas 3 km/h. Entonces, los resultados indican que la pendiente no es una variable significativa para la predicción de la velocidad inicial, si se compara con la longitud de las huellas de frenado.

Resultados para los accidentes recreados a través de la operación de equipo UAV en condiciones climáticas ideales

Duración del registro de datos para el escenario de un accidente

Método tradicional

La Tabla 6-24 muestra el tiempo requerido para obtener distancias con el método que utilizan las fuerzas policiales empleando una cinta métrica y el odómetro de rueda en campo. También se incluye el tiempo designado para completar el registro y realización del boceto a mano.

Tabla 6-24 Tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional bajo condiciones ideales

| Parámetro  | Resultados    |       |       |        |           |
|--|---------------|-------|-------|--------|-----------|
|  | Accidente No. |       |       |        |           |
|  | 1             | 2     | 3     | 4      | Promedio  |
| Hora de inicio de las mediciones:                  | 09:25         | 14:03 | 12:30 | 12:44  | No aplica |
| Hora final de las mediciones:                      | 11:45         | 14:55 | 13:15 | 14:52  | No aplica |
| Tiempo total obtenido en campo (minutos:segundos): | 140:00        | 52:00 | 45:00 | 128:00 | 91:15     |

Fuente: Elaboración propia

#### Método a partir de fotogrametría aérea

En la Tabla 6-25 se muestra el tiempo requerido para obtener distancias con el método de procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV.

Tabla 6-25 Tiempo necesario para realizar el levantamiento a partir de fotogrametría aérea obtenida con UAV en condiciones ideales

| Parámetro   |        |        |        |        |           |
|---|--------|--------|--------|--------|-----------|
|   | 1      | 2      | 3      | 4      | Promedio  |
| Duración de vuelo con UAV (min:seg)   | 04:00  | 08:08  | 07:52  | 05:30  | 06:23     |
| Duración del procesamiento fotogramétrico (min:seg)   | 21:12  | 57:41  | 42:53  | 33:55  | 38:55     |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico (min:seg)                           | 25:12  | 65:49  | 50:45  | 39:25  | 45:18     |
| Tiempo necesario para realizar levantamiento geodésico en sitio por el método estático (min:seg)      | 244:45 | 241:15 | 286:45 | 262:30 | 258:49    |
| No. de GCPs considerados en cada área de accidente.   | 4      | 4      | 4      | 4      | No aplica |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico y levantamiento geodésico (min:seg) | 269:57 | 307:04 | 337:30 | 301:55 | 304:06    |

Fuente: Elaboración propia

### Características de los vuelos programados realizados con UAV

#### Condiciones climáticas registradas durante el vuelo de dron

La Tabla 6-26 describe las condiciones climáticas presentadas bajo las que se realizó el vuelo con equipo UAV en cada accidente y la velocidad del viento medida en campo con un anemómetro convencional.

Tabla 6-26 Condiciones climáticas presentadas durante el vuelo del equipo UAV en condiciones ideales

| Parámetro                              | Resultados  |      |      |      |          |
|--|---|------|------|------|----------|
|  | Accidente No.   |      |      |      |          |
|  | 1   | 2    | 3    | 4    | Promedio |
| Condición de luz presentada:           | Cielo completamente despejado y soleado (condición ideal) |      |      |      |          |
| Velocidad promedio del viento (m/seg): | 0.80  | 0.89 | 0.56 | 0.70 | 0.74     |
| Velocidad máxima del viento (m/seg):   | 0.95  | 0.98 | 0.71 | 0.90 | 0.89     |
| Velocidad mínima (m/seg):              | 0.45  | 0.86 | 0.63 | 0.60 | 0.64     |

Fuente: Elaboración propia

Parámetros de vuelo asignados y tiempo de procesamiento fotogramétrico

La Tabla 6-27 indica los parámetros de vuelo asignados al equipo UAV previo a iniciar su operación y el número de imágenes captadas una vez terminado el vuelo en condiciones ideales.

Tabla 6-27 Parámetros de vuelo asignados al equipo UAV

| Parámetro                  | Resultados                 |       |       |       |           |
|----------------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-----------|
|                            | Accidente No.              |       |       |       |           |
|                            | 1                          | 2     | 3     | 4     | Promedio  |
| Altura (m)                 | 35                         | 25    | 20    | 20    | No aplica |
| Ángulo de cámara (°)       | 65                         | 70    | 75    | 65    | No aplica |
| Tipo/Modo de vuelo         | Autónomo: Double Grid (DG) |       |       |       | No aplica |
| Número de imágenes         | 46                         | 100   | 100   | 84    | No aplica |
| Duración de vuelo (min:s)  | 04:00                      | 08:08 | 07:52 | 05:30 | 06:23     |
| Traslape de imágenes (%)   | 80                         | 80    | 70    | 80    | No aplica |
| Tamaño de pixel (cm/pixel) | 1.69                       | 1.16  | 0.93  | 0.93  | No aplica |
| Área (m <sup>2</sup> ):    | 1,972                      | 5,069 | 4,960 | 2,730 | No aplica |

Fuente: Elaboración propia

## Resultados del levantamiento geodésico

En la Tabla 6-28 se ilustra el tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres por el método estático. Asimismo, se menciona la cantidad de puntos de control terrestres marcados en cada una de las áreas donde ocurrió un accidente.

Tabla 6-28 Tiempo necesario para realizar el levantamiento geodésico por el método estático en condiciones ideales

| Parámetro   | Resultados    |        |        |        | Promedio  |
|---|---------------|--------|--------|--------|-----------|
|   | Accidente No. |        |        |        |           |
|   | 1             | 2      | 3      | 4      |           |
| Tiempo necesario para realizar levantamiento geodésico en sitio por el método estático (min:seg)      | 244:45        | 241:15 | 286:45 | 262:30 | 258:49    |
| No. de GCPs considerados en cada área de accidente.   | 4             | 4      | 4      | 4      | No aplica |
| Tiempo total: Duración del vuelo más procesamiento fotogramétrico y levantamiento geodésico (min:seg) | 269:57        | 307:04 | 337:30 | 301:55 | 304:06    |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 6-28 indican que el tiempo mínimo para realizar el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres fue de 241 minutos y el tiempo promedio fue de 258 minutos.

Vinculación de puntos de control terrestres y su traslado a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA)

La vinculación de todos los puntos de control registrados en el levantamiento geodésico se realizó a través del software Topcon Tools para computadora en su versión 8.2.3. ingresando los archivos de observación con extensión .tps resultantes del levantamiento geodésico estático realizado con el receptor GNSS SOKKIA GRX2. También fue necesario descargar los archivos RINEX (*Receiver Independent Exchange Format*, por sus siglas en inglés) de la página oficial de INEGI correspondientes a las estaciones denominadas “UGTO” y “UQRO” y pertenecientes a la RGNA. Las coordenadas ITRF2008 época 2010.0 de cada estación se ilustran en la Tabla 6-18.

Las precisiones obtenidas se ilustran en la Tabla 6-29.

Tabla 6-29 Precisión de ajuste de los GCPs a la RGNA en condiciones ideales

| No. accidente | 1                       |          | 2          |          | 3          |          | 4          |          |
|---------------|-------------------------|----------|------------|----------|------------|----------|------------|----------|
|               | Precisión (centímetros) |          |            |          |            |          |            |          |
| Punto         | Horizontal              | Vertical | Horizontal | Vertical | Horizontal | Vertical | Horizontal | Vertical |
| GCP1          | 0.90                    | 2.20     | 2.40       | 3.40     | 2.80       | 1.90     | 2.80       | 2.00     |
| GCP2          | 0.90                    | 2.30     | 3.40       | 4.00     | 1.20       | 2.30     | 1.00       | 2.40     |
| GCP3          | 2.70                    | 1.60     | 0.80       | 2.80     | 1.10       | 2.30     | 1.00       | 2.40     |
| GCP4          | 2.70                    | 1.80     | 2.50       | 2.40     | 2.50       | 2.30     | 2.80       | 1.70     |
| Media         | 1.80                    | 1.98     | 2.28       | 3.15     | 1.90       | 2.20     | 1.90       | 2.13     |

Fuente: Elaboración propia

De conformidad con los datos mostrados en la Tabla 6-29 se documentó una precisión mínima de 0.80 cm y una máxima de 4.00 cm para los GCPs en relación a la RGNA. Es decir, la precisión del ajuste de los puntos de control terrestre varía en el rango de 0.80 cm como mínimo y 4.00 cm como máximo. Si se desea ser más específico; la precisión horizontal del ajuste a la RGNA se encuentra en el

rango de 0.80 cm como mínimo y 3.40 cm como máximo. En cambio, la precisión vertical varía en un rango de 1.60 cm como mínimo y 4.00 cm como máximo. Los resultados sugieren que existe un porcentaje mínimo de variación en la georreferenciación de las coordenadas geográficas de los puntos de control terrestres en relación a la RGNA.

#### Duración del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas

El procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas captadas con equipo UAV se realizó con el software Autodesk ReCap Photo versión 2021. El tiempo necesario para el procesamiento se ilustra en la Tabla 6-30.

Tabla 6-30 Tiempo de procesamiento fotogramétrico para condiciones ideales

| Parámetro  | Resultados<br>Accidente No. |       |       |       | Promedio  |
|--|-----------------------------|-------|-------|-------|-----------|
|  | 1                           | 2     | 3     | 4     |           |
| Número de imágenes                                 | 46                          | 100   | 100   | 84    | No aplica |
| Duración del procesamiento fotogramétrico<br>min:s | 21:12                       | 57:41 | 42:53 | 33:55 | 38:55     |

Fuente: Elaboración propia

#### Resultados de la estimación del error relativo en la medición de huellas de frenado

En la Tabla 6-31 se establece la comparativa de las distancias obtenidas con flexómetro, odómetro de rueda y UAV. También se indica el error relativo calculado con la Ec. (14).

Tabla 6-31 Error relativo en huellas de frenado para condiciones ideales

| Accidente No. | 1  | 2  | 3     | 4     | Promedio |           |
|---------------|--|--|-------|-------|----------|-----------|
| Clima         | Velocidad máxima del viento (m/seg):           | 0.95   | 0.98  | 0.71  | 0.90     | 0.89      |
|               | Condición de luz presentada                    | Cielo completamente despejado y soleado ( condición ideal) |       |       |          | No aplica |
| Distancias    | Flexómetro (mm)                                | 31230  | 23080 | 38615 | 15258    | No aplica |
|               | Odómetro de rueda (mm)                         | 31300  | 23100 | 38750 | 15300    | No aplica |
|               | UAV (mm)                                       | 31322  | 23254 | 38785 | 15388    | No aplica |
|               | % de error obtenido entre el flexómetro y UAV  | 0.29%  | 0.75% | 0.44% | 0.84%    | 0.58%     |
|               | % de error obtenido entre el odómetro y el UAV | 0.07%  | 0.66% | 0.09% | 0.57%    | 0.35%     |

Fuente: Elaboración propia

Velocidad inicial de investigación estimada para los vehículos involucrados en los accidentes recreados

Una vez obtenidas las distancias de las huellas de frenado y el error relativo a partir de las ortofotos creadas en el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, se calcularon las velocidades iniciales a la que circulaban los vehículos involucrados en los accidentes utilizando la Ec. (16). Los resultados se ilustran en la Tabla 6-32.

Tabla 6-32 Velocidad inicial de investigación con efecto de la pendiente para condiciones ideales

| Accidente No.   | 1     | 2        | 3     | 4     |
|---|-------|----------|-------|-------|
| Configuración de la unidad vehicular  | T3-S2 | T3-S2-R4 | C2    | C3    |
| Coefficiente de fricción longitudinal para pavimento asfáltico seco   | 0.85  | 0.85     | 0.80  | 0.80  |
| Distancia de huella de frenado obtenida de la ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes captadas con UAV (m) | 31.32 | 23.25    | 38.79 | 15.39 |
| Pendiente longitudinal de la carretera, (%)   | 4     | 3.1      | -8    | -0.46 |
| Velocidad inicial de investigación obtenida (km/h)  | 80.28 | 69.55    | 93.11 | 56.08 |

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, se utilizó la ecuación (15) que no considera el efecto de la pendiente para establecer la velocidad inicial de investigación y los resultados se muestran en la Tabla 6-33.

Tabla 6-33 Velocidad inicial de investigación sin efecto de la pendiente para condiciones ideales

| Accidente No.   | 1     | 2        | 3     | 4     |
|---|-------|----------|-------|-------|
| Configuración de la unidad vehicular  | T3-S2 | T3-S2-R4 | C2    | C3    |
| Coefficiente de fricción longitudinal para pavimento asfáltico seco   | 0.85  | 0.85     | 0.80  | 0.80  |
| Distancia de huella de frenado obtenida de la ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes captadas con UAV (m) | 31.32 | 23.25    | 38.79 | 15.39 |
| Velocidad inicial de investigación obtenida (km/h)  | 82.28 | 70.89    | 88.82 | 55.95 |

Fuente: Elaboración propia

Analizando la Tabla 6-32 y la Tabla 6-33 se establece que en la estimación de la velocidad inicial de investigación existe una diferencia no apreciable cuando se considera la pendiente. Por ejemplo, para la pendiente máxima documentada en el accidente tres (-8.00%) la diferencia en velocidad fue de apenas 4 km/h. Entonces, los resultados indican que la pendiente no es una variable significativa para la predicción de la velocidad inicial, si se compara con la longitud de las huellas de frenado.

#### Resumen de resultados obtenidos de la etapa cuatro

La Tabla 6-34 muestra un cuadro comparativo de las variables analizadas, principalmente, precisión y tiempo, para el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV, tanto para condiciones climáticas ideales, como para aquellas desfavorables.

Tabla 6-34 Cuadro comparativo de resultados

| Parámetro  | Método con UAV operado en condiciones climáticas ideales | Método con UAV operado en condiciones climáticas desfavorables |
|--|--|--|
| Número de accidentes recreados   | 4  | 6  |
| Error relativo máximo (%)  | 0.84   | 3.06   |
| Error relativo promedio (%)  | 0.58   | 1.50   |
| Máximo error de posicionamiento en el plano horizontal en "xy" (cm)        | 3.40   | 3.90   |
| Máximo error de posicionamiento en el plano vertical en "z" (cm)           | 4.00   | 3.60   |
| Tiempo total promedio para realizar la recreación del escenario (min:seg). | 304:06   | 323:37   |

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 6-35 muestra el tiempo promedio requerido para realizar la recreación del escenario de un accidente por el método tradicional y por el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con UAV, así como el porcentaje del ahorro en tiempo cuando se utiliza el método tradicional.

Tabla 6-35 Tiempo necesario para realizar el levantamiento de un accidente

| Parámetro   | Método tradicional | Método con UAV operado en condiciones climáticas ideales | Método con UAV operado en condiciones climáticas desfavorables |
|---|--------------------|--|--|
| Número de accidentes recreados  | 10                 | 4  | 6  |
| Tiempo total promedio para realizar la recreación del escenario (min:seg).  | 76:36              | 304:06   | 323:37   |
| Porcentaje de ahorro en tiempo para el método tradicional respecto al método con UAV operado en condiciones climáticas ideales.       | 75%                | No aplica  | No aplica  |
| Porcentaje de ahorro en tiempo para el método tradicional respecto al método con UAV operado en condiciones climáticas desfavorables. | 76%                | No aplica  | No aplica  |

Fuente: Elaboración propia

Resultados de la comparación del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas a través del uso de diferentes softwares

Con la finalidad de realizar una comparativa entre las precisiones obtenidas en la medición de huellas de frenado a través de ortofotos resultantes del procesamiento fotogramétrico de imágenes, se utilizaron los siguientes softwares:

1. Autodesk ReCap Photo versión 2021
2. Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070
3. Pix4Dmapper versión 4.3.33

A continuación, en la Tabla 6-36, se ilustran los resultados de las mediciones de huellas de frenado obtenidas en el software software Autodesk Autocad Civil 3D en su versión 2022 y para cada una de las ortofotos generadas por los tres softwares descritos en el párrafo anterior:

Tabla 6-36 Comparativa en la medición de huellas de frenado por tipo de software.

|                    |    | Distancias obtenidas en metros (m) |        |         |
|--------------------|----|------------------------------------|--------|---------|
|                    |    | Accidente No.                      | PIX4D  | AGISOFT |
| Clima ideal        | 1  | 31.486                             | 31.422 | 31.322  |
|                    | 2  | 23.218                             | 23.283 | 23.254  |
|                    | 3  | 38.331                             | 38.201 | 38.785  |
|                    | 4  | 15.319                             | 15.287 | 15.388  |
| Clima desfavorable | 5  | 9.376                              | 9.372  | 9.500   |
|                    | 6  | 5.220                              | 5.220  | 5.250   |
|                    | 7  | 26.252                             | 26.279 | 26.150  |
|                    | 8  | 14.509                             | 14.507 | 14.500  |
|                    | 9  | 50.595                             | 50.504 | 50.500  |
|                    | 10 | 34.417                             | 34.477 | 34.350  |

Fuente: Elaboración propia

Además, la Tabla 6-37, muestra la diferencia, expresada en porcentaje, de la medición obtenida en el software Autodesk ReCap Photo versión 2021 contra aquella generada en el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 y también la diferencia obtenida contra el software Pix4Dmapper versión 4.3.33.

También se estableció la comparativa entre las distancias generadas entre los softwares Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 y Pix4Dmapper versión 4.3.33.

Tabla 6-37 Diferencia en porcentaje entre mediciones de huella de frenado por cada software utilizado

|                    |    | Diferencias entre mediciones (%) |                |                  |
|--------------------|----|----------------------------------|----------------|------------------|
|                    |    | Accidente No.                    | RECAP VS PIX4D | RECAP VS AGISOFT |
| Clima ideal        | 1  | 0.52%                            | 0.32%          | 0.20%            |
|                    | 2  | 0.15%                            | 0.12%          | 0.28%            |
|                    | 3  | 1.17%                            | 1.50%          | 0.33%            |
|                    | 4  | 0.45%                            | 0.66%          | 0.21%            |
| Clima desfavorable | 5  | 1.31%                            | 1.35%          | 0.04%            |
|                    | 6  | 0.57%                            | 0.56%          | 0.01%            |
|                    | 7  | 0.39%                            | 0.49%          | 0.10%            |
|                    | 8  | 0.06%                            | 0.05%          | 0.02%            |
|                    | 9  | 0.19%                            | 0.01%          | 0.18%            |
|                    | 10 | 0.20%                            | 0.37%          | 0.17%            |
| Promedio           |    | 0.50%                            | 0.54%          | 0.15%            |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados mostrados en la Tabla 6-37 sugieren que cuando se comparan las distancias de huella de frenado medidas en las ortofotos generadas por los softwares Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 y Pix4Dmapper versión 4.3.33, directamente, contra los obtenidos a través de las fotografías procesadas en Autodesk ReCap Photo versión 2021, se tiene una diferencia cercana al 0.5%, mientras que si se comparan, ente sí, las mediciones obtenidas con el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 contra Pix4Dmapper versión 4.3.33, esta diferencia se reduce a 0.15 %. Ello indica que las mediciones de huellas de frenado medidas en las ortofotos de los softwares Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 y Pix4Dmapper versión 4.3.33 son muy similares, mientras que, en aquellas obtenidas con el software Autodesk ReCap Photo versión 2021, se acrecienta la diferencia en relación a los dos softwares citados.

La diferencia en la medición de distancias de huellas de frenado está directamente relacionada con la calidad de la ortofoto resultante del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas con que cuenta cada uno de los tres softwares utilizados y también depende del tamaño del pixel medido con el indicador denominado Ground Sampling Distance (GSD), por sus siglas en inglés, que, a su vez, se genera un función de la altura a la que se realizó el vuelo y la calidad de la cámara con que cuenta el equipo UAV utilizado.

Una vez que se realiza el vuelo, se asigna una altura y el software con que cuenta el dron, determina la calidad del lente y sensor de la cámara para fijar el GSD en campo. Ese GSD puede ser mejorado o disminuido con la calidad de procesamiento fotogramétrico con que cuentan diferentes softwares destinados para tal fin, como los tres programas que se utilizaron para esta investigación. En la medida en que se logre disminuir el tamaño del pixel, o bien, a menor sea el GSD, mayor será la precisión en la medición de huella de frenado directamente sobre las ortofotos generadas a partir de los modelos digitales superficie o MDS.

En la Tabla 6-38 se muestran los valores de resolución con los que fueron creados los modelos digitales de superficie (MDS), a partir de los cuales, se generaron las ortofotos con los tres softwares utilizados. También se lista la resolución de los modelos digitales de elevación (MDE) en un cuadro comparativo, con la finalidad de asociar la calidad de las ortofotos obtenidas (considerando el valor del GSD) con la precisión obtenida en la medición de huellas de frenado y, de esta manera, definir el software que cuenta con la mayor calidad para generar ortofotos por medio del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con equipo UAV. En la Tabla 6-38 también se ilustran otros parámetros de vuelo como la altura de vuelo, el GSD obtenido en campo o GSD de vuelo y el porcentaje de traslape de las imágenes captadas.

Tabla 6-38 Resolución de los MDS y el MDE resultantes del procesamiento fotogramétrico

|                    | Accidente No. | Parámetros de vuelo |              |             | Resolución del MDS (cm/px) |        |           | Resolución del MDE (cm/px) |               |                |
|--------------------|---------------|---------------------|--------------|-------------|----------------------------|--------|-----------|----------------------------|---------------|----------------|
|                    |               | Altura de vuelo (m) | Traslape (%) | GSD (cm/px) | AGIS OFT                   | PIX 4D | RECAP     | AGISOFT (2XGSD)            | PIX4D (5XGSD) | RECAP (10XGSD) |
| Clima ideal        | 1             | 35                  | 80           | 1.69        | 1.01                       | 1.08   | 1.000175  | 2.02                       | 5.40          | 10.00          |
|                    | 2             | 25                  | 80           | 1.16        | 0.515                      | 0.616  | 1.00004   | 1.03                       | 3.10          | 10.01          |
|                    | 3             | 20                  | 70           | 0.93        | 0.639                      | 0.721  | 1.000017  | 1.28                       | 3.54          | 10.01          |
|                    | 4             | 20                  | 80           | 0.93        | 0.865                      | 0.921  | 1.000044  | 1.73                       | 4.61          | 10.00          |
| Clima desfavorable | 5             | 30                  | 80           | 1.45        | 0.846                      | 0.903  | 1.000058  | 1.69                       | 4.51          | 10.01          |
|                    | 6             | 25                  | 80           | 1.16        | 0.528                      | 0.547  | 1.000068  | 1.06                       | 2.73          | 10.01          |
|                    | 7             | 30                  | 90           | 1.45        | 0.676                      | 0.876  | 1.000037  | 1.35                       | 4.96          | 10.00          |
|                    | 8             | 20                  | 80           | 0.93        | 0.781                      | 0.806  | 1.000116  | 1.56                       | 4.03          | 10.01          |
|                    | 9             | 20                  | 80           | 0.91        | 0.71                       | 0.731  | 1.000212  | 1.42                       | 3.67          | 10.01          |
|                    | 10            | 25                  | 70           | 1.21        | 0.699                      | 0.733  | 1.000129  | 1.4                        | 3.67          | 10.01          |
|                    |               |                     | Promedio     | 1.182       | 0.7269                     | 0.7934 | 1.0000896 | 1.454                      | 4.02          | 10.01          |

Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos en la Tabla 6-38, se establece que todos los GSD de vuelo disminuyeron cuando se creó la ortofoto a partir de los modelos digitales de superficie (MDS) con los tres softwares utilizados a excepción de aquellos vuelos realizados con la altura menor de 20 m en los que se obtuvo un GSD de vuelo menor a 1 cm/px. Para estos vuelos con altura de 20 metros la resolución del MDS aumento a 1 cm/px promedio, únicamente, cuando se utilizó el software Autodesk ReCap Photo versión 2021. Por tal motivo, se asevera que para los vuelos realizados con un dron Phantom 4 Advanced a una altura de 20 metros o menor, el software Autodesk ReCap Photo versión 2021 ajustó el indicador GSD hacia arriba (1 cm/px), mientras que para vuelos superiores a los 25 metros de altura en los que se registró un GSD mayor a 1 cm/px de la resolución en los MDS creados con Autodesk ReCap Photo versión 2021, el ajuste se realizó hacia abajo hasta llegar a 1 cm/ px. Con esto se concluye que el software Autodesk ReCap Photo versión 2021 no es tan preciso para generar MDS y ortofotos cuando el GSD es menor a 1 cm/px, como sí lo son los softwares Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 y Pix4Dmapper versión 4.3.33.

El software que disminuyó en mayor proporción el GSD obtenido durante el vuelo del equipo UAV en la resolución de los MDS a partir de los cuales se generaron las ortofotos que fueron utilizadas para medir huellas de frenado fue Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 con una resolución promedio obtenida, para los diez accidentes recreados, de 0.7269 cm/px, en segundo lugar, se encuentra el software Pix4Dmapper versión 4.3.33. Esto se traduce en que el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 crea ortofotos con una mejor resolución, en las que se obtienen las mediciones de huellas de frenado y distancias más precisas que en los otros dos softwares utilizados. Por ende, se establece que, de los tres softwares utilizados, el que cuenta con la mejor calidad para la creación de ortofotos es Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070.

Asimismo, se concluye que utilizando el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 se obtienen las distancias de huella de frenado más precisas.

Como comentario adicional, se aclara, que el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070, resultó ser el más conveniente para crear ortofotos, no así, para la creación de otros productos resultantes del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, tales como: nube de puntos, mallas texturizadas y modelos tridimensionales, por mencionar algunos. Para establecer la calidad de estos productos se requiere realizar otro análisis y profundizar ampliamente en su conceptualización.

## **7. Conclusiones**

Conclusiones específicas de la metodología empleada

### **7.1 Conclusiones particulares de la etapa tres**

De conformidad con los resultados obtenidos en la medición de la longitud de huellas de frenado a partir de la fotogrametría aérea obtenida con equipo UAV y la georreferenciación a puntos de control terrestres para los tres accidentes recreados en la etapa número tres de la metodología propuesta, se concluye que, bajo las condiciones de día con cielo parcialmente nublado y velocidades de viento de hasta 3.2 metros por segundo, se corrige la variabilidad causada por efectos de clima sobre las coordenadas registradas en las fotografías aéreas y se obtiene un error relativo menor al cinco por ciento en la medición de distancias y huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco. Esto a causa de que el error máximo relativo obtenido en los eventos recreados fue del 3.26% en relación a las mediciones ejecutadas con los instrumentos que se utilizan comúnmente a un levantamiento

tradicional; como son el odómetro de rueda y el flexómetro. Con esta conclusión, se demuestra que la hipótesis planteada en la presente investigación se cumple, debido a que el error relativo obtenido en la estimación de huellas de frenado es menor al 5%.

Por otra parte, se concluye que, de acuerdo a las condiciones de clima desfavorables bajo las que se operó el UAV y la deficiencia de luz presentada en días parcialmente nublados, aunado a las velocidades de viento documentadas (menores o iguales a 3.2 metros por segundo), no afectaron o disminuyeron la precisión del equipo UAV para identificar y medir huellas de frenado a partir de los modelos creados con el procesamiento fotogramétrico.

En lo referente a la precisión del posicionamiento de las imágenes obtenidas con el equipo UAV y georreferenciadas a puntos de control terrestres marcados con un GPS de mano, se concluye que, el GPS de mano utilizado en los accidentes definidos para ser calibrados en la etapa tres de la metodología propuesta en esta investigación, no tiene una buena precisión ya que su error oscila entre los tres metros en el plano "xy " y también en "z", por tanto, y aunque el ajuste de las fotografías aéreas obtenidas con los puntos de control, se logró de manera casi perfecta durante el procesamiento fotogramétrico, el error de posicionamiento del GPS es considerable, no así, la medición de huellas de frenado. Aunque este GPS no cuenta con una buena precisión al ubicar los puntos de control, funcionó como un parámetro de acercamiento preliminar, previo a utilizar un receptor GNSS con mayor precisión en la etapa cuatro de la investigación. Asimismo, es importante aclarar que la precisión en la medición de huellas de frenado, es independiente a la precisión de posicionamiento en relación a los puntos marcados con GPS, ya que se pueden medir las huellas de frenado, aunque las ubicaciones reales de las fotos presenten algún desfase de posicionamiento, esto, sin alterar considerablemente las longitudes obtenidas para huellas de frenado. Para observar de una mejor manera el impacto que se tiene en la medición de huellas de frenado, tras el haber posicionado con mayor precisión las fotografías aéreas a través del marcado de

puntos de control con un receptor GNSS; se remite a las conclusiones de la etapa cuatro de este documento que se muestran más adelante.

De la estimación de las velocidades a partir de la distancia obtenida para huellas de frenado, se concluye que, a mayor distancia de huellas de frenado, mayor es la magnitud de la velocidad obtenida, es decir, existe una relación directamente proporcional entre la longitud de las huellas de frenado y la velocidad de investigación calculada con la ecuación (16).

Lo anterior suena lógico y coincide con los dictámenes de las fuerzas policiales, es decir, los valores obtenidos para velocidades, de acuerdo a las configuraciones de los vehículos involucrados en los accidentes reconstruidos, la geometría de la vialidad y los reportes de las fuerzas policiales, son congruentes para el parámetro de velocidad obtenido en cada caso presentado en cada una de las etapas de la investigación. Asimismo, la precisión obtenida en la medición de huellas de frenado (error menor al 5%) abona a que la estimación de las velocidades de investigación en los accidentes, también sean correctas, debido a que las variables son directamente proporcionales.

## 7.2 Conclusiones particulares de la etapa cuatro

Escenarios recreados con imágenes aéreas obtenidas con equipo UAV operado bajo condiciones climáticas no extremas, pero desfavorables.

Los resultados obtenidos en la presente etapa de la investigación para la medición de la longitud de huellas de frenado a partir de fotogrametría aérea obtenida con equipo UAV bajo las condiciones climáticas desfavorables de día con cielo parcialmente nublado y una velocidad máxima del viento de hasta 3.7 metros por segundo y la georreferenciación a puntos de control terrestres para los seis accidentes recreados, indican que se corrige la variabilidad causada por efectos de

clima sobre las coordenadas registradas en las fotografías aéreas y se obtiene un error relativo menor al cinco por ciento en la medición de distancias y huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco de un método de medición a otro. Esto a causa de que el error máximo relativo obtenido en los eventos recreados fue del 3.06% en relación a las mediciones ejecutadas con los instrumentos que se utilizan comúnmente en un levantamiento tradicional; como son el odómetro de rueda y el flexómetro.

Se aclara que la precisión obtenida (error relativo) no es comparable a la precisión de posicionamiento de las coordenadas de los puntos de control terrestres a las que se anclaron las fotos aéreas que sirvieron de entrada para crear la ortofoto, sino que es independiente, y por tal motivo se reportó de manera separada en la sección de resultados. Es decir, se pudieron medir las huellas de frenado, aunque las ubicaciones de las fotos aéreas presentaran un desfase de posicionamiento menor a 4 cm tanto en el plano horizontal (xy) como en el vertical; lo que representaría un error máximo cercando al 4% en una longitud de 100 metros. Dicho error se generó, principalmente, por la precisión del equipo geodésico utilizado y el ajuste de las coordenadas de los puntos de control terrestres a la Red Geodésica Nacional Activa.

Las velocidades estimadas considerando las huellas de frenado documentadas a partir del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, se calcularon considerando la pendiente y también descontándola. En relación a ello, se estable que la pendiente no impacta, de manera significativa, en el aumento o decremento de la velocidad inicial a la que circulaban los vehículos, previo a la ocurrencia de un accidente.

En lo relativo al tiempo de recolección de distancias y datos geométricos del escenario de un accidente comparando el tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional y el tiempo total requerido para

ejecutar el levantamiento a partir de fotogrametría aérea obtenida con UAV que incluye la duración del vuelo con equipo UAV, el procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas y el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres por el método estático, se establece, de acuerdo a los resultados obtenidos, que la recreación del escenario de un accidente por el método tradicional es más rápida, esto, tras haber obtenido un tiempo promedio (considerando los seis accidentes recreados) de 66.8 minutos en relación al tiempo promedio obtenido por el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, que fue de 323.6 minutos, lo cual, indica que se tiene un porcentaje en ahorro de tiempo promedio del 80% cuando se utiliza el método tradicional para la recreación de escenarios de accidentes respecto a la fotogrametría aérea. Sin embargo, y aunque el método tradicional es más rápido se ha encontrado baja precisión y eficiencia en la implementación de los métodos de medición convencionales a causa del factor humano, principalmente en la recolección de datos y llenado de registros como se indicó por otros autores en la introducción de este documento, por tal motivo y con fundamento en las precisiones obtenidas en esta investigación, se recomienda utilizar el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas para recrear la escena de un accidente.

Escenarios recreados con imágenes aéreas obtenidas con equipo UAV operado bajo condiciones climáticas ideales.

Los resultados obtenidos en la presente investigación para la medición de la longitud de huellas de frenado a partir de fotogrametría aérea obtenida con equipo UAV bajo las condiciones climáticas ideales de cielo despejado y soleado con viento débil o inexistente de hasta 0.98 metros por segundo y la georreferenciación a puntos de control terrestres para los cuatro accidentes recreados, indican que se obtiene un error relativo menor al cinco por ciento en la medición de distancias y huellas de frenado en un pavimento asfáltico seco de un método de medición a otro. Esto a

causa de que el error máximo relativo obtenido en los eventos recreados fue del 0.84% en relación a las mediciones ejecutadas con los instrumentos que se utilizan comúnmente en un levantamiento tradicional; como son el odómetro de rueda y el flexómetro.

Las ubicaciones de las fotos aéreas presentaran un desfase de posicionamiento menor o igual a 4 cm tanto en el plano horizontal (xy) como en el vertical; lo que representaría un error máximo cercando al 4% en una longitud de 100 metros. Dicho error se generó, principalmente, por la precisión del equipo geodésico utilizado y el ajuste de las coordenadas de los puntos de control terrestres a la Red Geodésica Nacional Activa. El error de posicionamiento es idéntico al error que se presentó bajo las condiciones climáticas desfavorables.

En lo relativo al tiempo de recolección de distancias y datos geométricos del escenario de un accidente comparando el tiempo necesario para realizar el levantamiento en campo por el método tradicional y el tiempo total requerido para ejecutar el levantamiento a partir de fotogrametría aérea obtenida con UAV que incluye la duración del vuelo con equipo UAV, el procesamiento fotogramétrico de las imágenes aéreas y el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres por el método estático, se establece, de acuerdo a los resultados obtenidos, que la recreación del escenario de un accidente por el método tradicional es más rápida, esto, tras haber obtenido un tiempo promedio (considerando los cuatro accidentes recreados) de 91 minutos en relación al tiempo promedio obtenido por el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas, que fue de 304 minutos, lo cual, indica que se tiene un porcentaje en ahorro de tiempo promedio del 70% cuando se utiliza el método tradicional para la recreación de escenarios de accidentes respecto a la fotogrametría aérea. Los resultados sugieren tiempos similares para realizar los levantamientos tradicionales bajo condiciones ideales y bajo condiciones climáticas desfavorables. Aun así, se recomienda utilizar el método del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas por ser más preciso tanto en condiciones de clima desfavorables, como en las ideales.

### 7.3 Conclusiones sobre la comparativa de softwares para establecer la calidad de los ortofotos resultantes del procesamiento fotogramétrico

El software que resultó contar con la mejor resolución para crear ortofotos en el procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas fue Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070. Con las fotos creadas en este software, se obtuvieron las distancias de huellas de frenado más precisas. No obstante, aunque utilizando el software Agisoft Metashape Professional versión 1.7.2 build 12070 se obtuvieron ortofotos de la mejor calidad en relación a los tres softwares analizados, no se puede establecer o aseverar que otros productos del procesamiento fotogramétrico de imágenes aéreas obtenidas con equipo UAV tales como: mallas texturizadas, nubes de puntos o modelos tridimensionales, por mencionar algunos, contarán también con una calidad superior si se realizan con este software, sino que es necesario realizar un análisis aparte y profundizar en su conceptualización.

### 7.4 Conclusiones generales del trabajo de investigación

El error relativo obtenido en la medición de huellas de frenado tanto en condiciones climáticas desfavorables para la operación del equipo UAV, como para aquellas condiciones favorables, no superó el cinco por ciento. Sin embargo, en condiciones de clima favorables, el error relativo resultó ser menor al uno por ciento, mientras que para clima desfavorable el error máximo obtenido es cercano al tres por ciento; lo que indica que se tiene mejor precisión en condiciones climáticas ideales.

El desfase de posicionamiento de las fotografías aéreas obtenidas con equipo UAV en condiciones climáticas favorables y desfavorables en relación a la Red Geodésica Nacional Activa (RGNA) de INEGI, tanto en el plano horizontal (xy) como en el vertical, fue menor o igual a cuatro centímetros; lo que representaría un error cercano al cuatro por ciento en una longitud de cien metros. La precisión del

ajuste se debe a que el equipo receptor GNSS con el que se realizó el levantamiento geodésico cuenta con una precisión centimétrica, que aunado al postproceso de los puntos de control terrestres realizados en el software Top Con Tools, dio como resultado una aproximación bastante acercada a lo que indica la RGNA de INEGI.

La velocidad inicial a la que circulaban los vehículos involucrados en los accidentes recreados, es directamente proporcional a la longitud de la huella de frenado. Además, a través de las expresiones matemáticas utilizadas para el cálculo de la velocidad y los resultados obtenidos a partir de ellas, se estableció que la pendiente de un camino no influye, de manera significativa, en el aumento de la velocidad inicial para valores de pendiente de hasta el ocho por ciento.

Considerando los seis escenarios recreados en condiciones de clima favorables y los cuatro escenarios reconstituidos con fotografía aérea obtenida con equipo UAV operado bajo condiciones climáticas desfavorables, se establece que el tiempo promedio para la recreación del escenario de un accidente es menor cuando se realiza por el método tradicional, en comparación al método que emplea el UAV, es decir, la recreación por el método tradicional, se realiza cuatro veces más rápido, que con el método que emplea el UAV. Esto se debe a que la recreación por el método que emplea el UAV incluye el levantamiento geodésico de puntos de control terrestres por el método estático. El método estático es el que consume mayor tiempo en el proceso de recreación del escenario del accidente, como mínimo, se requirieron cuatro horas para su realización, por accidente. Si se descarta el levantamiento geodésico por el método estático en la recreación de un accidente por el método que emplea el UAV como herramienta de trabajo, se tiene un ahorro en tiempo promedio del setenta y seis por ciento respecto al método tradicional. A consecuencia de lo anterior, para futuras investigaciones, se recomienda realizar el levantamiento geodésico con equipo GNSS operado en modo RTK, el cual, tiene la característica principal de ser más rápido que el método estático. De esta manera, empleando equipo topográfico y UAV similar al utilizado

en esta investigación y operado bajo las condiciones climáticas señaladas, se podrán comparar los resultados obtenidos en cuanto a precisión y tiempo de ejecución se refiere.

Otra línea de investigación para abordar en el futuro consiste en obtener fotografía aérea operando el equipo UAV en condiciones de luz desfavorables, específicamente, en días completamente nublados y/o en condiciones de luz nocturna. Además, se recomienda operar el equipo UAV en ambientes con velocidades de viento mayores a cuatro metros por segundo y menores a diez metros sobre segundo para indagar en la precisión de las huellas de frenado en esas condiciones desfavorables, una vez realizado el procesamiento fotogramétrico.

## 8. Referencias

- Brown, J., Grimm, M., & Hansen, D. (2007). Relationship Between Anti-Lock Tire Mark Length and Speed Change. *Brown, J. C., Grimm, M., & Hansen, D. (2007). Relationship Between Anti-Lock Tire Mark Length and Speed Change. SAE Technical Paper Series. doi:10.4271/2007-01-0723 , 01-0723. doi:10.4271/2007-01-0723*
- Daakir , M., Pierrot-Deseilligny, M., Bosser, P., Pichard, F., Thom, C., Rabot, Y., & Martin, O. (Mayo de 2017). Lightweight UAV with on-board photogrammetry and single-frequency GPS positioning for metrology applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 127*, 115.-126. doi:10.1016/j.isprsjprs.2016.12.007
- Agudo, P., Pajas, J., Pérez-Cabello, F., Redón, J., & Lebrón, B. (2018). The Potential of Drones and Sensors to Enhance Detection of Archaeological Cropmarks: A Comparative Study Between Multi-Spectral and Thermal Imagery. *Drones, 2*(3), 29. doi:/10.3390/drones2030029
- Ardestani, S., Jin, P., Volkmann, O., Gong, J., Zhou, Z., & Feeley, C. (2016). *3D Accident Site Reconstruction Using Unmanned Aerial Vehicles (UAV)*. Washington DC: Transportation Research Board 95th Annual Meeting.
- Arjomandi , A., Agostino , S., Mammone, M., Nelson, M., & Zhou, T. (2006). *Classification of unmanned aerial vehicle*. Adelaide: The University of Adelaide.
- Autodesk . (2020). *Autodesk ReCap Photo 2021 guidelines*. San Rafael: Autodesk .
- AVANTI ENGINEERING GROUP. (2010). *Estudio de Asignación y Pronóstico de Tránsito Específico para el Libramiento de la Ciudad de Celaya, Guanajuato*. Monterrey: AVANTI ENGINEERING GROUP.
- Barmounakis, E., Vlahogianni, E., John, G., & Babinec, A. (2017). How accurate are small drones for measuring microscopic traffic parameters? *Transportation Letters, 9*(5), 1-9. doi:10.1080/19427867.2017.1354433

- Borrel, J. (2018). *Manual de Investigación y Reconstrucción de Accidentes de Tráfico* (Primera ed.). Valencia: Editorial Tirant lo Blanch.
- Broughton, J., M. Keigan , Knowles , J., & Smith , L. (2010). *Guidance for the Analysis of STATS19 Contributory Factors*. Wokingham: Transportation Research Laboratory. Recuperado el 24 de Septiembre de 2020, de <https://trl.co.uk/sites/default/files/PPR488.pdf>
- Bruns, H. (1878). *Die figure des Erde*. Berlin: P. Stankiewicz.
- Cal y Mayor , R., & Cárdenas, J. (2007). *Ingeniería de Tránsito. Fundamentos y aplicaciones*. Ciudad de México: Alfaomega.
- Camara de Diputados del H. Congreso de la Unión. (30 de Noviembre de 2016). Ley de Impuesto sobre la Renta. *Nueva Ley publicada en el Diario Oficial de la Federación el 11 de diciembre de 2013. Ultima reforma publicada DOF 30-11-2016*. Ciudad de México, Ciudad de México, Mexico : Diario Oficial de la Federación .
- Collier, P. (2020). Photogrammetry and Aerial Photography. *International Encyclopedia of Human Geography*, 10, 91-98. doi:10.1016/B978-0-08-102295-5.10583-9
- Cooner, S., & Balke , K. (2000). *Use of photogrammetry for investigation of traffic incident scenes (TX-99/4907-2)*. . Austin: Texas Department of Transportation.
- Daponte, P., De Vito, L., Mazzilli, G., Picariello, F., Rapuano, S., & Riccio, M. (2015). Metrology for drone and drone for metrology: Measurement systems on small civilian drones. *IEEE Metrology for Aerospace (MetroAeroSpace)*, 306-311. doi:10.1109/MetroAeroSpace.2015.7180673
- Dirección General de Infraestructura Vial de la Secretaría de Obra Pública del Estado de Guanajuato. (23 de abril de 2018). *Guanajuato.Gobierno del Estado*. Obtenido de Secretaría de Obra Pública del Estado de Guanajuato: <http://obrapublica.guanajuato.gob.mx/?page%20id=534>
- DJI. (2017). *Disclaimer and safety guidelines. Phantom 4 series* . Beijing: DJI.
- DJI. (2017). *Guía de inicio rápido. Phantom 4 advanced*. Shenzhen: DJI.

- Eisenbeiss, H. (2004). *A mini unmanned aerial vehicle (UAV): system overview and image acquisition*. Zurich: ISPRS.
- Engel , E., Fischer , R., & Galetovic, A. (2014). *Economía de las asociaciones público-privadas. Una guía básica* (Primera ed.). Ciudad de México , México: Fondo de Cultura Económica.
- Forero, M., Merchán, C., & Murillo, C. (2016). Análisis de técnicas de binarización basadas en histogramas 2D. *Ingeniería: Ciencia, Tecnología e Innovación*, 3(2), 2313-1926.
- Garmin. (2013). *GPSMAP 64 series / GPSMAP 64X series Manual de usuario*. Olathe: Garmin Ltd.
- González , H., Riveiro, B., Armesto, J., & Arias, P. (2011). *Geometric Evaluation of Road Signs Using Radiometric Information from Laser Scanning Data*. Seou: 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction.
- Google Earth. (23 de Abril de 2018). Libramiento de Celaya, Guanajuato. Celaya, Guanajuato, México.
- Grenzdörffer, G., Engel , A., & Teichert, B. (2008). The photogrammetric potential of lowcost UAVs in forestry and agriculture. *ISPRS*, 31(B3), 1207-1214.
- Haala, N., Cramer, M., Weimer, F., & Trittler, M. (2011). Performance test on UAV-based photogrammetric data collection. *ISPRS*, XXXVIII-1/C22, 7-12. doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-7-2011
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (Mayo de 2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99-131. doi:10.1016/j.paerosci.2017.04.003
- Helmert, F. (1880). *Die mathematischen und physikalischen theorieen der höheren geodäsie*. Leipzig: Leipzig, B. G. Teubner.
- Imprialou, M., & Quddus, M. (2019). Crash data quality for road safety research: Current state and future directions. *Accident Analysis & Prevention*, 130, 84-90. doi:https://doi.org/10.1016/j.aap.2017.02.022
- IMT. (2004). *Sistema de evaluación de pavimentos*. Sanfandila : IMT.

- IMT. (2011). *Publicación Técnica no. 353. Prácticas para evaluar la calidad de infraestructura carretera de cuota*. Sanfandila: IMT.
- INEGI. (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Celaya, Gto. Clave geoestadística 07016*. Aguascalientes: INEGI.
- INEGI. (2010). *Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional*. Ciudad de México: INEGI. Recuperado el 16 de Octubre de 2020, de <https://www.snieg.mx/contenidos/espanol/normatividad/tecnica/Norma%20T%C3%A9cnica%20para%20el%20Sistema%20Geod%C3%A9sico%20Nacional.pdf>
- INEGI. (2015). *Encuesta Intercenal 2015. Principales Resultados*. Aguascalientes: Comunicación Social .
- INEGI. (2015). *Guía Metodológica de la Red Geodésica Horizontal*. Ciudad de Mexico: INEGI. Recuperado el 16 de Octubre de 2020, de [http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva\\_estruc/702825078805.pdf](http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/702825078805.pdf)
- INEGI. (2021). *Coordenadas geodésicas de las estaciones de la RGNA (ITRF2008, época 2010.0)*. Aguascalientes : INEGI.
- Jin, P., Ardestani, S., Wang, Y., & Hu, W. (2016). *Unmanned Aerial vehicle (UAV) Based Traffic Monitoring and Management*. New Jersey: Center for Advanced Infrastructure and Transportation (CAIT), University of New Jersey.
- Kamnik, R., Nekrep, M., & Topolšek, D. (Febrero de 2020). Using the scanners and drone for comparison of point cloud accuracy at traffic accident analysis. *Accident Analysis & Prevention*, 135, 105391. doi:<https://doi.org/10.1016/j.aap.2019.105391>
- Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. (2013). A Photogrammetric Workflow for the Creation of a Forest Canopy Height Model from Small Unmanned Aerial System Imagery. *Forests*, 4(4), 922-944. doi:10.3390/f4040922

- Liu, S., Wang, S., Wenhao, S., Haibo, L., Zhaoxin, L., & Tianlu, M. (2019). Vehicle tracking by detection in UAV aerial video. *Science China Information Sciences*, 62. doi:10.1007/s11432-018-9590-5
- Liu, X., Zou, H., Niu, W., Song, Y., & He, W. (Octubre de 2019). An Approach of Traffic Accident Scene Reconstruction Using Unmanned Aerial Vehicle Photogrammetry. *Proceedings of the 2019 2nd International Conference on Sensors, Signal and Image Processing*, 31-34. doi:10.1145/3365245.3365247
- Macrina, G., Di Puglia Pugliese, L., Guerriero, F., & Laporte, G. (Noviembre de 2020). Drone-aided routing: A literature review. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 120, 102762. doi:10.1016/j.trc.2020.102762
- Montella, A. (Julio de 2011). Identifying crash contributory factors at urban roundabouts and using association rules to explore their relationships to different crash types. *Accident Analysis & Prevention*, 43(4), 1451-1463. doi:https://doi.org/10.1016/j.aap.2011.02.023
- Moya, J., & Cedeño, B. (2017). CONCEPTOS BÁSICOS EN GEODESIA COMO INSUMO PARA UN TRATAMIENTO ADECUADO DE LA INFORMACIÓN GEOESPACIAL. *Revista Geográfica de América Central*, 1(58), 71-100. doi:10.15359/rgac.58-1.3
- Neitzel, F., & Klonowski, J. (2011). Mobile 3D mapping with low-cost UAV system. *ISPRS, XXXVIII-1/C22*, 39-44. doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-39-2011
- OMS. (2010). *Plan Mundial para el Decenio de Acción para la Seguridad Vial 2011-2020*. Ginebra: OMS.
- ONU. (2020). Mejoramiento de la seguridad vial en el mundo. *Septuagésimo cuarto período de sesiones* (págs. 1-10). Nueva York : Asamblea General de la ONU.
- Otto, A., Agatz, N., Campbell, J., Golden, B., & Pesch, E. (Diciembre de 2018). Optimization approaches for civil applications of unmanned aerial vehicles

- (UAVs) or aerial drones: A survey. *Networks*, 72(7), 411-458. doi:10.1002/net.21818
- Outay, F., Mengash, H., & Adnan, M. (2020). Applications of unmanned aerial vehicle (UAV) in road safety, traffic and highway infrastructure management: Recent advances and challenges. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 141, 116-129. doi:10.1016/j.tra.2020.09.018
- Pádua, L., Sousa, J., Vanko, J., Hruška, J., Adão, T., Peres, E., . . . Sousa, J. (2020). Digital Reconstitution of Road Traffic Accidents: A Flexible Methodology Relying on UAV Surveying and Complementary Strategies to Support Multiple Scenarios. *Environmental Research and Public Health*, 17, 1868. doi:10.3390/ijerph17061868
- Perdomo, C., Caicedo, J., Nuñez, N., Machado, D., Garcia, J., & Pineda, C. (2015). *Establecimiento de puntos de control terrestre para la corrección planimétrica de imágenes tomadas por drones*. Caracas: 1st Congreso de Geomática. doi:10.13140/RG.2.1.3415.4640
- Pérez, J., Gonçalves, G., Galván, J., & Fuentes, P. (Junio de 2019). Accuracy and effectiveness of orthophotos obtained from low cost UASs video imagery for traffic accident scenes documentation. *Advances in Engineering Software*, 132, 47-54. doi:10.1016/j.advengsoft.2019.03.010
- Poder Ejecutivo. (30 de Julio de 2010). Título-concesión para el Libramiento de Celaya. *Anexo 1: Definiciones*. Guanajuato, Guanajuato, México.
- PROINTEC. (2011). *Estudio geotécnico y diseño de espesores de pavimento flexible, para el proyecto del Libramiento Nororiente de Celaya*. Ciudad de México: PROINTEC.
- RAE. (2019). *Diccionario de la lengua española*. Madrid: Asociación de academias de la lengua española.
- Raj, C., Sree, B., & Madhavan, R. (2017). Vision based accident vehicle identification and scene investigation. *2017 IEEE Region 10 Symposium (TENSYMP)*, 1-5. doi:10.1109/TENCONSpring.2017.8070062

- Remondino, F., Barazzetti, L., Nex, F., Scaioni, M., & Sarazzi, D. (2011). *UAV PHOTOGRAMMETRY FOR MAPPING AND 3D MODELING. – CURRENT STATUS AND FUTURE PERSPECTIVES*. Zurich: ISPRS. doi:10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-25-2011
- Salas, S. P. (2019). *Identificación de agrietamientos superficiales por medio de un vehículo aéreo no tripulado (UAV)*. Querétaro : Universidad Autónoma de Querétaro.
- SCT. (2003). *NOM-034-SCT2-2003, Señalamiento horizontal y vertical de carreteras y validades urbanas*. Ciudad de México: SCT.
- SCT. (2014). *Manual de Señalización Vial y Dispositivos de Seguridad SCT 2014*. Ciudad de México : SCT.
- SCT. (2015). *NOM-086-SCT2-2015, Señalamiento y dispositivos para protección en zonas de obras viales*. Ciudad de México: SCT.
- SCT. (2018). *Manual de Proyecto Geométrico de Carreteras*. Ciudad de México, Ciudad de México, México: Dirección General de Servicios Técnicos. Recuperado el 13 de Febrero de 2020, de [www.sct.gob.mx](http://www.sct.gob.mx)
- SCT. (2019). *NOM-107-SCT3-2019*. Ciudad de México: SCT. Recuperado el 14 de Octubre de 2020, de <http://www.sct.gob.mx/fileadmin/DireccionesGrales/DGAC-archivo/modulo2/nom-107-sct3-2019-201119.pdf>
- Shraim, H., Awada, A., & Youness, R. (Julio de 2018). A survey on quadrotors: configurations, modeling and identification, control, collision avoidance, fault diagnosis and tolerant control. *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, 33(7), 14-33. doi:10.1109/MAES.2018.160246
- Singhal, G., Bansod, B., & Mathew, L. (2018). Aerial vehicle classification, applications and challenges: A review. *Preprints.org*. doi:10.20944/preprints201811.0601.v1
- Skorput, P., Jakara, M., & Pašagić, J. (2019). Application of Unmanned Aerial Vehicles in Logistic Processes. *New Technologies, Development and Application*, 359-366. doi:10.1007/978-3-319-90893-9\_43

- SOKKIA Corporation. (2013). *SOK-1016 Rev A 3/13*. Olathe: Topcon Corporation.
- Stáňa, I., Tokař, S., Bucsuházy, K., & Bilík, M. (2017). Comparison of Utilization of Conventional and Advanced Methods for Traffic Accidents Scene Documentation in the Czech Republic. *Procedia Engineering*, 187, 471-476. doi:<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.402>
- STPS. (2014). *Reglamento Federal de Seguridad y Salud en el Trabajo*. Ciudad de México: STPS.
- Torge, W. (2001). *Geodesy* (Tercera ed.). New York: Walter de Gruyter-Berlin-New York.
- Vargas , N., & Paneque, J. (Agosto de 2020). Desafíos normativos para el uso comunitario de drones en México. *Investigaciones Geográficas*(102), 1-14. doi:10.14350/rig.60007
- Verbeke, J., & De Schutter, J. (Marzo de 2018). Experimental maneuverability and agility quantification for rotary unmanned aerial vehicle. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 10(1), 3-11. doi:10.1177/1756829317736204
- Weibel , R., & Hansman, R. (2006). *Safety Considerations for Operation of Unmanned Aerial Vehicles in the National Airspace System. Report No. ICAT-2005-1*. Cambridge: MIT International Center for Air Transportation.
- World Health Organization. (2018). *Global status report on road safety 2018*. Geneva: World Health Organization 2018. Recuperado el 23 de Septiembre de 2020

## 9. Anexos

### Anexo 1

Responsable SEO:

Responsable y/o encargado de área:

#### 1. Fuente de información del evento

|                    |  |
|--------------------|--|
| Clave del evento:  |  |
| Tipo de siniestro: |  |
| Avisó:             |  |
| Jurisdicción:      |  |

|               |  |         |  |
|---------------|--|---------|--|
| Cadenamiento: |  | Cuerpo: |  |
|---------------|--|---------|--|

|                 |  |       |  |
|-----------------|--|-------|--|
| Fecha de aviso: |  | Hora: |  |
|-----------------|--|-------|--|

|                   |  |       |  |
|-------------------|--|-------|--|
| Fecha de llegada: |  | Hora: |  |
|-------------------|--|-------|--|

#### 2. Confirmación de ubicación y ocurrencia del evento

|                    |  |         |  |
|--------------------|--|---------|--|
| Cadenamiento real: |  | Cuerpo: |  |
|--------------------|--|---------|--|

|      |  |
|------|--|
| GPS: |  |
|------|--|

### 3. Tiempo de ensamble UAV.

|                              |  |
|------------------------------|--|
| Hora de inicio del ensamble: |  |
| Hora final del ensamble:     |  |
| Tiempo de ensamble (min):    |  |

### 4. Parámetros de vuelo y duración del procesamiento fotogramétrico

| Altura (m) | Ángulo de cámara (°) | Tipo/Modo de vuelo. | Tiempo de vuelo (min:s) | Número de imágenes | Duración de vuelo (min:s) | Traslape de imágenes (%) | GSD: Ground Sample Distance (cm/px) | PPD (Photogrammetric Processing Duration) (min:s) | Área (Lado X Lado; m): | Área (m <sup>2</sup> ): |
|------------|----------------------|---------------------|-------------------------|--------------------|---------------------------|--------------------------|-------------------------------------|---|------------------------|-------------------------|
|            |                      |                     |                         |                    |                           |                          |                                     |   |                        |                         |

Rangos para variables:

Altura (m): 10 - 40 m.

Ángulo de cámara (°): Para vuelo autónomo: 60° - 90°; Para vuelo manual: 30° - 60° (Hasta 10 m de altura).

Traslape de imágenes (%): 65% - 90% (Recomendable de 70% a 80%).

### 5. Condiciones de clima

|  |  |
|--|--|
| Condición de clima presentada:         |  |
| Velocidad promedio del viento (m/seg): |  |
| Velocidad máxima del viento (m/seg):   |  |
| Velocidad mínima (m/seg):              |  |

## 6. Obstáculos

|   |  |
|---|--|
| ¿Existen obstáculos en la escena?                 |  |
| Tipo de obstáculo (*):                            |  |
| Descripción 1 (altura y ancho; m)/características |  |
| Descripción 2 (altura y ancho; m)/características |  |
| Descripción 3 (altura y ancho; m)/características |  |

## 7. Condiciones de luz

|                                      |  |
|--------------------------------------|--|
| Condición de visibilidad presentada: |  |
| Fuente de luz:                       |  |
| ¿Es condición adversa?               |  |

## 8. Distancias obtenidas en campo

| No. | Del punto: | Al punto: | Flexómetro/cinta métrica (mm) | Odómetro de rueda (mm) | UAV (mm) |
|-----|------------|-----------|-------------------------------|------------------------|----------|
| 1   |            |           |                               |                        |          |
| 2   |            |           |                               |                        |          |
| 3   |            |           |                               |                        |          |
| 4   |            |           |                               |                        |          |
| 5   |            |           |                               |                        |          |
| 6   |            |           |                               |                        |          |
| 7   |            |           |                               |                        |          |
| 8   |            |           |                               |                        |          |

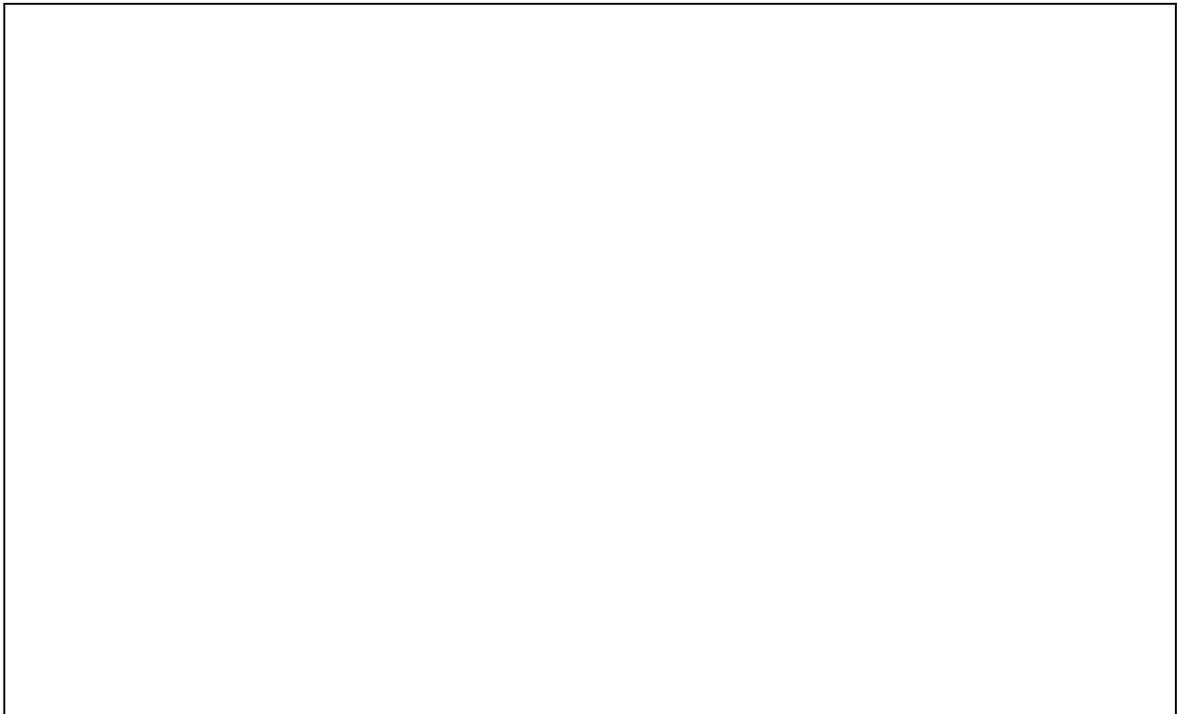
9. Tiempo requerido para obtener distancias con el método tradicional (uso de cinta métrica y odómetro de rueda en campo)

|   |  |
|---|--|
| Hora de inicio de las mediciones:         |  |
| Hora final de las mediciones:             |  |
| Tiempo total obtenido en campo (min:seg): |  |

10. Tiempo requerido para procesar imágenes y realizar modelo 3D (en gabinete)

|  |  |
|--|--|
| Hora de inicio:                          |  |
| Hora final:                              |  |
| Tiempo total obtenido en gabinete (min): |  |

11. Croquis de la escena



12. Reporte fotográfico.