

Análisis comparativo de metodologías de captura de datos topográficos, aplicados en modelación hidrodinámica bidimensional de flujo en superficie, estudio de caso Barrio

Gaitán, ciudad de Tunja – Boyacá

Jhonssua Alejandro Sotelo Moreno

Tesis de grado para optar el título de

Ingeniero Civil

Director

MSc. Wilson Enrique Amaya Tequia

Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en Hidroambiental

Ingeniero Sanitario

Universidad Santo Tomás, Tunja

División de Arquitectura e Ingenierías

Facultad de Ingeniería Civil

2023

Nota de aceptación:

Firma del presidente del jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

Dedicatoria

A Dios, quien me colmó de bendiciones para cumplir este, que es uno de los sueños que siempre anhelaba tener desde mi época del colegio.

Además, desde mi corazón, quiero dedicar este trabajo de grado a dos personas que han servido de gran ejemplo en mi vida: una es la persona más importante en mi vida quien es mi madre Yaneth Lorena Moreno, quien fue mi apoyo desde el momento de mi nacimiento y quien, sin ella, no sería la persona que soy hasta el momento, además, quien sirvió de ejemplo de vida, que los sueños si luchas fuertemente y los anhelos se cumplen.

Otra persona muy especial, quien sé que me acompaña desde el cielo, es a mi tío Wilson Alexander Moreno, quien me sirvió de gran inspiración en cada una de las asignaturas de la carrera y de la persona que más siento admiración por el gran trabajo que realizó cuando se encontraba con vida.

Agradecimientos

En primera medida a mi familia, quienes han sido apoyo en todo este proceso arduo de trabajo, en especial a mi madre Yaneth Lorena Moreno, a mis hermanas Laura y Catalina, a mi padre Fernando, a mis abuelas Margarita e Inés, especialmente a mi primo Daniel quien fue un apoyo en la toma del registro multimedia para este trabajo.

En segunda instancia, a mi director de tesis al Ingeniero Wilson Enrique Amaya, quien me sirvió de guía en todo este proceso investigativo, además de los aprendizajes que he tenido con él, no solo de temas técnicos, sino de vida.

A la Universidad Santo Tomás, seccional Tunja y a todos los docentes que fueron parte de mi proceso de formación como profesional y a quienes recordaré con mucho cariño y aprecio.

Contenido

	Pág.
1. Introducción.....	14
2. Objetivos.....	16
2.1. Objetivo general.....	16
2.2. Objetivo específico.....	16
3. Problema de Investigación	17
3.1. Delimitación de la problemática	17
3.2. Delimitación caso de estudio.....	20
4. Justificación.....	22
5. Levantamiento Topográfico	24
5.1. Recopilación y procesamiento por medio de sistemas RTK.....	25
5.2. Escenario con topografía tradicional.....	27
5.3. Escenario de fotogrametría con drones	39
5.4. Toma de datos con dron	40
6. Caracterización Física e Hidrología Base de Cuenca Urbana.....	42
6.1. Características de las redes viales	42
6.2. Coeficiente de escorrentía asociado al uso de suelo	46
6.3. Hidrograma Unitario	49
7. Modelación Bidimensional Mediante IBER 3.2	52
7.1. Software IBER	52
7.1.1. Ecuaciones de Saint Venant.....	53
7.1.2. <i>Calado</i>	55

7.1.3. Velocidad	56
7.2. Caso de estudio en el modelo IBER	56
7.2.1. Planimetría de la zona.....	57
7.2.2. Malla de cálculo en IBER.....	58
8. Resultados de la Investigación	60
8.1. Modelos Digitales de terreno (MDT) obtenidos con los dos escenarios.....	60
8.2. Modelación del escenario con topografía tradicional	65
8.3. Modelación del escenario con fotogrametría con drones.....	68
8.4. Resultado en velocidades en el intervalo de 2000 segundos de modelación para ambos escenarios	71
9. Análisis de Resultados	73
9.1. Comparativo de modelo bidimensional con la realidad	74
10. Conclusiones y Recomendaciones	77
11. Bibliografía	80
12. Anexos	83

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas de amarre mojón tipo IGAC.	26
Tabla 2. Coordenadas puntos de control obtenidas con RTK.....	26
Tabla 3. Errores presentados en la poligonal abierta (Método topografía tradicional).	36
Tabla 4. Errores presentados en las proyecciones meridiana y paralelas en la toma de datos topográficos.....	36
Tabla 5. Parámetros para establecer el grado de precisión de la poligonal abierta.....	36
Tabla 6. Proyecciones meridianas y paralelas puntos de control poligonal abierta.....	36
Tabla 7. Coeficientes para la compensación de errores poligonales por el método de Crandall..	36
Tabla 8. Parámetros de corrección por el método de ajuste de poligonales de Crandall.....	37
Tabla 9. Criterios de calidad y LIDAR pasivo en datos fotogramétricos.	42
Tabla 10. Características de la vía en caso de estudio.	45
Tabla 11. Valores de coeficientes de flujo superficial en diferentes usos del suelo urbano. Adaptado de Corporación Metropolitana de Barcelona (Gómez, 2007).	46
Tabla 12. Coeficientes de Rugosidad en el Software IBER (Datos extraídos del Software IBER).	48
Tabla 13. Iteración resultante al variar el tamaño de malla del modelo.	58

Lista de figuras

	Pág.
Ilustración 1. Localización de la ciudad de Tunja.	18
Ilustración 2. Delimitación de la cuenca urbana para llegar a la zona de estudio.	21
Ilustración 3. Poligonal Abierta.	28
Ilustración 4. Poligonal Cerrada.	29
Ilustración 5. Diagrama de trabajo para procedimientos topográficos.	30
Ilustración 6. Puntos de control distribuidos en la vía a analizar.	35
Ilustración 7. Plano topográfico de la zona.	35
Ilustración 8. Levantamiento fotogramétrico.	39
Ilustración 9. MDS obtenido con fotogrametría por dron.	41
Ilustración 10. MDT obtenido con fotogrametría por dron.	41
Ilustración 11. Ortofoto obtenido con fotogrametría por dron.	41
Ilustración 12. TIN obtenido con fotogrametría por dron.	42
Ilustración 13. Sección transversal típica de una calle urbana.	43
Ilustración 14. Dirección de flujo en cruce de calles.	44
Ilustración 15. Representación gráfica de una sección longitudinal en cruce de calles dependiendo su importancia.	45
Ilustración 16. Asignación de coeficientes de rugosidad en IBER.	48
Ilustración 17. Hidrograma triangular.	50
Ilustración 19. Hidrograma Unitario para modelación hidrodinámica en IBER para ambos escenarios.	51
Ilustración 18. Asignación de parámetros de contorno de entrada y salida.	51

Ilustración 20. Modelo hidrodinámico de un canal de descarga a través de IBER.	52
Ilustración 21. Aproximación del flujo.....	54
Ilustración 22. Resultados de calado por medio de software IBER.....	55
Ilustración 23. Resultados de velocidades por medio del software IBER.	56
Ilustración 24. Planimetría de la zona de estudio.	57
Ilustración 25. Superficies incluidas en el modelo IBER para ambos escenarios de simulación.	57
Ilustración 26. Tamaño de malla para las superficies establecidas en el modelo IBER.	59
Ilustración 27. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido por medio fotogrametría con dron.	60
Ilustración 28. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido por medio de topografía tradicional.	60
Ilustración 29. Zona 1 para MDT topografía tradicional.....	61
Ilustración 30. Zona 1 para MDT fotogrametría con dron.....	62
Ilustración 31. Zona 2 para MDT topografía tradicional.....	62
Ilustración 32. Zona 2 para MDT fotogrametría con dron.....	63
Ilustración 33. Zona 3 para MDT topografía tradicional.....	63
Ilustración 34. Zona 3 para MDT fotogrametría con dron.....	64
Ilustración 35. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 50 segundos.....	65
Ilustración 36. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 200 segundos.....	65
Ilustración 37. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 500 segundos.....	66
Ilustración 38. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 1000 segundos.....	66
Ilustración 39. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 2000 segundos.....	67
Ilustración 40. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 3000 segundos.....	67

Ilustración 41. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 4000 segundos.....	67
Ilustración 42. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 50 segundos.....	68
Ilustración 43. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 200 segundos.....	68
Ilustración 44. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 500 segundos.....	69
Ilustración 45. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 1000 segundos.....	69
Ilustración 46. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 2000 segundos.....	70
Ilustración 47. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 3000 segundos.....	70
Ilustración 48. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 4000 segundos.....	70
Ilustración 49. Resultado en velocidad para escenario de fotogrametría con dron.	71
Ilustración 50. Resultado en velocidad para escenario de topografía tradicional.	72
Ilustración 51. Zona de mayor similitud en el modelo.	75
Ilustración 52. Resultado de velocidades de modelación escenario de fotogrametría con dron...	76

Lista de apéndices (opcional)

	Pág.
Apéndice A. <i>Plano topográfico obtenido</i>	83
Apéndice B. <i>Resultado procesamiento Modelo IBER Escenario topografía tradicional.....</i>	98

Resumen

La urbanización ha sufrido un crecimiento de manera exponencial en los últimos años, esto ha permitido que se formen cada vez cuencas más impermeabilizadas debido al avance social y de infraestructura del hombre y para esto, lo primordial es la construcción de vías y calles urbanas. Es importante tener en cuenta que las vías urbanas no se diseñan normalmente para conducir el agua superficial en grandes cantidades, es por esto que, factores como: la topografía, la transformación lluvia – escorrentía, y su relación con las inundaciones, patologías en los pavimentos y la seguridad del peatón son criterios fuertemente evidenciados para usar las herramientas tecnológicas y modelos hidrodinámicos como IBER. Gracias al avance tecnológico y el uso de herramientas computacionales, podemos tomar decisiones que contribuyan a la adecuada planificación de los centros urbanos, inversiones en pavimentación de vías, el modelamiento hidrodinámico de flujo en superficie juega un papel vital para determinar las problemáticas asociadas a las velocidades y láminas del flujo, producto de la impermeabilización de cuencas naturales, produciendo problemas de contaminación y respuesta hidrológica rápida.

Palabras Clave: Hidrodinámica, IBER 3.2, inundación, drenaje, vía.

Abstract

Urbanization has experienced exponential growth in recent years, this has allowed the formation of increasingly impermeable basins due to man's social progress and infrastructure, and for this, the main thing is the construction of urban roads and streets. It is important to take into account that urban roads are not normally designed to carry surface water in large quantities, which is why factors such as: topography, rain-runoff transformation, and its relationship with flooding, pavement pathologies and pedestrian safety are strongly evidenced criteria for using technological tools and hydrodynamic models such as IBER. Thanks to technological advances and the use of computer tools, we can make decisions that contribute to the proper planning of urban centers, investments in road paving, hydrodynamic modeling of surface flow plays a vital role in determining the problems associated with speeds. and flow sheets, product of the waterproofing of natural basins, causing pollution problems and rapid hydrological response.

Keywords: Hydrodynamics, IBER 3.2, flooding, drainage, way.

1. Introducción

En la actualidad, existen diversas tecnologías y grandes avances de la ciencia que han permitido ser cada vez más robustas y rápidas, esto ha permitido en la ingeniería dar solución a problemas cada vez más complejos y con una eficiencia cada vez mayor.

La ingeniería en cierta manera, es conocer e interpretar el comportamiento de la naturaleza para así poder beneficiar al ser humano al servicio de este. Pero en el transcurso del tiempo, nos hemos dado cuenta que, para poder usar todo lo que la naturaleza nos brinda, debemos mantener el equilibrio propio de la misma. Así como la tecnología ayuda a tener herramientas más robustas, es necesario que, como seres humanos, le dediquemos mayor raciocinio al comportamiento de estos fenómenos para dar soluciones más sostenibles con el tiempo. Tener equipos cada vez más avanzados para la disminución de incertidumbre en la información, ha sido prioridad dar mejora continua a la toma de datos (Cevilla, 1993).

Especialmente en los datos información topográfica, la cual busca cada vez representar mejor el entorno en la que estamos y la que es base para muchos de los proyectos en ingeniería, ya que el suelo, es el lugar donde asentamos muchos de nuestros proyectos para el desarrollo de la sociedad. Además, de la elección de la precisión necesaria para cada uno de los proyectos de construcción, no todos tienen la misma prioridad de precisión y este es un indicador de costos, por lo tanto, es necesario tener claro cuales la importancia en los procesos y que incidencia tendrá el mismo (Wolf & Ghilani, 2016) .

Herramientas como IBER, para el área de aguas nos permiten mostrar con mayor facilidad el comportamiento del agua en las diversas estructuras que el ser humano ha construido, pero debemos ser conscientes de los datos que ingresamos y la calidad de los

mismos. Uno de los mayores parámetros de mayor influencia dentro de los modelos IBER, es justamente la calidad información topográfica (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018), en donde es de vital importancia contar con una información detallada del terreno del que se llevará a cabo el análisis, ya que determina por donde se dirige el flujo de agua y nos permite tomar decisiones importantes en futuros proyectos de infraestructura humana.

2. Objetivos

2.1. Objetivo general

Ejecutar un análisis comparativo de metodologías de captura de datos topográficos, aplicados en modelación hidrodinámica bidimensional de flujo en superficie de calle en el Barrio Gaitán, ciudad de Tunja – Boyacá

2.2. Objetivo específico

- Generar un modelo digital de terreno (MDT) a partir de la información recopilada mediante levantamiento topográfico tradicional y un levantamiento por fotogrametría aérea para el ensamble del modelamiento hidráulico.
- Definir los parámetros físicos base de una modelación hidrodinámica conceptual para la zona de estudio.
- Simular el comportamiento hidráulico conceptual a través del software IBER, identificando resultados de modelamiento como velocidad y lámina de agua en los dos escenarios topográficos.

3. Problema de Investigación

3.1. Delimitación de la problemática

En la actualidad, es conocida la tendencia de crecimiento y el traslado de población de zonas rurales hacia las zonas urbanas, esto ha ocasionado que actualmente el 50% de la población viva en zonas urbanas, incrementando en un ochenta (80%) su población en los últimos 20 años (Gómez, 2007). El crecimiento de la población exige que cada vez se logren mayores inversiones en infraestructura, para que estas sean del bienestar de la población, estas obras civiles tienen un condicionante importante, relacionado a garantizar un correcto funcionamiento de la red de drenaje pluvial (Dolz Ripollès & Gómez, 1994).

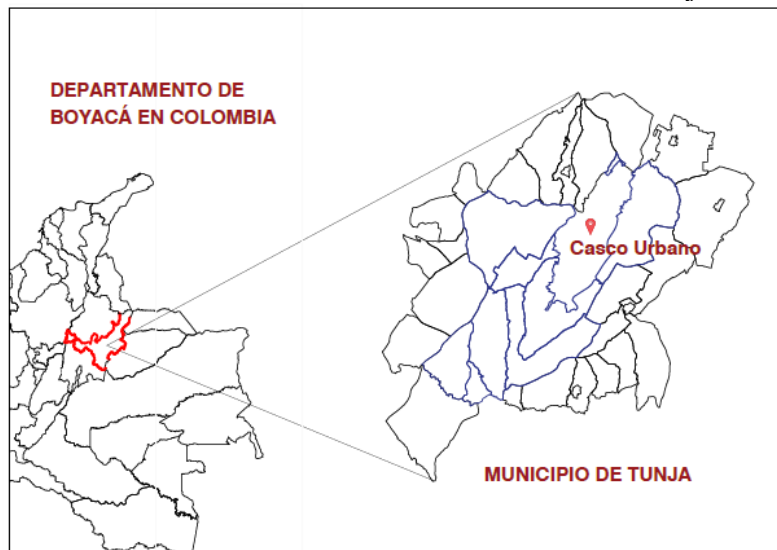
Colombia ocupó el quinto puesto en mayor expansión urbana en kilómetros urbanos en América Latina y en el año 2020 el crecimiento de las ciudades en este periodo es igual al tamaño de Bogotá. (Rodríguez Laura Sofia, 2022).

Este crecimiento exponencial en la población hace que las superficies sean cada vez más impermeables, de las cuales la adaptación de las actividades humanas en un territorio hace que se construyan viviendas, vías, hospitales, aeropuertos, y demás obras de infraestructura que disminuyen la capacidad de infiltración de los suelos, alterando en gran medida el curso natural del agua y al ciclo del agua en diferentes maneras (Amaya Tequia, 2019).

Además de la alteración en la capacidad de infiltración del suelo, permitiendo un aumento en la velocidad de flujo de agua hacia las cotas más bajas de una población, formando así, una dinámica que hace que el volumen de agua aumente en estos sectores, haciendo insuficiente la capacidad de drenajes, mayor caudal punta al diseñado y disminución en los tiempos de concentración, factores clave para el análisis de drenaje vial (Dolz Ripollès & Gómez, 1994). Al ser un país tropical sufre de grandes cambios en su clima a lo largo del tiempo, este caracterizado

por tener fuertes precipitaciones y grandes cambios de temperatura en épocas especialmente denominadas como “La Niña”, periodo de tiempo en las que se agravan las precipitaciones aumentando los episodios de inundaciones y deslizamientos en el país (SIAC-IDEAM, 2020). Para el caso de Tunja, capital de departamento de Boyacá., esta encuentra ubicada en la Provincia Centro del departamento y dentro de su división política cuenta con el área urbana y las veredas de Pirgua, Tras del Alto, La Esperanza, El Porvenir, Runta, Chorro Blanco, Barón Germania, Barón Guerrero, la Lajita, La Hoya y La Lajita. Según el Departamento Nacional de Planeación – en adelante DANE-, la población pasó de 149.000 habitantes en 2005 a 180.000 habitantes en 2021 este aumento corresponde a un 25% en tan solo 16 años. Además, según el Plan de Ordenamiento territorial (POT), como consecuencia de este crecimiento poblacional, se dio que el solo en el casco urbano de la ciudad ascendiera de 3200 hectáreas en el año 2000 hasta 5200 hectáreas en 2018, lo cual lleva a un 44% de aumento en área urbana en 18 años (Alcaldía de Tunja, 2020).

Ilustración 1. Localización de la ciudad de Tunja.



Nota: Adaptado de (IGAC, 2021).

Este crecimiento tan elevado, ha desencadenado que en los últimos años sea más frecuentes los eventos de inundación de la ciudad y se presenten mayores desbordamientos en los ríos La Vega y Jordán en periodos de altas precipitaciones (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018). Un caso claro y reciente se dio el 19 de marzo de 2021 en donde se presentaron varios episodios de inundación en diferentes partes de la ciudad, afectando zonas como la Avenida Norte y Parque Recreacional. (1A Noticias, 2021).

Fotografía # 1. Evento de inundación 19 de marzo de 2021.



Nota: Adaptado de (1A Noticias, 2021).

El proceso de urbanización de la ciudad, no solo afecta la capacidad de infiltración del suelo, sino que a su vez también afecta la vida útil de las vías, deteriorando considerablemente la rasante de las vías, estas en gran medida carecen de buenas estructuras de drenaje o simplemente no cuentan con periodos de mantenimiento en las mismas, dando así, una gran entrada a patologías presentes por el mal drenaje vial como lo son:

La piel de cocodrilo la cual se presenta por a una serie de fisuras interconectadas con formas (patrones) irregulares, estos patrones en drenaje vial afectan los materiales granulares ya que de cierta manera el agua se infiltra en las fisuras (Calderón Aldana et al., 2019).

Hundimientos los cuales corresponden a depresiones localizadas en el pavimento con respecto al nivel de la cota de rodadura, eso se debe en materia de drenaje vial a la afectación de materiales granulares (Ministerio de Transporte et al., 2006).

Afloramiento de finos, estos estando relacionados con la infiltración del agua junto con los finos de la capa de rodadura por medio de las grietas. Esta patología luego puede evolucionar a un estado en piel de cocodrilo, descascaramientos y baches (Calderón Aldana et al., 2019).

Surcos longitudinales, los cuales están muy relacionados en vías de altas pendiente, estas están relacionadas con la disminución de agregados de la mezcla asfáltica lo cual es dado por la erosión producida por el agua (Calderón Aldana et al., 2019).

Baches, estos son definidos como un deterioro total de la capa de rodadura (capa asfáltica) que deja expuestos los materiales granulares lo cual lleva a un aumento en el área y profundidad afectada debido a la carga ocasionada por el tránsito que circula (Ministerio de Transporte et al., 2006).

Afloramiento de agua, este se debe a la presencia de agua en la rasante de la vía en temporadas donde no hay lluvias (Calderón Aldana et al., 2019).

3.2. Delimitación caso de estudio

En un estudio realizado en el 2018 por la alcaldía de Tunja, bajo el decreto 1807 de 2014 de gestión del riesgo, se identificaron los diferentes antecedentes de inundación en la ciudad donde claramente las zonas con mayor afectación son las que se encuentran en los niveles con alturas más bajas de la ciudad.

Como parte de la delimitación del estudio se determinó una zona en donde se han reportado varios eventos de inundación periódicos, entre los sectores más afectados se encuentran: La

glorieta norte, avenida de la UPTC, la carrera 15 con calle 17 barrio el Topo, Barrio Galán, Barrio Tejares del norte, Barrio Asís, Barrio Fuente Higueras, Barrio Suarez y Barrio Patriotas. Teniendo las zonas con mayor susceptibilidad a inundación, se estableció una zona con notificaciones recientes de este fenómeno. Además, de tener en cuenta que los caudales que produce la inundación vienen de áreas relativamente altas, pendientes analizadas gracias a la información de cotas superficiales de los pozos de inspección entregados por la empresa que presta los servicios públicos de la ciudad – Veolia (Ver Ilustración 2).

Es por esto, que se ha definido la zona centro enfocada calle 32 entre carrera 16 y transversal 11 de la Ciudad de Tunja, como zona de estudio para la investigación ya que es una vía que tiene alta pendiente, por lo que podemos analizarla como canal drenante y del comportamiento del agua en la vía.

Ilustración 2. Delimitación de la cuenca urbana para llegar a la zona de estudio.



Nota: Datos proporcionados por Veolia.

4. Justificación

Ante las diversas situaciones de inundación o excedencia en la capacidad hidráulica del sistema de alcantarillado, carpetas asfálticas en mal estado y el descontento de hace más de 15 años de la ciudadanía Tunjana, que en muchas ocasiones se dan por mal drenaje vial, resulta interesante estudiar para un caso de estudio puntual el comportamiento del agua, para esto uno de los puntos cruciales en la evaluación del comportamiento del agua es la topografía, especialmente, cuando se trata de un flujo en superficie. Para esto, es fundamental realizar la comparación de métodos de captura de datos topográficos, ya que permite identificar cual método es más factible para compensar errores dependiendo de las elevaciones, el detalle en la malla del modelo, el procesamiento de datos (en tiempo y en capacidad de procesamiento del equipo), obtención de modelos digitales de terreno y la precisión necesaria del mismo.

En muchas ocasiones, la expansión urbana, la construcción de nuevas obras de infraestructura se analiza desde la perspectiva urbanística pero no, desde la perspectiva en términos hidrológicos. ¿Es realmente necesario impermeabilizar más zonas?, cuando tengo una vía en mal estado ¿Es realmente una solución reparar y/o cambiar la estructura del pavimento? Es por esto que es importante tener en cuenta que las vías actúan como canales drenantes de agua producto de precipitaciones, formando así: caudales y calados que pueden ser un riesgo de seguridad al tránsito del peatón y analizando puntos de vista diferentes que no se han realizado en la ciudad de Tunja desde el caso puntual de vía. ¿Es necesario realizar una gran inversión en la captura de datos para obtener un producto que pueda facilitar las decisiones que se toman frente a un entorno hidrológico? Existen diversos equipos para la captura de información, tales como equipos LIDAR, fotogrametría por drones, cartografía digital existente o

la ya conocida topografía tradicional, pero, realmente la decisión de que método logra una captura adecuada de datos, depende de varios factores, tanto de importancia, como de precisión necesaria, además, del nivel de detalle y error que se considere para la investigación.

Es por esto, que se toma una gran relevancia a la hora de verificar cual es el uso que se le va a entregar al producto final y, sobre todo, la importancia con la que se cuenta en el entorno.

5. Levantamiento Topográfico

En la actualidad, existen diferentes y muy novedosas herramientas que permite que la toma de datos topográficos se dé cada vez con mayor precisión, permitiendo que los estudios hidrodinámicos presenten mayor calidad en sus resultados y mucho más acercados a la realidad. La ingeniería en cierta manera cada vez busca analizar el comportamiento de los fenómenos naturales para así mismo proyectar de manera positiva a la infraestructura que se pretende instaurar. Todo esto con el fin de que los proyectos de construcción tengan mayor relevancia en el tiempo y así, dar mayor garantía a las obras y optimizar los recursos, dando una mejor calidad de vida de los habitantes en un entorno tanto rural como urbano.

El saber cómo es el comportamiento del terreno (Forma, componentes y proyección final), ha sido parte fundamental en el estudio de los fenómenos y de cómo controlar estos a beneficio del ser humano.

La topografía, o en alternativa, la geomática se ha definido de cierta manera como la ciencia, arte y tecnología para encontrar o determinar las posiciones relativas de puntos situados por encima y por debajo de la superficie de la tierra (Wolf & Ghilani, 2016). En sentido más general, se puede denotar como la disciplina que comprende los métodos para medir, recopilar información física (forma) acerca de la tierra y de nuestro ambiente.

Para la recopilación de la información se es necesario 3 métodos de toma de datos topográficos, que, según su necesidad, fin e importancia del estudio, es la precisión de la misma. Estos 3 métodos principales se determinan como:

5.1. Recopilación y procesamiento por medio de sistemas RTK

Durante la década de los años setenta (70), emergió el Sistema de Posicionamiento Global (GPS), este proveniente de un programa espacial, usa sistemas satelitales para navegación y guía global. Recientemente, otros países han desarrollado diferentes sistemas satelitales como lo son GLONASS, Galileo y Beidou, estos de ahora en adelante se formalizaron como receptores Global Navigation Satellite Systems (GNSS) y gracias a estos sistemas, podemos obtener información cartográfica y de sincronización precisos en cualquier parte de la tierra, con un alto nivel de confiabilidad y a un bajo costo (Calero et al., 2019).

Desde el punto de vista de información topográfica se puede denotar como un avance significativo, ya que para la obtención de la información se puede dar en cualquier momento del día, ya sea con un clima cálido o lluvioso y no es necesaria la intervisibilidad del operario para como lo requiere una estación topográfica (O. Del Río-Santan et al., 2019).

En la actualidad se han presentado varios avances tecnológicos en los procesos de medición, uno de ellos es la técnica “Real Time Kinematic” – de ahora en adelante RTK- o en español, Cinemático en Tiempo Real, el cual es un avance sobre los equipos GPS. La técnica RTK permite dar posicionamiento preciso en tiempo real, es decir, obtención de coordenadas en el instante de la medición, dando la posibilidad de enlace entre los receptores GPS y el procesamiento de datos en un mismo equipo (Nicolás, 2006).

En este trabajo investigativo, se establecieron 3 puntos de control con el sistema RTK, estos fueron trasladados del mojón IGAC PLA15001009 con coordenadas en Sistema de Referencia MAGNA SIRGAS Origen Bogotá (Ver Tabla 1) ubicado en la glorieta norte sobre la avenida oriental junto al llamado Monumento Club Leones.

El sistema de coordenadas MAGNA SIRGAS Origen Bogotá del cual se amarró el traslado de puntos tiene las siguientes características:

MAGNA Colombia Bogota

WKID: 3116 Autoridad: EPSG

Proyección: Transverse Mercator (UTM)

Falsa Este: 1000000.0

Falso Norte: 1000000.0

Coordenadas Meridiano central -74.0775079166667

Factor de Escala: 1.0

Latitud de Origen: 4.59620041666667

Unidades lineales: Metros (1.0)

Tabla 1. Coordenadas de amarre mojón tipo IGAC.

COORDENADAS MOJÓN TIPO IGAC			
NOMBRE	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACION (m)
<i>PLA15001009</i>	1104854,972	1079812,268	2696,437

Estos puntos se trasladaron teniendo en cuenta el mojón de amarre como base y los detalles se tomaron con el Rover del equipo dando así el resultado de los puntos de control necesarios para el siguiente paso de la toma de datos topográficos. Obteniendo así las siguientes coordenadas:

Tabla 2. Coordenadas puntos de control obtenidas con RTK.

COORDENADAS OBTENIDAS CON RTK			
NOMBRE	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACION (m)
<i>PTO1</i>	1105047,437	1079504,572	2695,496
<i>PTO2</i>	1105060,223	1079382,939	2707,589
<i>PTO3</i>	1105061,467	1079215,278	2731,251

Con el fin de materializar los puntos se fijaron puntillas en el concreto con el fin de ser usados en los dos métodos de toma de datos topográficos, además estos son esenciales ya que es la base para realizar la comparación entre un escenario de datos con topografía tradicional por medio de estación total y escenario por fotogrametría por medio de drones.

5.2. Escenario con topografía tradicional

Fotografía # 2. Levantamiento topográfico por medio de estación total de la zona de estudio.



Ahora bien, para la toma de datos en campo, se tienen diversos equipos que permiten la medición de ángulos y distancias, pero, el equipo por excelencia es la estación total. La estación total como se muestra en la Fotografía 2. es un instrumento que permite la toma de distancias tomadas electrónicamente, con la medición angular, este a su vez, permite el procesamiento y almacenamiento de datos disminuyendo errores en el ser humano (Wolf & Ghilani, 2016).

En campo, es indispensable formalizar un sistema geométrico de control o una serie de líneas consecutivas llamadas poligonales, cuyos extremos se hayan formalizado en campo, así como sus direcciones y longitudes medidos (Wolf & Ghilani, 2016).

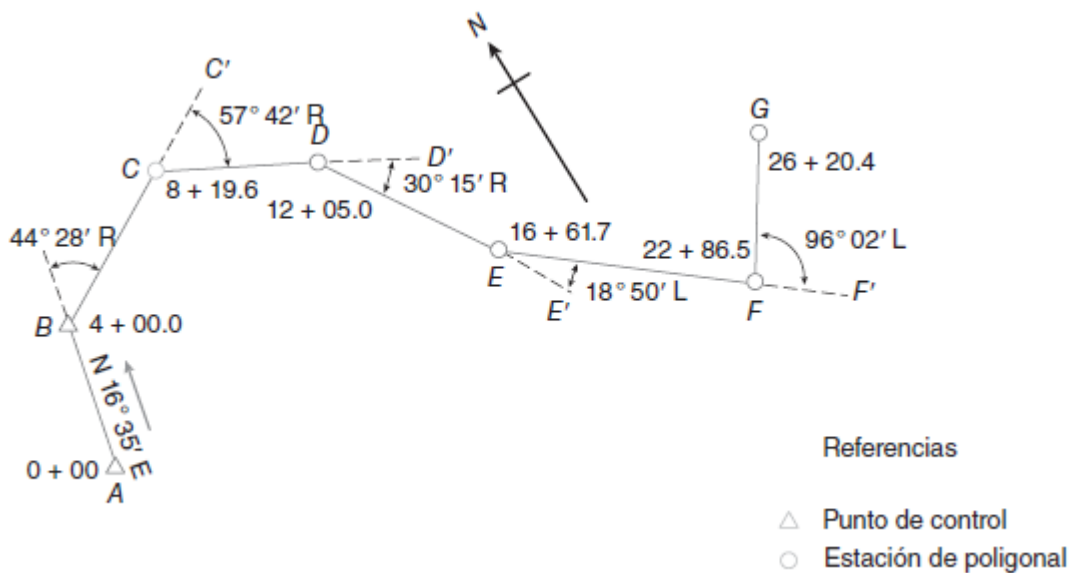
En los sistemas tradicionales mediante métodos terrestres, el trazo de una poligonal, es uno de los procedimientos fundamentales y más utilizados para determinar una ubicación relativa en el terreno (Wolf & Ghilani, 2016). Estos son manifestados a través de dos tipos básicos de poligonales:

1. Poligonal Abierta
2. Poligonal Cerrada

Poligonal Abierta

Una poligonal abierta (matemáticamente y geoméricamente abierta) consta de una serie de líneas unidas (vectores), pero estas no regresan al punto de origen y pueden cerrar en un punto con igual o mayor orden de precisión, dependiendo si hay control. Este tipo de poligonales abiertas contienen a su vez dos tipos de control: cuando esta tiene un control topográfico por medio de mojones materializados o cuando carecen del mismo. *Para este tipo de mediciones, es necesario considerar repetir ángulos con el fin de mejorar la precisión del mismo* (Wolf & Ghilani, 2016).

Ilustración 3. Poligonal Abierta.



Nota: Adaptado de (Wolf & Ghilani, 2016).

En cada vértice o puntos de ángulo, es necesaria la materialización de ya sea una estaca de madera con una puntilla en la parte superior de la misma, o para mayor fijación del suelo una estaca de acero, tubo o marca con cincel o pintura dependiendo de la superficie.

Este tipo de poligonales son muy usadas en traslado de puntos de control, vías, cauces lineales y ductos.

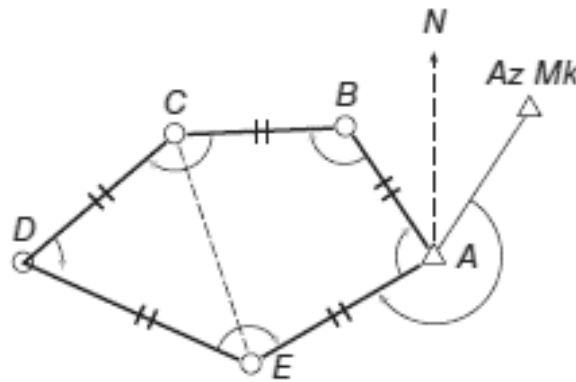
Poligonal Cerrada

La poligonal cerrada se caracteriza por ser una serie de líneas unidas, cuyo origen y regreso coinciden en un solo punto, formando así, un polígono cerrado (geométrica y matemáticamente cerrada) (Wolf & Ghilani, 2016). Estas líneas finalizan en un vértice cuya precisión es igual o mayor que la del punto de partida (Imagen .4).

Las mayores ventajas de este tipo de poligonales, son la facilidad en la cual se pueden hacer comprobaciones en campo de los ángulos y distancias medidas en campo, lo cual da mucha importancia en procesos donde se tenga que realizar revisión periódica.

Se emplean en mayor medida en levantamientos de control de deformaciones y construcción de nuevas estructuras, agrimensura de tierras y predios y levantamientos con altísimo nivel de precisión (Wolf & Ghilani, 2016).

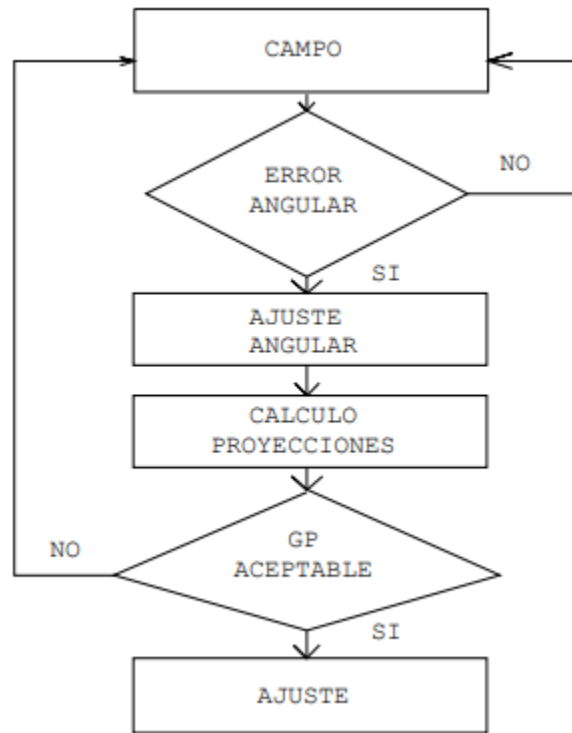
Ilustración 4. Poligonal Cerrada.



Nota: Adaptado de (Wolf & Ghilani, 2016).

Aunque existen diferentes procedimientos para obtener la información topográfica del lugar, existe un diagrama de trabajo que permite dar un flujo adecuado para la toma de la información (Ilustración 5).

Ilustración 5. Diagrama de trabajo para procedimientos topográficos.



Nota: Adaptado de (Gomez Gomez & Jimenez-Cleves, 2008).

Según el diagrama de trabajo para procedimientos topográficos después de la toma de la información, es necesario tener en cuenta los errores que en múltiples ocasiones suelen ser instrumentales, naturales y personales (Gomez Gomez & Jimenez-Cleves, 2008). Para esto, se encuentran diferentes métodos de ajuste en las poligonales de las cuales cada una tiene sus características propias y grado de exigencia dependiendo de la importancia y precisión del levantamiento.

El error es descrito como la diferencia entre el valor medido o calculado y su valor verdadero o teórico (Ecuación 1). Se ha dicho y escrito mucho acerca de este tema, se describe que aparece en 1809 cuando Carl Friedrich Gauss y en 1810 continuado por Pierre Simón Laplace (Sevilla, 1993).

$$E = V_m - V_v$$

Ecuación 1. Ecuación matemática del error.

Donde:

V_m: Valor medido.

V_v: Valor verdadero o valor más probable.

E: Error dado en la poligonal.

Ahora, como se trata de errores en dos dimensiones norte, este (X, Y) se puede considerar un Error en la serie, la cual es considerada cuando las observaciones son homogéneas, es decir, tomadas por el mismo observador, con el mismo equipo y en el mismo espacio. Para esta se considera la Ecuación 2 y así proceder al cálculo de la precisión del levantamiento. (Sevilla, 1993)

$$E_{poligonal} = \sqrt{E_{Nortes}^2 + E_{Estes}^2}$$

Ecuación 2. Ecuación error dado en la poligonal.

Al finalizar el análisis analítico de la poligonal es necesario saber el grado de precisión o error relativo de la poligonal, esta se expresa en la Ecuación 3, en donde con este valor podemos esperar que esperar del levantamiento y así, llevarlas a correcciones o compensación de errores (Sevilla, 1993).

$$Gp = \frac{1}{\frac{Perímetro}{E_{poligonal}}}$$

Ecuación 3. Grado de precisión.

Existen como se mencionaba anteriormente diversos métodos de compensación de errores, una de ellas, es el método Crandall, el cual es un método que permite compensar angularmente para disminuir el error dentro de la poligonal. Este método fue desarrollado por el profesor C.L. Crandall, basado en el método de mínimos cuadrados, donde como procedimiento calculamos las PM o Proyecciones Meridianas (Ecuación 4) y Proyecciones Paralelas (Ecuación 5). Luego con estos valores calculamos L2, D2 y LD (Ecuación 6,7 y 8 respectivamente), que, son valores que permiten calcular los pesos con respecto a la distancia horizontal de cada una de las proyecciones (Gomez Gomez & Jimenez-Cleves, 2008).

Proyecciones meridianas:

$$PM = DH \cos(Azimut)$$

Ecuación 4. Cálculo de Proyecciones meridianas.

Donde: **DH:** Distancia Horizontal, **PM:** Proyección Meridiana

Proyecciones paralelas:

$$PP = DH \sen(Azimut)$$

Ecuación 5. Cálculo Proyección Paralela.

Donde: **DH:** Distancia Horizontal, **PP:** Proyección Paralela.

Cálculo de peso del error para proyecciones meridianas

$$L^2 = \frac{\left(\frac{PM^2}{DH}\right)}{100}$$

Ecuación 6. Cálculo de peso del error para PM.

Cálculo de peso del error para proyecciones paralelas

$$D^2 = \frac{\left(\frac{PP^2}{DH}\right)}{100}$$

Ecuación 7. Cálculo de peso del error para PP.

Cálculo de peso del error para proyecciones paralelas y meridianas

$$LD = \frac{\left(\frac{PM \cdot PP}{DH}\right)}{100}$$

Ecuación 8. Cálculo de peso del error para PP y PM.

El método permite con estos valores calcular unos coeficientes comunes, llamados A y B, estos se obtendrán con la Ecuación 9 y 10 a partir de la sumatoria dada para los valores de L2, D2 y LD (Gómez Gómez & Jiménez-Cleves, 2008).

$$A = \frac{(\delta PP \cdot \sum LD) - (\delta PM \cdot \sum D^2)}{(\sum L^2 \cdot \sum D^2) - (\sum LD^2)}$$

Ecuación 9. Coeficiente A de compensación.

$$B = \frac{(\delta PM \cdot \sum LD) - (\delta PP \cdot \sum L^2)}{(\sum L^2 \cdot \sum D^2) - (\sum LD^2)}$$

Ecuación 10. Coeficiente B de compensación.

Donde: **δPP:** Error presentado en las proyecciones paralelas, **δPM:** Error presentado en las proyecciones meridianas.

Luego con estos coeficientes, podremos obtener las correcciones tanto meridianas como paralelas (Ecuaciones 11 y 12), para después obtener las coordenadas ajustadas (Ecuaciones 13 y 14) para formalizar las radiaciones y detalles necesarias para la generación del MDT:

$$CM = (L^2.A) + (LD.B)$$

Ecuación 11. Corrección proyección meridiana.

$$CP = (D^2.B) + (LD.A)$$

Ecuación 12. Corrección Proyección Paralela.

$$PPC = PP + CP$$

Ecuación 13. Proyección Paralela Corregida.

$$PMC = PM + CM$$

Ecuación 14. Proyección Meridiana Corregida.

En la actual investigación se dio uso de las coordenadas establecidas como coordenadas de puntos de control tomados con sistema RTK (Ver Tabla 2) y se hizo un levantamiento topográfico por medio de una poligonal abierta con control. La vía por la cual se realizó el levantamiento tiene altos niveles de pendiente y es por esto que el punto de inicio es diferente al punto de salida, método por el cual, se vio necesario para este caso de estudio.

En la Ilustración X, se muestra la posición de los 3 puntos de control y se realiza un detalle de abscisado por lo menos cada 5 metros de distancia, en donde se tomaron como detalle: bordes de las viviendas, borde superior e inferior de los dos andenes laterales, cunetas (en caso que esta se presentara), el eje de la vía, tapas de pozos de inspección en el centro del elemento, esquinas de

sumideros tanto laterales como transversales existentes, reductores de velocidad parabólicos presentes en la vía y zonas verdes.

Ilustración 6. Puntos de control distribuidos en la vía a analizar.



El levantamiento topográfico de la zona de estudio se realizó con una estación total SOUTH NTS 362 R10, obteniendo una nube de puntos con 556 puntos cada uno con coordenadas finales en este, norte, elevación y descripción en el sistema de referencia Nacional MAGNA SIRGAS – Origen Bogotá (Ver Anexo 1 e Ilustración 6).

Ilustración 7. Plano topográfico de la zona.



Ajuste realizado al levantamiento topográfico

El ajuste llevado a cabo en el levantamiento topográfico se realizó por el método de Crandall, para esto se calcularon los 3 parámetros iniciales para saber las condiciones finales y la calidad del levantamiento topográfico, estos son el *error de la poligonal*, el *perímetro lineal* y el *grado de precisión*. Obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 3. Errores presentados en la poligonal abierta (Método topografía tradicional).

	ERROR NORTE	ERROR ESTE	ERROR
<i>D3 - D2</i>	0,073	0,083	-0,146
<i>D2 - D1</i>	0,027	-0,025	0,067

Tabla 4. Errores presentados en las proyecciones meridiana y paralelas en la toma de datos topográficos.

	δPP	δPM
	0,1	0,058

Tabla 5. Parámetros para establecer el grado de precisión de la poligonal abierta.

<i>ERROR POLIGONAL</i>	0,0368
<i>PERÍMETRO LINEAL</i>	289,875
<i>GRADO DE PRECISIÓN</i>	7877

Tabla 6. Proyecciones meridianas y paralelas puntos de control poligonal abierta.

PUNTO	PROYECCIÓN PARALELA	PROYECCIÓN MERIDIANA	DH
D2	167,734	-1,161	167,738
D1	121,533	-12,844	122,210

Tabla 7. Coeficientes para la compensación de errores poligonales por el método de Crandall.

	COEFICIENTE L²	COEFICIENTE D²	COEFICIENTE LD	COMPENSACIÓ N MERIDIANA	COMPENSACIÓ N PARALELA
D2	0,000080	1,677300	-0,012	0,001	-0,077
D1	0,013499	1,208599	-0,128	-0,007	0,066
SUMA	0,013579139	2,885899173	-0,139338405		

Tabla 8. Parámetros de corrección por el método de ajuste de poligonales de Crandall.

COEFICIENTE A	-1,015625488
COEFICIENTE B	-0,052874756

Creación del modelo topográfico a partir de un Modelo Digital de Terreno (MDT)

Los Modelos Digitales de Terreno (MDT) o sus siglas en inglés Digital Terrain Model (DTM) son un tipo de modelos que han nacido y desarrollado bajo el amparo de nuevas tecnologías, estas son definidas según Doyle (1978), *como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de una característica del territorio*. Ahora bien, Felicísimo en 1994 completa y precisa aún más la definición: un MDT es una estructura o conjunto numérico de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua (Felicísimo, 1994).

Los modelos digitales de terreno hasta el momento son estáticos, en los que lo que se representan son valores inmutables, pero, la naturaleza digital permite utilizar estos modelos para simulaciones dinámicas y, por lo tanto, formalizar modelos de procesos (Jimenez-Cleves, 2003).

Para poder generar estos modelos digitales de terreno es importante tener en cuenta la información que se levanta de manera directa en el levantamiento topográfico, ya con las coordenadas ajustadas, se puede formalizar la Red de Triángulos Regulares o por su denominación de siglas en inglés TIN (Triangulated Irregular Network), este método, se forma a través de la construcción de triángulos a partir de un plano formado por tres puntos cercanos, no colineales, y se asemejan sobre el terreno formando un modelo que puede adaptarse a la superficie con diferente grado de detalle, dependiendo de la dificultad y variación de las pendientes en el terreno. Se trata de una estructura en la que el terreno queda representado por el conjunto de superficies planas que se ajustan a una estructura anterior de puntos (Felicísimo, 1994).

Software para la digitalización de la información:

Existen diferentes tipos de software para la generación y digitalización de Modelos Digitales de Terreno, el detalle y la precisión, dependen en gran medida de la capacidad tecnológica y el procesamiento que tenga el ordenador en el cual se va a procesar la información.

Para la digitalización de un mapa topográfico, es importante tener en cuenta 3 layers o capas con información diferente entre ellas:

c. Curvas de Nivel: Una curva de nivel es una línea que une puntos de igual elevación, estas se formulan a través de la interpolación de los puntos formulados entre los TIN, es importante formular que estas se establecen en intervalos equidistantes, formando Curvas Maestras (curvas prioritarias) y curvas intermedias (curvas de apoyo) (Wolf & Ghilani, 2016).

d. Puntos de detalle: Las radiaciones de detalle tomadas en la topografía, son aquellos puntos de detalle que permiten la formalización de las curvas de nivel y sobre todo la estructuración de la planimetría. Gracias a esto, podemos obtener longitudes y áreas de detalle.

e. Líneas auxiliares: Ya que estamos hablando de Modelos Digitales Vectorizados, estos tienen la función de dar apoyo a los puntos de detalle y planimetría del modelo digital, del mismo modo, las curvas de nivel intermedia, pueden denominarse como curvas intermedias debido a su apoyo en la obtención de información.

Para el caso de la investigación actual, se procesó la información en el Software CIVIL CAD 3D y se hizo identificación de características de la vía como lo son: el eje de vía, bordillos, paramento de la calle, cruces de calles, sumideros, puntos eléctricos materializados con postes de luz y cunetas de la vía. Como resultado se obtuvo un conjunto de datos o nube de puntos de 554 puntos en la nube de puntos con la cual se realizó el detalle en planos con escala en planta 1:125 y perfil 1:25. (Anexo 2. Plano topográfico de la zona de estudio con el método tradicional).

5.3. Escenario de fotogrametría con drones

La fotogrametría es uno de los métodos que ha venido avanzando con más fuerza en la obtención de datos para la representación del terreno, esta técnica tiene como objetivo determinar las dimensiones y posición de objetos a través de imágenes fotográficas obtenidas por Vehículos Aéreos no Tripulados (VANT). Esto se consigue a partir del traslape de dos o más fotografías (Zona de solape), por medio de las cuales, se pueden obtener modelos digitales de terreno que pueden ser usados para diseños de vías (Imagen 8), análisis hidrológicos, elaboración de mapas cartográficos, etc.

Ilustración 8. Levantamiento fotogramétrico.



Nota: Adaptado de (O. Del Río-Santan et al., 2019)

En fotogrametría se asume, que la proyección central es perfecta. Esto implica 3 factores dentro de la proyección (Calero et al., 2019):

- No existe desvío de los rayos de luz que atraviesan los lentes de la cámara del VANT.
- La imagen forma una proyección sobre una superficie completamente plana.
- La relación matemática entre el objetivo y su imagen se conoce con el nombre del principio de colinealidad.

Pese a que es una técnica que no es considerada nueva, ya que se estiman sus inicios a mediados del siglo diecinueve (XIX), sus aplicaciones en la captura de información cartográfica son relativamente recientes. Ya que si se trabaja con una sola fotografía se puede obtener información de la geometría del objeto (Dimensiones, rotación y forma). Básicamente, es una técnica de medición de coordenadas que utiliza instrumentos de percepción remota y fotografías junto con puntos de referencia debidamente marcados en el terreno.

Existen diferentes tipos de softwares para el procesamiento de la información fotogramétrica, de la cual se obtiene una ortofoto de alta resolución referenciada en un sistema de referencia internacional o nacional, la cual permite hacer mediciones y cálculos de volumen. Además, permite exportar esta información a programas asistidos a computador y de procesamiento geográfico, mallas 3D, líneas y curvas, y nubes georreferenciadas como lo es AutoCAD, Civil3D, ArcGIS, etc (Calero et al., 2019).

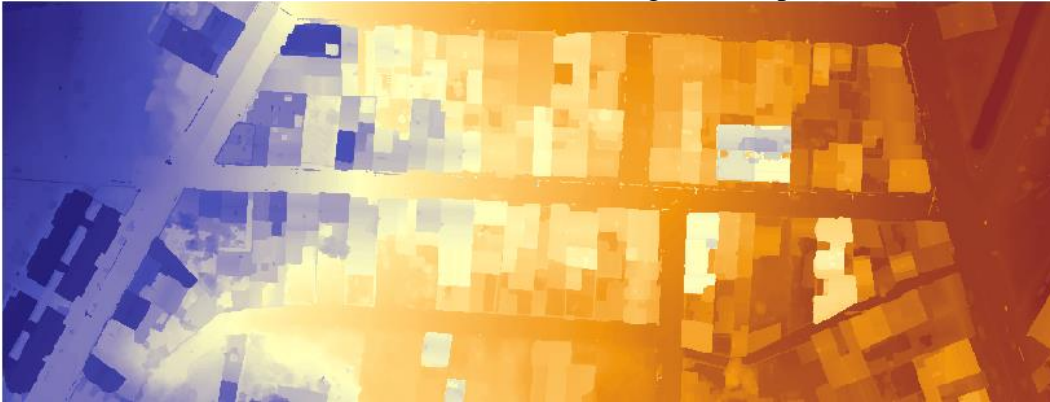
Para la investigación actual se recopiló la información por medio de fotogrametría aérea con drones, los cuales fueron amarrados al sistema de puntos tomados con sistema RTK como principal eje de referencia, estos además de la materialización con la que se contaba en campo, también se señalaron por medio de pintura blanca y roja para tener mejor visibilidad a la hora de realizar el procesamiento de datos en oficina.

5.4.Toma de datos con dron

Para la captura de datos por medio de dron, se realizaron 3 vuelos aéreos con el Dron DJI PHANTOM 4 PRO V2 sobre el área de interés con los siguientes parámetros: programa de captura PIX4D, altura del vuelo 50 m, GSD 5 CM/PX, Velocidad Rápida, Angulo cámara 90° Y 70° vertical, Sobre posición 80%, se tomaron 680 fotografías Aéreas de alta resolución de las cuales se pudieron obtener los puntos necesarios para desarrollar modelos como:

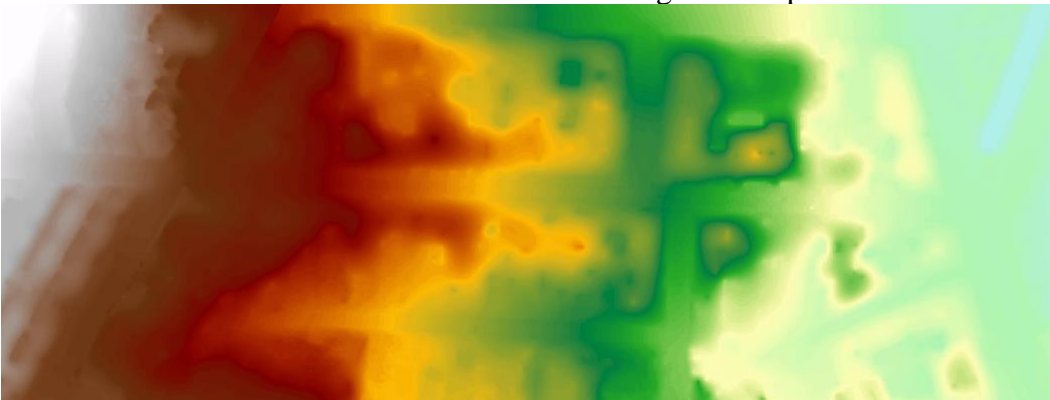
1. Modelo Digital de Superficie:

Ilustración 9. MDS obtenido con fotogrametría por dron.



2. Modelo digital de Terreno:

Ilustración 10. MDT obtenido con fotogrametría por dron.



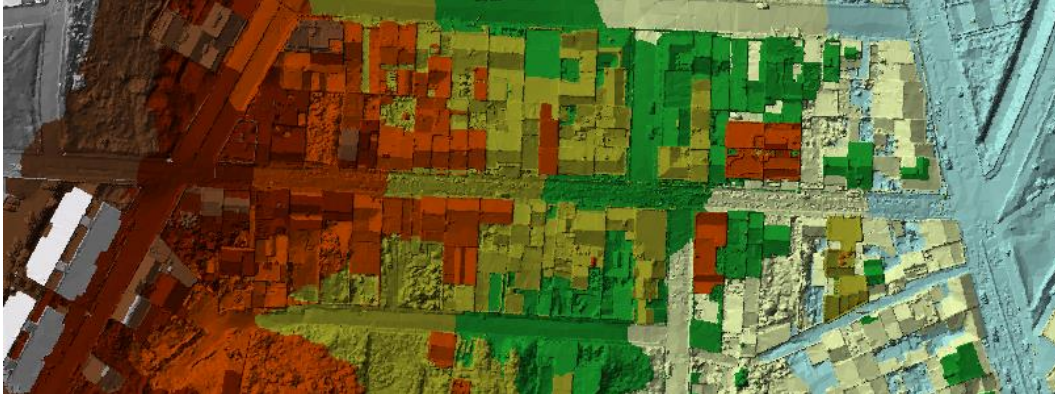
3. Ortofoto del sector a analizar:

Ilustración 11. Ortofoto obtenido con fotogrametría por dron.



4. TIN Fotogrametría aérea:

Ilustración 12. TIN obtenido con fotogrametría por dron.



Además, se estipularon los siguientes criterios de calidad y lidar pasivo en los resultados fotogramétricos:

Tabla 9. Criterios de calidad y LIDAR pasivo en datos fotogramétricos.

Imágenes procesadas	56404
GSD (Distancia de muestreo del suelo)	2,52 cm/px
Área de cobertura	0,131 km ²
Error medio cuadrático	0.011 m ajustados en los 3 puntos de control

6. Caracterización Física e Hidrología Base de Cuenca Urbana

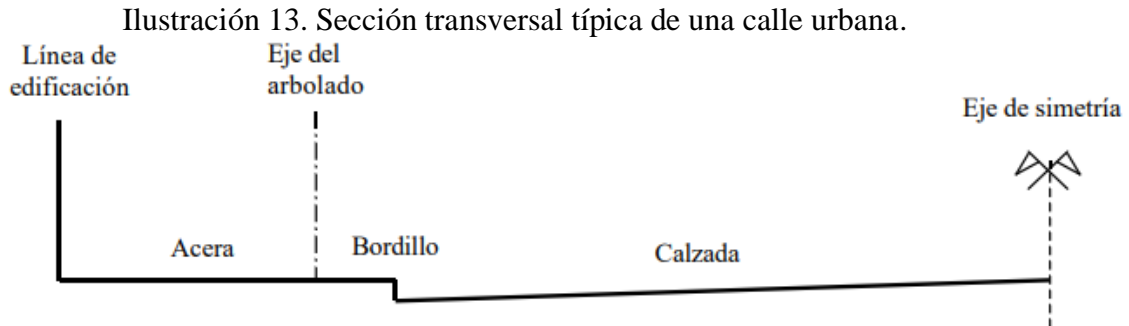
Para la entrada de valores necesarios para la simulación hidrodinámica, es necesario tener diversos parámetros que permiten obtener valores aterrizados a la realidad:

6.1. Características de las redes viales

Estas son definidas como un grupo de vías con longitudes variables, dentro de estas, desde el punto hidráulico se tiene en cuenta dos tipos de elementos: las calles y los cruces. Por ser elementos lineales, se pueden caracterizar a través de un eje y de cortes en sección transversal característica de toda la calle o un tramo en específico (Gómez, 2007).

Gracias a la topografía que se tiene previsto en puntos anteriores, podemos determinar dos secciones típicas: una transversal y otra longitudinal. En la sección transversal, encontramos

elementos como lo son la línea de edificación, la acera, el eje de arbolado, el bordillo o andén, la calzada y el eje de vía o de simetría, tales como encontramos en la (Ilustración 9) a continuación:



Nota: Adaptado de (Gómez, 2007).

Dentro de la información se determina como el ancho de calle a la distancia horizontal comprendida entre líneas o paramentos de edificación, aunque el ancho de calle activo es aquel que lleva la conducción del agua. Esto sucede cuando los bordillos de los andenes se encuentran a una altura considerable, permitiendo la conducción únicamente en la calzada.

Existen relaciones hidráulicas que permiten analizar el comportamiento del agua en una vía:

Relación de aspecto: Esta relación toma en cuenta dos aspectos, uno es el ancho de la calle (b) y otra es el calado o lámina de la escorrentía superficial (y) que se encuentra en el momento de precipitación, esta es denotada como b/y (Gómez, 2007).

Pendientes: La pendiente está dada como la relación entre el desnivel y la distancia horizontal entre dos puntos, esta, se puede establecer en valores, como valor angular o en relación m/m (Wolf & Ghilani, 2016). Para análisis viales hay que tener en cuenta dos pendientes presentadas: *las pendientes transversales* que se da en la calzada vial y se da desde el eje vial o simetría hasta completar la longitud de la calzada. Esta es usada para el tránsito de los vehículos y la conducción del agua hacia los bordes externos para evitar acumulación de agua en la carpeta asfáltica. Además de, *las pendientes longitudinales* la cual se refiere al eje de la calle.

Normalmente suele ser constante, pero está en la realidad y más urbana es principalmente definida por la topografía de la ciudad (Gómez, 2007).

Cruces de las calles: En vías, existe un punto que es común de dos o más calles, este punto es denominado cruces, estos se pueden delimitar en planta y en general conforman un ángulo de 90° entre ellos. Con el objetivo de estudiar el comportamiento hidráulico en esta superficie, es importante tener en cuenta que esta se analiza bidimensionalmente.

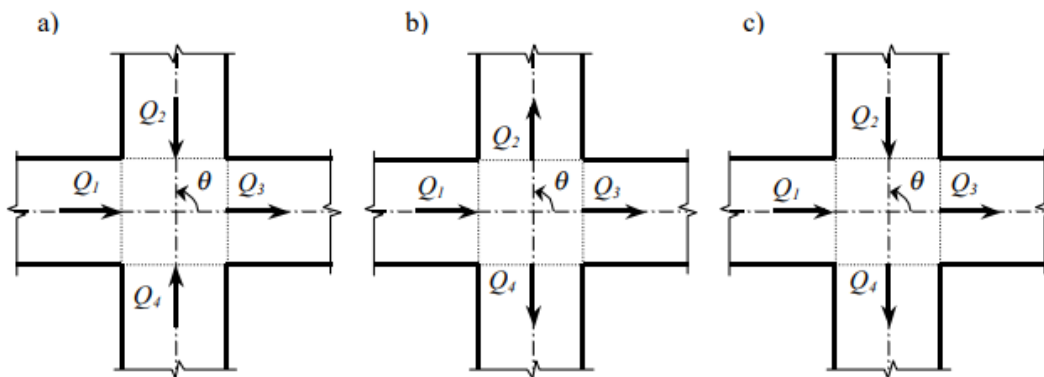
Existen clasificaciones en los cruces de calles, según la dirección de flujo en los tramos conectados y haciendo una semejanza a la clasificación de Yen en 1986, se pondrán clasificar como:

Flujos convergentes: El flujo entra por 3 calles y sale por una (Ilustración.10.a).

Flujos Divergentes: El flujo entra por una calle y sale por 3 calles (Ilustración.10. b).

Flujo convergente y divergente: El flujo entra por 2 calles adyacentes y salen por los otros 2 restantes (Ilustración.10. c).

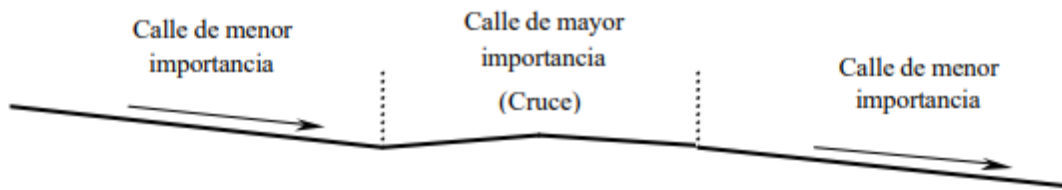
Ilustración 14. Dirección de flujo en cruce de calles.



Nota: Adaptado de (Gómez, 2007).

Las diferencias se dan entre la obtención de los caudales, ya que en el caso del cruce convergente se dan problemas únicamente en la distribución de caudales de salidas, en el caso del flujo divergente, presenta una gran dificultad ya que es importante tener en cuenta que hay 3 caudales conociendo un único caudal de entrada y la geometría de caudales adyacentes y para el flujo divergente y convergente cuenta con relaciones que ligan las potencias de flujos entrantes con los caudales de salida, además, de tener como característica: la importancia de flujo en las pendientes longitudinales como los mostrados en la ilustración 11, esto con el fin de simplificar en la aplicación del modelo numérico.

Ilustración 15. Representación gráfica de una sección longitudinal en cruce de calles dependiendo su importancia.



Nota: Adaptado de (Gómez, 2007)

Para el caso de estudio, se obtuvieron las características de la vía a analizar por medio de los datos topográficos tanto para el escenario de topografía tradicional, como para el escenario de fotogrametría por drones.

Tabla 10. Características de la vía en caso de estudio.

CARACTERÍSTICA VIAL	
COTA MÍNIMA	2694.943 m
COTA MÁXIMA	2737.007 m
DESNIVEL	42,07 m
LONTIGUD	327.650 m
PENDIENTE PROM.	12,84%

6.2. Coeficiente de escorrentía asociado al uso de suelo

El coeficiente de escorrentía se define como la relación entre el volumen de precipitación neta (o de escorrentía) y el de la precipitación total, este valor, varía entre 0 y 1. En el caso de zonas urbanas por su alto grado de impermeabilización de zonas, este valor suele tender a 1 y se suele mover en intervalos relativamente pequeños facilitando la elección de estos coeficientes (Gómez, 2007).

Existen diversos comportamientos que caracterizan este coeficiente de escorrentía estas son las pérdidas que actúan en diferentes vías (intersecciones, almacenamiento en patologías, infiltración, evapotranspiración, etc.) y estas dependiendo de las características de uso, tipo de suelo, topografía y hasta la propia tormenta. El uso del coeficiente de escorrentía para el método racional supone considerar un promedio de pérdidas totales durante un tiempo equivalente al de concentración (Gómez, 2007).

En la Tabla 11, se muestra el intervalo de coeficientes de escorrentía para diferentes usos urbanos del suelo.

Tabla 11. Valores de coeficientes de flujo superficial en diferentes usos del suelo urbano. Adaptado de Corporación Metropolitana de Barcelona (Gómez, 2007).

	Mínimo	Máximo
Zonas Comerciales		
<i>Área de centro ciudad</i>	0,70	0,95
<i>Área de suburbios</i>	0,50	0,70
Zonas Residenciales		
<i>Área unifamiliar</i>	0,30	0,50
<i>Bloques aislados</i>	0,40	0,60
<i>Bloques contiguos</i>	0,60	0,80

<i>Residencial suburbana</i>	0,25	0,40
<i>Apartamentos en áreas residenciales</i>	0,50	0,70
Zonas verdes y Especiales		
<i>Parques y cementerios</i>	0,10	0,25
<i>Terrenos de juego</i>	0,20	0,35
<i>Ferrocarriles</i>	0,20	0,40
<i>Áreas no edificadas terrenos permeables</i>	0,10	0,25
<i>Áreas no edificadas terrenos impermeables</i>	0,20	0,45
<i>Autopistas y portuarias</i>	0,60	0,90

Gracias a la ortofoto (Ilustración 16), podemos establecer estos valores en el caso de estudio con los valores que se establecen en el software IBER (Tabla 12. Coeficientes de Rugosidad en el Software IBER) ya que estos se encuentran previstos como compilado de varios referentes bibliográficos, esto nos permite empezar asignar valores hidrodinámicos al modelo con el fin de definir uno de los parámetros en la caracterización física e hidrológica de la zona de estudio.

Ilustración 16. Asignación de coeficientes de rugosidad en IBER.



Tabla 12. Coeficientes de Rugosidad en el Software IBER (Datos extraídos del Software IBER).

COEFICIENTES DE RUGOSIDAD EN IBER

USO DEL SUELO	N de MANNING
<i>RIO</i>	0.025
<i>SUELO DESNUDO</i>	0.023
<i>PRADERA</i>	0.05
<i>BOSQUE</i>	0.12
<i>ARENA / ARCILLA</i>	0.023
<i>ARBUSTOS</i>	0.05
<i>ÁRBOLES</i>	0.12
<i>VEGETACIÓN URBANA</i>	0.032
<i>VEGETACIÓN DISPERSA</i>	0.08
<i>VEGETACIÓN DENSA</i>	0.18
<i>CONCRETO</i>	0.018
<i>SIN CLASIFICAR</i>	0.032
<i>INFRAESTRUCTURA</i>	0.020
<i>EDIFICIOS AISLADOS</i>	0.0
<i>INDUSTRIAL</i>	0.1
<i>RESIDENCIAL</i>	0.15
<i>TEJIDO URBANO CONTINUO</i>	0.1
<i>TEJIDO URBANO DISCONTINUO</i>	0.09
<i>INFRAESTRUCTURAS DE TRANSPORTE Y USO INDUSTRIAL</i>	0.1
<i>CANTERAS</i>	0.04
<i>ÁREAS EN CONSTRUCCIÓN</i>	0.04
<i>ZONAS VERDES URBANAS</i>	0.09
<i>INSTALACIONES DEPORTIVAS</i>	0.09

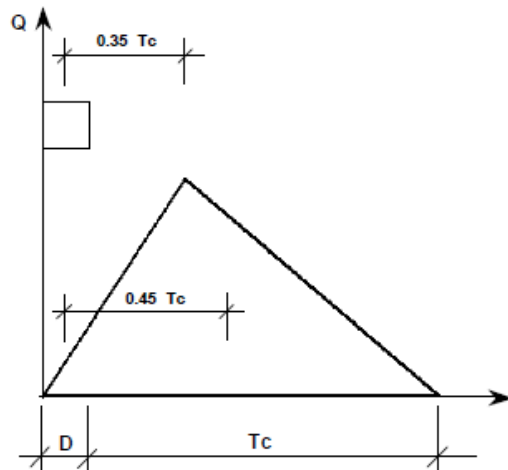
6.3.Hidrograma Unitario

Uno de los procesos vitales en la hidrología y uno de los métodos más comunes para la transformación de la lluvia – caudal es el Hidrograma Unitario, este método como sistema lineal y no variable en el tiempo. Este tiene algunas propiedades de las cuales podemos destacar lo siguiente:

- Linealidad en la respuesta: Si un hidrograma (H) es la respuesta en caudales a una lluvia (I1), para una lluvia doble, igual a (2I1), la respuesta en caudal de la cuenca es (2H).
- Aditividad de la respuesta: Es donde se asume además la variación temporal de la respuesta en caudal, que quiere decir que la respuesta de un suceso de lluvia (I1) más (I2), es igual a calcular primero la respuesta en caudal ante una lluvia (I1), después la respuesta en caudal ante una lluvia (I2), y sumar finalmente los dos hidrogramas de respuesta (Sanches, 2016).

Este permite básicamente, determinar la escorrentía directa que se producirá en la salida de la cuenca si sobre ella se produjera una precipitación neta de una duración determinada, un ejemplo 1 mm durante 1 hora (Sanches, 2016) (Ilustración 17).

Ilustración 17. Hidrograma triangular.



Nota: Adaptado de (Gómez, 2007)

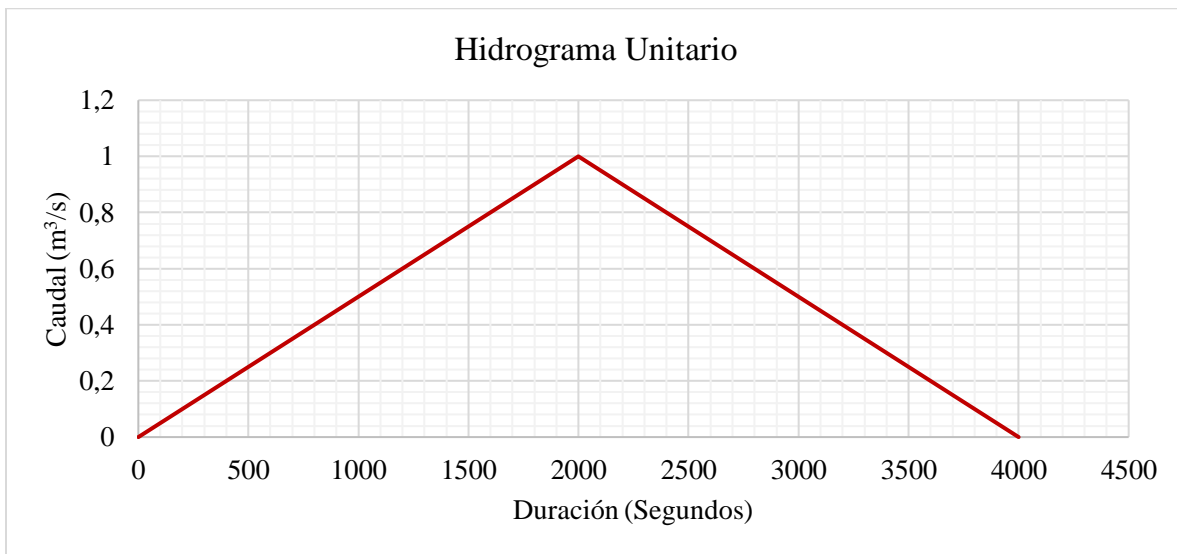
Durante la ejecución de la investigación, se ejecuta un escenario teórico de respuesta hidrológica, este parámetro se dio bajo un diagrama unitario con 1 metro cúbico sobre segundo como caudal y para 4000 segundos de duración en ambos escenarios de simulación. Esto con el fin de evaluar como la resolución del mallado, detalle de superficie influye en los resultados de modelamiento en parámetros como la velocidad y lámina de agua para la zona objeto de estudio, no se evalúa la magnitud del hidrograma, ni tampoco su representatividad (Ilustración 15), estimar caudales de aproximación hidrológica real de la cuenca, puede ser una etapa posterior al alcance del presente estudio, ya que se cuenta con el monitoreo de lluvias que se han precipitado en la zona, y generaron inundación y rebose del alcantarillado existente.

Así mismo, dentro del modelo se establecen parámetros de entrada y salida como condiciones de contorno necesarias para asignar el hidrograma unitario de entrada a la modelación. La condición de entrada se asignó en la cota más alta del caso de estudio, y como condiciones de salida, se establecieron los cruces de calle (Ver Ilustración 18).

Ilustración 18. Asignación de parámetros de contorno de entrada y salida.



Ilustración 19. Hidrograma Unitario para modelación hidrodinámica en IBER para ambos escenarios.



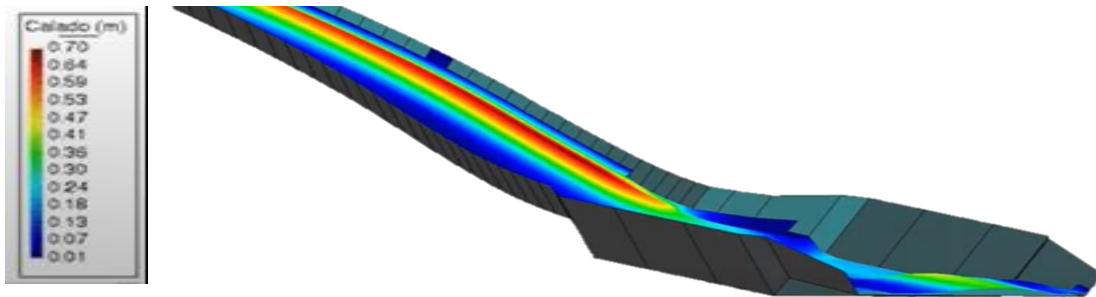
7. Modelación Bidimensional Mediante IBER 3.2

7.1. Software IBER

El software IBER es un modelo bidimensional, que incluye un apartado hidrodinámico para la simulación de flujos de ríos, canales y cauces naturales, permitiendo así el cálculo de inundaciones, además de cauces superficiales y la delimitación de zonas inundables (Imasgal.com, 2021).

Este software cuenta con varios módulos de cálculo: hidráulico, turbulencia, transporte de sedimentos, calidad del agua, rotura de balsa y un módulo de hábitat y procesos hidrológicos (Lantero Bringas, 2019).

Ilustración 20. Modelo hidrodinámico de un canal de descarga a través de IBER.



Nota: Adaptado de Adaptado de (Civil, 2020)

Otras de las aplicaciones del software Iber es el análisis de estructuras hidráulicas, análisis de direcciones de flujo y canales, cálculo de corrientes de marea en embocaduras y procesos de desgaste del suelo y sedimentación del lecho de un río (Bladé et al., 2014).

Las características de los esquemas numéricos utilizados en Iber son las siguientes (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018):

- Esquemas en volúmenes finitos, planteados en forma integral y conservativa.
- Capacidad de resolver flujo subcrítico, supercrítico y cambios de régimen.

- Mallas no-estructuradas formadas por elementos de tres o cuatro lados.
- Tratamiento de frentes seco-mojado mediante esquemas estables y conservativos (sin pérdidas de masa).

7.1.1. Ecuaciones de Saint Venant

Una vez resuelto el problema de transformación lluvia – escorrentía y aplicados los métodos para resolver y obtener los hidrogramas de caudal vs. Tiempo, es necesario como siguiente paso determinar el estudio de flujo en las calles (Gómez, 2007).

Para el análisis del movimiento de flujo no permanente en lámina libre, se pueden usar las ecuaciones desarrolladas por primera vez por A.J.C Barré de Saint – Venant en 1871(Bladé et al., 2014).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \frac{Q^2}{A} + g A \frac{\partial y}{\partial x} - gA(I_o - I_f) = 0$$

Ecuación 15. Ecuaciones iniciales de Saint Venant (Gómez, 2007).

Donde:

Q es caudal

A el área de Flujo

q un caudal lateral de entrada uniformemente distribuido

y es el calado

I_o la pendiente de la solera

I_f la pendiente de fricción o motriz

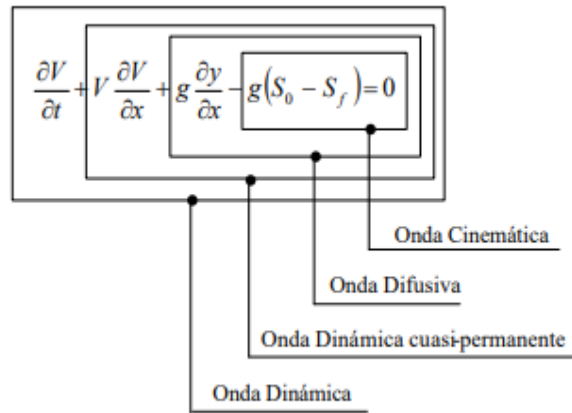
g la aceleración de gravedad

x el espacio

t el tiempo

Debido a conflictos en la resolución numérica en las ecuaciones de Saint Venant iniciales, se establecieron métodos más aproximados y habituales, en función a las variables de equilibrio dinámico que se desprecian en la Ilustración 23.

Ilustración 21. Aproximación del flujo.



Nota: Adaptado de Adaptado de (Gómez, 2007).

Iber usa ecuaciones de Saint Venant incluyendo los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento, estas son:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h U_x}{\partial x} + \frac{\partial h U_y}{\partial y} = M_s$$

$$\frac{\partial h U_x}{\partial t} + \frac{\partial h U_x^2}{\partial x} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial x} + \frac{\tau_{sx}}{\rho} - \frac{\tau_{bx}}{\rho} + \frac{\partial h \tau_{xx}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial y}$$

$$\frac{\partial h U_y}{\partial t} + \frac{\partial h U_x U_y}{\partial x} + \frac{\partial h U_y^2}{\partial y} = -gh \frac{\partial Z_s}{\partial y} + \frac{\tau_{sy}}{\rho} - \frac{\tau_{by}}{\rho} + \frac{\partial h \tau_{xy}^e}{\partial x} + \frac{\partial h \tau_{yy}^e}{\partial y}$$

Ecuación 16. Modelo hidrodinámico de Iber. Adaptado de (Bladé et al., 2014).

Donde:

h es calado

U_x y U_y son las velocidades horizontales promediadas en profundidad

g es la aceleración de la gravedad

Z_s es la elevación de la lámina libre

τ_s es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento

τ_b es la fricción debido al rozamiento del fondo

ρ es la densidad del agua

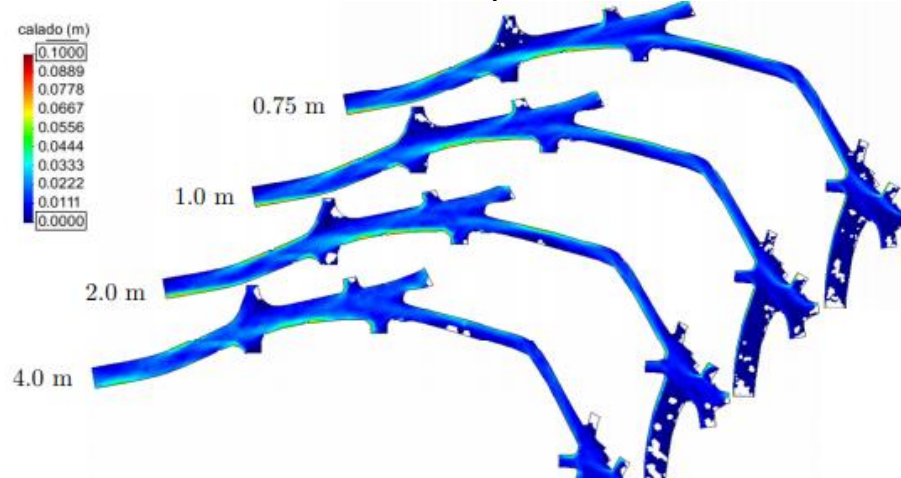
$\tau_{xx}^e, \tau_{xy}^e, \tau_{yy}^e$ son las tensiones tangenciales efectivas horizontales

M_s es un término fuente/sumidero de masa de agua, mediante el cual se pueden modelizar procesos de precipitación e infiltración

7.1.2. Calado

El software al ser combinado con resultados SIG, permite mostrar una perspectiva espacial más cómoda en su interfaz de resultados, estos son algunos resultados gráficos obtenidos en un caso de estudio en la ciudad de Medellín para diferentes tamaños de malla.

Ilustración 22. Resultados de calado por medio de software IBER.

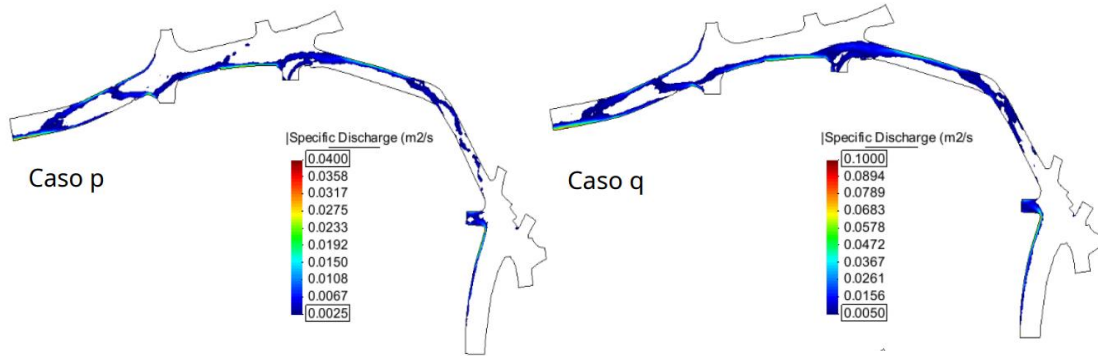


Nota: Adaptado de Adaptado de (Cárdenas-Quintero et al., 2019).

7.1.3. Velocidad

Al igual que con los resultados de velocidades, podemos observar algunos resultados para los cálculos de velocidad (Cárdenas-Quintero et al., 2019).

Ilustración 23. Resultados de velocidades por medio del software IBER.



Nota: Adaptado de (Cárdenas-Quintero et al., 2019)

7.2. Caso de estudio en el modelo IBER

Para llevar a cabo el análisis comparativo en el caso de estudio, fue necesario el desarrollo de dos modelos bidimensionales que permitieron dar comparación de resultado de modelamiento (velocidades y calados principalmente), todo con el fin de dar los resultados en la investigación.

El modelo IBER incluye las siguientes características:

7.2.1. Planimetría de la zona

Con los datos topográficos y la ortofoto generada en los dos escenarios de recopilación topográfica, podemos obtener la planimetría de la zona, esta es necesaria, para delimitar las diferentes propiedades necesarias para el modelo (Ilustración 24).

Ilustración 24. Planimetría de la zona de estudio.



La planimetría en IBER se dividió en 4 superficies: VIA, PARAMENTOS, ANDENES y ZONA VERDE. (Ilustración 25).

Ilustración 25. Superficies incluidas en el modelo IBER para ambos escenarios de simulación.



7.2.2. Malla de cálculo en IBER

Una de las etapas que conlleva más tiempo y esfuerzo en el desarrollo del modelo bidimensional en IBER es la estructuración de malla de cálculo (Bladé et al., 2014). Existen dos tipos de mallas en los modelos IBER, el modelo de malla estructurado y malla no estructurada, por lo cual ya que, se tiene información topográfica, se estableció un modelo de malla no estructurado sacando en gran medida provecho a la Red de Triángulos Regulares (TIN) que se obtiene en la información topográfica (Caro-Camargo & Bayona-Romero, 2018).

El tamaño de malla determina que tan refinada va a hacer la modelación y así mismo, será la complejidad en el procesamiento del modelo, para el caso, se realizó un proceso iterativo para una superficie dominante en el modelo el cual fue la superficie de VIA, en donde se obtuvieron los datos obtenidos en la Tabla 13, en donde se estableció un tamaño de malla para esta superficie de 0.3, tamaño en la cual podemos obtener un número considerable en el número de triángulos y de nodos para la modelación de la superficie.

Tabla 13. Iteración resultante al variar el tamaño de malla del modelo.

Capa	Tamaño de malla	# Lineales	# Triángulos	# Nodos
Vía	0,5	449	28460	15600
Vía	0,45	449	34570	18752
Vía	0,4	449	43855	23517
Vía	0,35	449	57331	57331
Vía	0,3	449	78042	78042
Vía	0,25	449	113224	58865

Al tener en cuenta esta información, se logró estimar los tamaños de malla para las demás superficies del modelo (Ilustración 26).

Ilustración 26. Tamaño de malla para las superficies establecidas en el modelo IBER.



8. Resultados de la Investigación

Una vez compilada toda la información en los dos modelos bidimensionales en IBER, se ingresaron los datos de elevación a cada modelo y teniendo que la planimetría, tamaño de malla, rugosidades y condiciones de entrada y salida son iguales en ambos escenarios, se pudieron obtener resultados tanto de calado como de velocidad en cada uno de los modelos con el fin de ser comparados y analizar la influencia en la captura de datos topográficos, en el comportamiento del flujo de vectores resultante.

Tiempo de procesamiento: Para el procesamiento de los modelos se tardó 16 horas en promedio para ambos escenarios.

8.1. Modelos Digitales de terreno (MDT) obtenidos con los dos escenarios

Ilustración 27. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido por medio fotogrametría con drone.

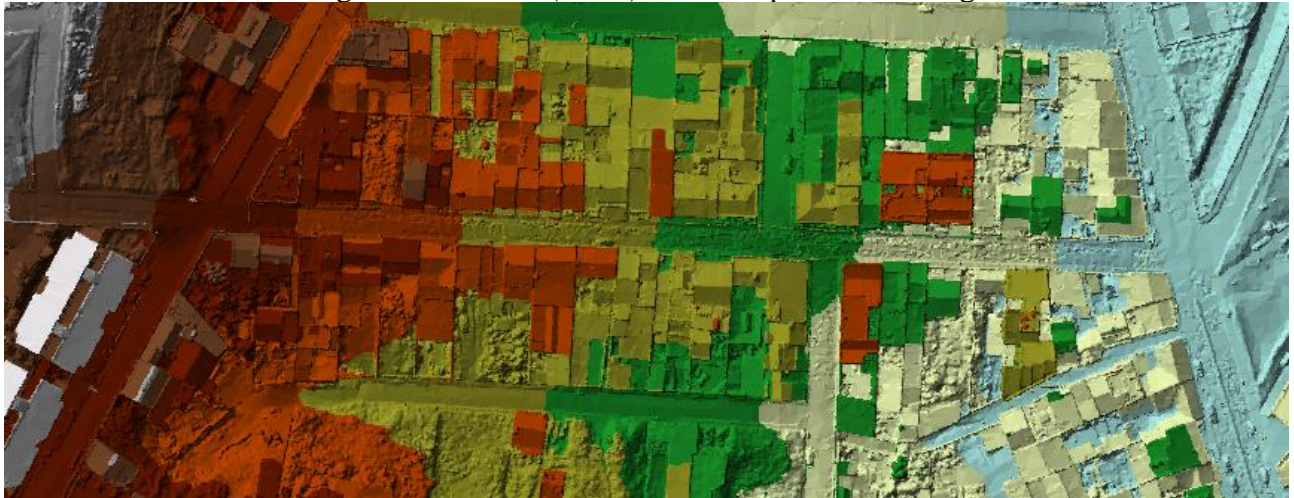
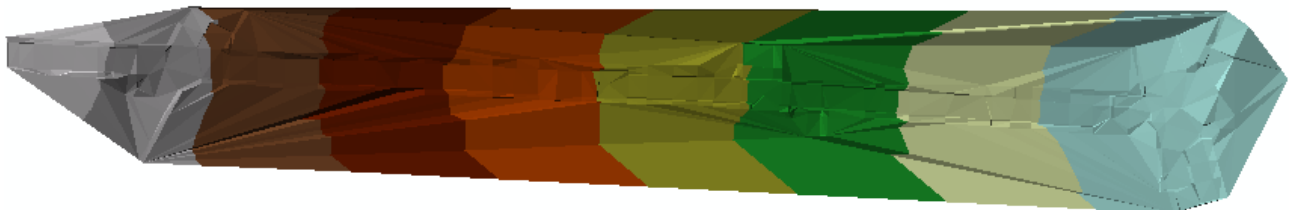


Ilustración 28. Modelo Digital de Terreno (MDT) obtenido por medio de topografía tradicional.



En la ilustración 27 observamos con gran detalle el resultado del escenario de fotogrametría con dron, en comparación con la ilustración 28 que pertenece al MDT establecido con topografía tradicional se observa menor detalle y menor área de cubrimiento.

En las ilustraciones 29 y 30 en donde se demuestra la zona 1 de análisis, podemos encontrar una irregularidad en la triangulación del modelo, debido a que el software une los puntos cercanos y no cuenta con mayor densidad de puntos para mostrar detalle, fallos que pueden alterar significativamente los resultados en velocidad y lámina de agua en la modelación. En comparación del TIN (Triangulated Irregular Network) presentado con el escenario con fotogrametría con drones que la densidad de puntos es muchísimo mayor y que permite evitar estas irregularidades en el modelo.

Ilustración 29. Zona 1 para MDT topografía tradicional.

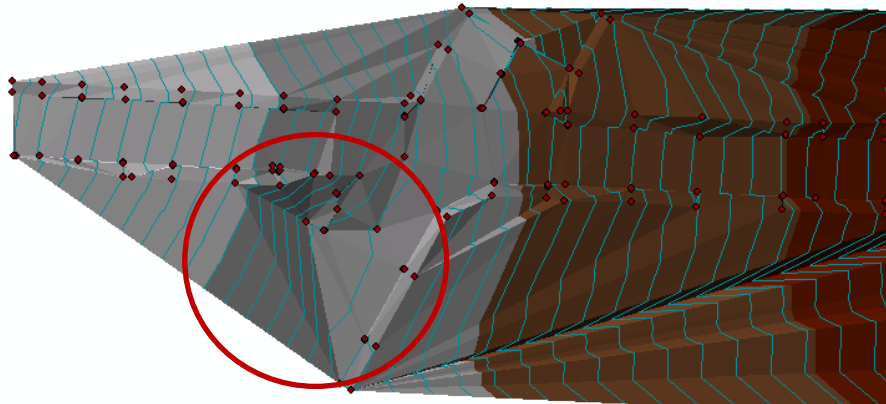
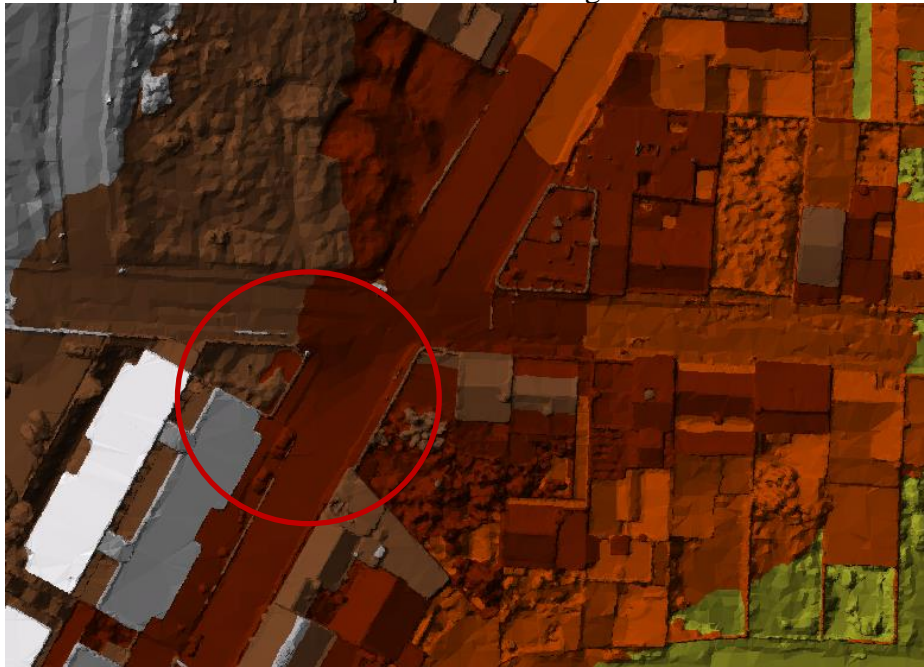


Ilustración 30. Zona 1 para MDT fotogrametría con dron.



Fallos que también se presentan en las zonas 2 y 3 que se mostrarán en las siguientes ilustraciones:

Ilustración 31. Zona 2 para MDT topografía tradicional.

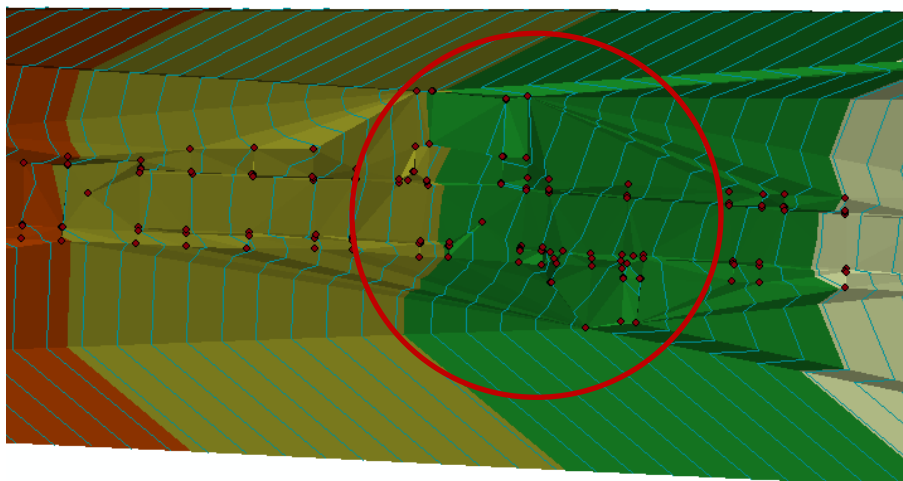


Ilustración 32. Zona 2 para MDT fotogrametría con dron.

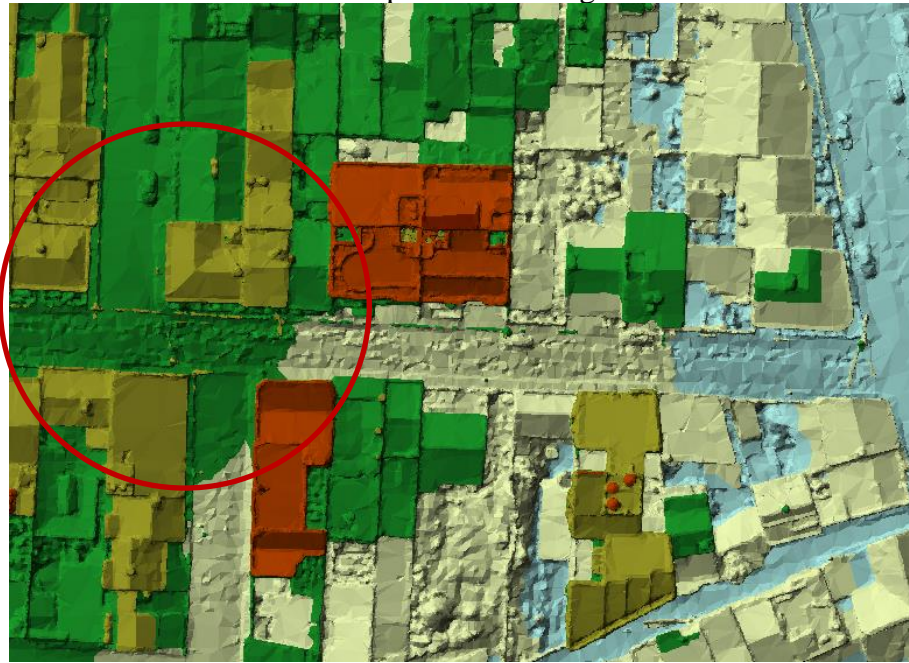


Ilustración 33. Zona 3 para MDT topografía tradicional.

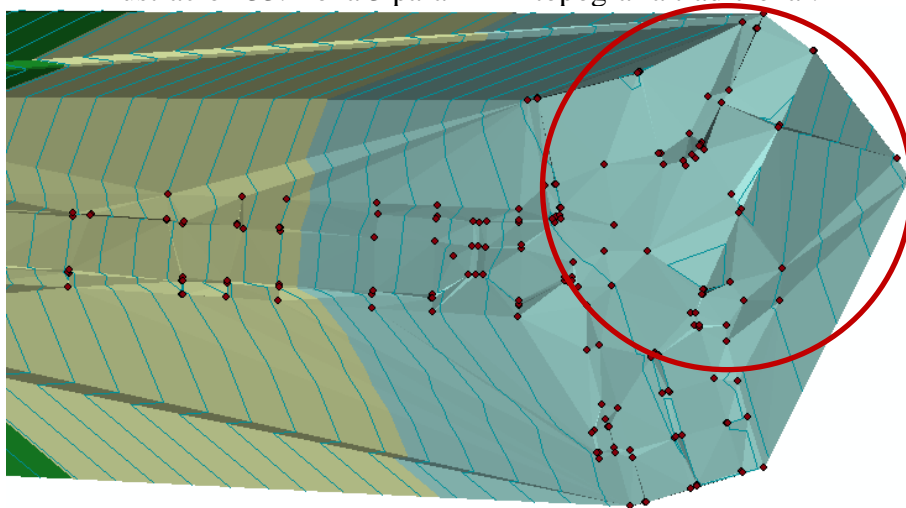
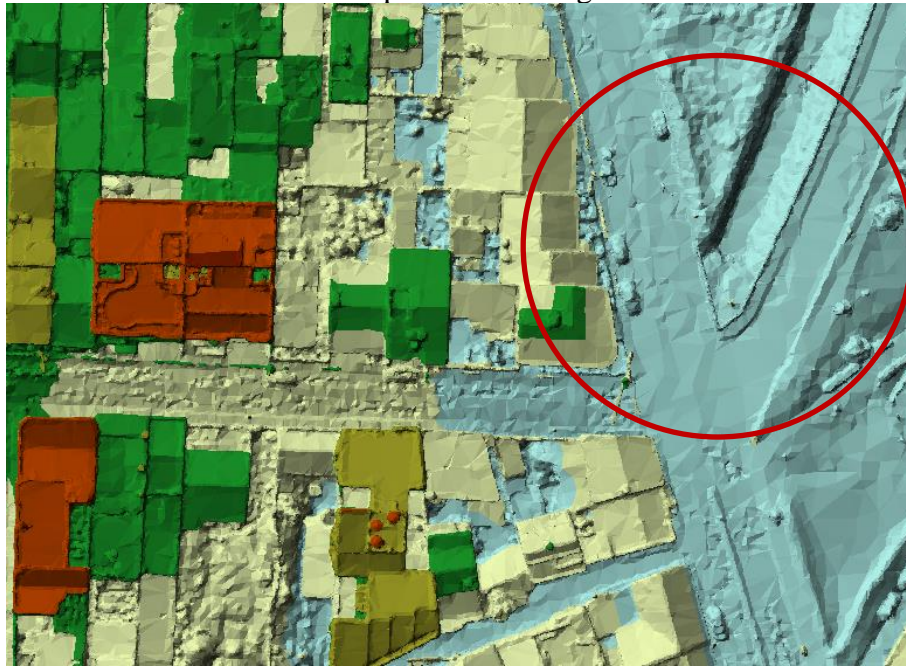


Ilustración 34. Zona 3 para MDT fotogrametría con dron.



En las Ilustraciones 31 hasta 34 se encuentran errores principalmente en las zonas externas del modelo, ya que, el software que en este caso se da en ArcGIS muestra como cercanos los puntos externos. Dando valores con altas pendientes, los cuales generan variaciones significativas en la modelación, es importante analizar esto a la hora de realizar la captura de datos externos y limpiar los bordes del modelo.

8.2. Modelación del escenario con topografía tradicional

Ilustración 35. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 50 segundos.



Es lógico que al inicio se presenten valores con baja magnitud en la lámina de agua del modelo, pero presenta una cota más pequeña en el borde derecho de la banca de la vía, haciendo que el fluido inicie en esta zona de la vía.

Ilustración 36. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 200 segundos.



En esta fase del modelo, encontramos que el fluido continua su comportamiento hacia el borde derecho de la vía (entendiendo que el sentido de la vía es de izquierda a derecha) y determina un

sentido de flujo en el cruce de calle, dando así, una primera noción del comportamiento del agua en esta zona del modelo.

Ilustración 37. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 500 segundos.



En esta fase del modelo, se inician a mostrar algunos fallos (Ver ilustración 31) en los datos debido a la interpolación de los datos, presenta un valor de lámina de agua de 36 cm.

Ilustración 38. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 1000 segundos.



A los 1000 segundos de la modelación, se identifica una segunda falla por interpolación en el borde (Ver Ilustración 33), pero además, se muestra la necesidad de implementar un sumidero, el cual se encuentra en la realidad.

Ilustración 39. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 2000 segundos.



Ilustración 40. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 3000 segundos.



Ilustración 41. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 4000 segundos.



En las duraciones 2000, 3000 y 4000 segundos mantiene un comportamiento similar al que se establece en los modelos con menor magnitud.

8.3. Modelación del escenario con fotogrametría con drones

Ilustración 42. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 50 segundos.



Ilustración 43. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 200 segundos.



A diferencia del modelo con topografía tradicional, en este modelo se inicia la bifurcación del flujo distribuyéndose adecuadamente por el bombeo.

Ilustración 44. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 500 segundos.



A diferencia del escenario por topografía convencional, esta fase del modelo muestra una distribución más uniforme del fluido, además, se disminuyen los fallos por interpolación externa de los datos.

Ilustración 45. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 1000 segundos.



En las duraciones 1000, 2000 y 3000 muestra claramente la concentración del fluido en puntos donde para el caso del punto bajo del modelo, se encuentra un sumidero y para el caso del punto alto del modelo, es necesario la construcción de un sumidero para disminuir la concentración de caudales en la parte baja del modelo.

Ilustración 46. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 2000 segundos.



Ilustración 47. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 3000 segundos.



Ilustración 48. Resultado del calado de flujo (agua) en la modelación en 4000 segundos.



Para la duración de 4000 segundos, muestra el comportamiento del agua para una lluvia con una intensidad moderada, resultado que tuvo verificación en campo (Ver fotografía # 3).

Fotografía # 3. Lluvia con intensidad moderada en parte baja de la zona de estudio.



8.4.Resultado en velocidades en el intervalo de 2000 segundos de modelación para ambos escenarios

Ilustración 49. Resultado en velocidad para escenario de fotogrametría con dron.

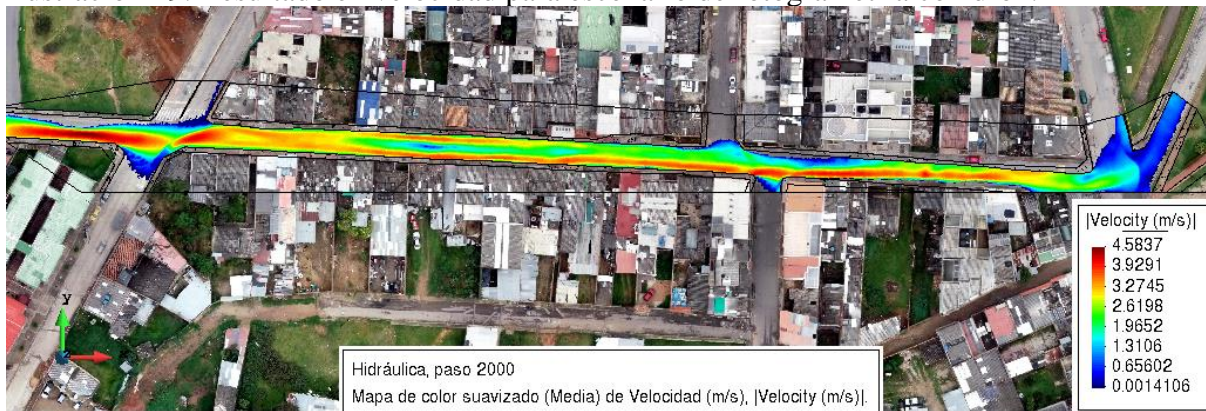


Ilustración 50. Resultado en velocidad para escenario de topografía tradicional.



Para ambos escenarios de modelación, las velocidades se concentran principalmente en la zona alta de la vía, debido a los altos niveles de pendientes presentes en esta zona, pero, estas se empiezan a disipar en los niveles más bajos de la vía.

Además, se puede mostrar que los mayores niveles de velocidad se presentan en los extremos de la vía, en las cunetas para el escenario por dron, mientras que el escenario por topografía tradicional, presenta niveles dispersos en la velocidad de flujo.

9. Análisis de Resultados

Comenzando con de los resultados obtenidos en los dos modelos hidrodinámicos en IBER correspondientes a valores en lámina (calado) de agua y velocidad de flujo con un hidrograma unitario de entrada que cuenta con 4.000 segundos de duración. El modelo simula que ocurriría en la duración de la lluvia y el comportamiento que tiene el mismo.

Con el comportamiento de la modelación se pueden deducir los siguientes puntos:

- En el tiempo de modelación de 200 segundos, se encuentra que los vectores tienen diferente comportamiento y ha llegado a una abscisa diferente, en el caso del escenario con topografía tradicional, los vectores ya se encontraban a los 100 metros del punto inicial pero el fluido se encontraba en una sola dirección. Mientras que, con el escenario de fotogrametría con dron, el fluido se bifurca presentando dirección hacia las dos cunetas de la vía, además que, el fluido se encontraba en diferente magnitud y en una distancia de 20 metros aproximadamente más avanzado que con el método anteriormente mencionado.
- Para el tiempo de modelación de 500 segundos, en el escenario de fotogrametría con dron, ya el fluido se encuentra al final del tramo vial al analizar iniciando a manifestarse puntos críticos en zonas donde actualmente se encuentran sumideros, mientras que, en el escenario de topografía tradicional, el fluido continuo en un solo lado de la vía y presenta un punto crítico en una de las intersecciones de la vía.
- Para los tiempos de 1000 segundos, 2000 segundos y 3000 segundos, en el escenario de topografía tradicional se siguen pronunciando las zonas de puntos críticos, dando especialmente en el cruce de calle en la parte inferior de la vía, el segundo cruce de calle

donde se encuentra el reductor parabólico y unos niveles altos en la lámina de agua donde conecta con la zona de vegetación en la parte baja de la vía.

- Teniendo en cuenta las zonas en las que presentaron problemas a la hora de generar la red de triángulos regulares, del escenario de topografía tradicional, se puede deducir que se pueden presentar valores con poca coherencia, debido a que todos los vectores están conectados y afectan los resultados de todo el modelo, tanto los resultados de lámina de agua, como la velocidad.
- Para evitar problemas en la interpolación, es necesario tomar información mucho más detallada, de la zona, además de lograr mayor abertura en el área de detalle, de la que habitualmente se toma.

9.1.Comparativo de modelo bidimensional con la realidad

Durante la investigación también se hizo un seguimiento a las lluvias que se observaron en el sector, con el fin de tener registro fotográfico del comportamiento del fluido en la vía y llegar a una comparación de la simulación hidrodinámica con la vida real, esto permite ver cuál de las dos simulaciones permiten mayor acercamiento a la realidad.

Con un zoom en el modelo del escenario de fotogrametría por dron y en los 2000 segundos de duración (Momento en que el hidrograma unitario presenta el caudal pico) podemos observar que el resultado en calado tiene similitudes a la realidad en el modelo, especialmente en el flujo presentado en el inicio de la zona verde (Zonas que se marcan en un recuadro rojo en la ilustración 51).

Ilustración 51. Zona de mayor similitud en el modelo.



Fotografía # 4. Inundación presente el 14 de marzo de 2022.



Fotografía # 5. Punto crítico establecido en el evento de precipitación del 14 de marzo de 2022.



Cabe resaltar dos puntos en los resultados, el primero se tiene gracias a la fotografía #3 en donde se observan sedimentos presentes en la zona en donde los resultados de velocidad en el escenario de fotogrametría con dron fueron valores considerables y donde se presentó un cambio de velocidades en el flujo, permitiendo así, que los sedimentos se asentaran en la zona. (Ilustración 52).

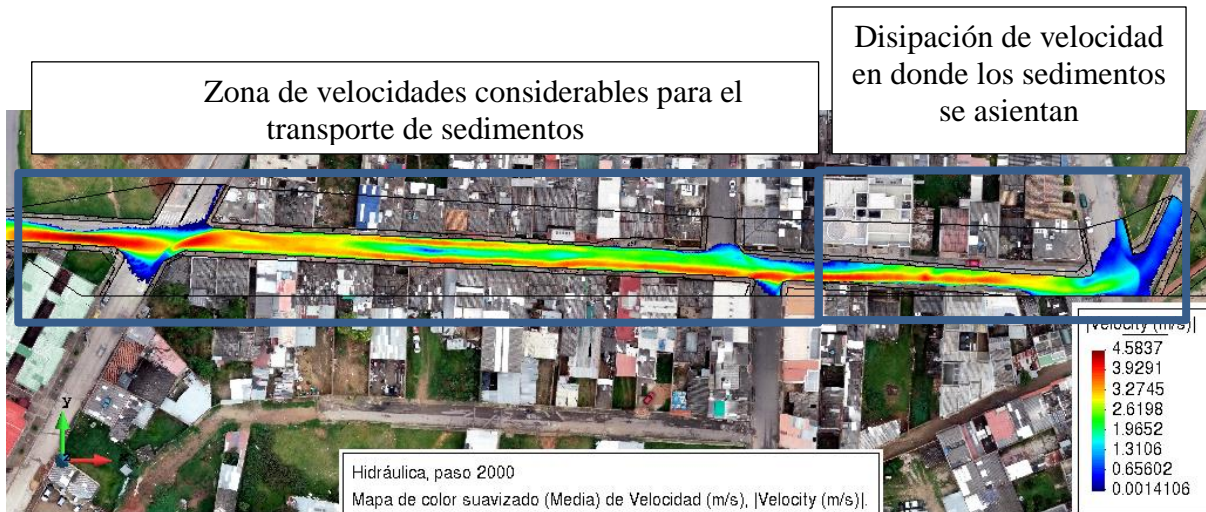


Ilustración 52. Resultado de velocidades de modelación escenario de fotogrametría con dron.

10. Conclusiones y Recomendaciones

- Se establece como mejor escenario para realizar una simulación hidrodinámica el escenario de fotogrametría con dron, ya que permite dar una mayor densidad de puntos en los datos recolectados ya que en el escenario de topografía tradicional se obtuvieron 545 puntos en la nube de puntos, mientras que, para el escenario de fotogrametría tradicional se obtuvieron 56406 puntos clave por imagen , permitiendo así, que el comportamiento hidrodinámico se asemeje al presentado en la realidad, teniendo un mayor nivel mayor confianza en los resultados obtenidos. Además, que, al ser un análisis de flujo en superficie, las vías por lo general presentan un alto deterioramiento en sus elementos, por lo que es necesario determinar un alto nivel de densidad en los puntos, densidad que con la topografía tradicional se tomaría como un trabajo con bastante dificultad en la toma de información.
- Se generó el modelo digital de terreno (MDT) en ambos escenarios, pero el escenario que mayor dificultad de procesamiento en los datos es el escenario por fotogrametría por drones, debido a la cantidad de datos que este suministro. Es por esto, que es necesario tener en cuenta el equipo de cómputo con el cual se va a realizar el procesamiento de datos para una modelación de este tipo.
- Para dar mayor detalle y dar la magnitud de los datos, es necesario tener en cuenta el caudal de entrada, tiempo de concentración (T_c) y área de la cuenca. Aunque, como lo denotado en este trabajo, es importante dar claridad la una buena información

topográfica, ya que esta permite dar las bases de la modelación y claramente tener en cuenta el presupuesto con el que se cuenta.

- El escenario que mayor detalle genera en los datos arrojados es el escenario por fotogrametría con dron, pero este presenta inconvenientes en zonas con alto tráfico vehicular, por lo cual genera algunas incertidumbres, inconvenientes que no genera la topografía tradicional ya que la misma toma los datos directamente en el punto de análisis.
- Para este tipo de modelos, es importante tener en cuenta el área que abarca la toma de datos para el caso de la topografía tradicional se abarcó un área de 10,198 hectáreas mientras que para el caso de fotogrametría con dron abarcó un área de 13,078 hectáreas, al limitarlo únicamente al de estudio, puede presentar algunos errores principalmente de interpolación en los extremos del MDT como lo ocurrido con la topografía tradicional, por lo consecuente, genera problemas en los resultados que arroja el modelo.
- El tamaño de malla permite al igual que la información del MDT dar detalle a la superficie del modelo, es importante saber determinar este criterio, ya que en casos en el que se excede el detalle puede generar gasto inapropiado de equipo de cómputo y en casos en el que el tamaño de malla sea muy grande, puede generar bajo detalle en el modelo y por lo tanto resultados con vacíos e incertidumbre, comparado con el de la realidad (Bladé et al., 2014).
- A nivel de parámetros en la modelación hidrodinámica en IBER, se tiene como gran influencia la información topográfica y el cómo se obtiene la misma, ya que en los resultados tanto de velocidad como de calado tuvieron valores diferentes en el mismo instante de tiempo del que se compararon. Para el caso de la velocidad de flujo en el

instante de tiempo de 2000 segundos tuvo una variación de 0,5 m/s de un escenario a otro lo cual puede presentar una variación en la peligrosidad de flujo en la zona y para el caso del calado de agua, la variación es centimétrica.

11. Bibliografía

- 1A Noticias. (2021). “Los @bomberostunja atendieron varias emergencias a causa de la fuerte lluvia que cayó en la ciudad de #Tunja esta tarde. <https://t.co/QMTVx4Hzgd>” / Twitter. <https://twitter.com/1anoticiass/status/1373019155193081858/photo/1>
- Alcaldía de Tunja. (2020). *Dimensión Socio Cultural - POT Tunja*.
- Amaya Tequia, W. E. (2019). *Modelización hidráulica de drenaje urbano. Aplicación sector Nororiental Distrito Santa Inés Tunja Boyacá*. 118.
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., Dolz, J., & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Metodos Numericos para Calculo y Diseno en Ingenieria*, 30(1), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.rimni.2012.07.004>
- Calderón Aldana, H. S., Cardozo Solórzano, C. D., García Jaramillo, B. A., hairzon.calderona@campusucc.edu.co, cesar.cardozos@campusucc.edu.co, & brahyan.garciaj@campusucc.edu.co. (2019). Evaluación de patologías en pavimentos flexibles del tramo comprendido entre el K6+000 hasta el K7+000 de la vía Ibagué - Rovira, departamento del Tolima. *Águila, A. W. (29 de Agosto de 2017). Subrasante para pavimentos. Obtenido de <https://es.scribd.com/document/365080614/Subrasante-Para-Pavimentos>. <https://repository.ucc.edu.co/handle/20.500.12494/14452>*
- Calero, J., Margarita Magaña Monge, N., & Oswaldo Soriano Melgar, A. (2019). *Análisis comparativo entre levantamientos topográficos con estación total como método directo y el uso de drones y GPS como métodos indirectos*.

- Cárdenas-Quintero, M., Carvajal-Serna, L. F., & Marbello-Pérez, R. (2019). Two-dimensional hydrodynamic analysis of surface drainage on an urban road. *DYNA (Colombia)*, 86(211), 102–111. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n211.79524>
- Caro-Camargo, C. A., & Bayona-Romero, J. A. (2018). Hydro-dynamic modeling for identification of flooding zones in the city of Tunja. *Revista Facultad de Ingeniería*, 2018(88), 40–54. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n88a05>
- Cevilla, M. J. (1993). *Teoría de errores*.
- Civil, B. (2020). (141) *Modelación de vertedero con canal de descarga - Parte 2 - IBER (Master Conference Series 2019) - YouTube*.
https://www.youtube.com/watch?v=xMnYZ4g5Pg4&ab_channel=BIMCIVIL
- Dolz Ripollès, J., & Gómez, M. (1994). Problemática del drenaje de aguas pluviales en zonas urbanas y del estudio hidráulico de las redes de colectores. *Ingeniería del agua*, 1(1), 55–66. <https://doi.org/10.4995/ia.1994.2631>
- Felicísimo, A. (1994). Modelos digitales del terreno: introducción y aplicaciones a las ciencias ambientales. *Oviedo: Universidad de Oviedo*, 118. <http://www.etsimo.uniovi.es/~feli>
- Gomez Gomez, G., & Jimenez-Cleves, G. (2008). Introducción a la topografía analítica. *Universidad del Quindío*, 6, 1–233.
- Gómez, M. (2007). Hidrología urbana. *Colección CBI*, 235.
- IGAC. (2021). *Datos Abiertos Catastro | GEOPORTAL*.
<https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-catastro>
- Jimenez-Cleves, G. (2003). *Modelación de superficies terrestres urbanas aplicada a la región del eje cafetero*.

Lantero Bringas, B. (2019, mayo 31). *¿Qué es IBER y para qué sirve?*

<https://www.cursosgis.com/que-aprenderas-en-nuestro-curso-de-modelizacion-hidraulica-bidimensional-con-iber-y-arcgis/>

Ministerio de Transporte, C., Instituto Nacional de Vías, C., & Universidad Nacional, C. (2006).

Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. *Manual para la inspeccion visual de pavimentos flexibles*, 212(3456778), 70. http://www.invias.gov.co/index.php/historico-cartelera-virtual/doc_download/974-manual-para-la-inspeccion-visual-de-pavimentos-flexibles

Nicolás, F. (2006). *Análisis de la técnica RTK*.

O. Del Río-Santan, T. Espinoza-Fraire, A. Sáenz-Esqueda, & Córtes-Martínez. (2019).

Levantamientos Topográficos con Drones.

<http://revistacid.itslerdo.edu.mx/coninci2019/CID012.pdf>

Rodríguez Laura Sofia. (2022, mayo 13). *El crecimiento urbano en las últimas tres décadas en Colombia y sus nuevas perspectivas - Instituto de Estudios Urbanos*.

<http://ieu.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/el-crecimiento-urbano-en-las-ultimas-tres-decadas-en-colombia-y-sus-nuevas-perspectivas>

Sevilla, M. J. (1993). Teoría de errores de observación. *Física de la tierra*, 5, 133–166.

SIAC-IDEAM. (2020). *Fenomeno Niño y Niña - IDEAM*. <http://www.siac.gov.co/ninoynina>

Wolf, P. R., & Ghilani, C. D. (2016). *Topografía* (14a edición). Alfaomega Grupo Editor.

12. Anexos

Apéndice A. Coordenadas de nube de puntos obtenidas con topografía tradicional

COORDENADAS NUBE DE PUNTOS				
PUNTO	NORTE (m)	ESTE (m)	ELEVACION (m)	DESCRIP
3001	1079181,897	1105063,514	2736,888	VIA
3002	1079181,677	1105063,507	2737,055	V:B
3003	1079181,559	1105070,23	2737,158	V:B
3004	1079181,559	1105070,278	2737,166	V:A
3005	1079181,556	1105070,275	2737,292	V:A
3006	1079181,457	1105071,44	2737,346	PARA
3007	1079184,733	1105071,364	2736,802	VIA
3008	1079184,694	1105069,832	2736,607	VIA
3009	1079184,473	1105063,493	2736,417	VIA
3010	1079188,496	1105063,072	2735,864	V:A
3011	1079188,464	1105063,146	2735,734	VIA
3012	1079194,247	1105061,294	2734,87	PARA
3013	1079188,892	1105069,663	2735,934	VIA
3014	1079188,904	1105069,726	2736,058	V:A
3015	1079188,913	1105071,062	2736,088	PARA
3016	1079193,436	1105070,817	2735,269	TN
3017	1079193,604	1105069,554	2735,272	V:A
3018	1079193,597	1105069,481	2735,111	VIA
3019	1079193,247	1105062,887	2734,877	VIA
3020	1079193,264	1105062,789	2735,009	V:A
3021	1079193,29	1105061,351	2735	PARA
3022	1079198,41	1105061,009	2734,102	PARA
3023	1079198,561	1105062,544	2734,139	V:A
3024	1079198,557	1105062,575	2733,959	VIA
3025	1079199,588	1105069,144	2734,107	VIA
3026	1079199,574	1105069,183	2734,244	V:A
3027	1079199,508	1105070,54	2734,242	PARA
3028	1079205,72	1105070,176	2733,193	PARA
3029	1079205,528	1105068,823	2733,214	V:A
3030	1079205,529	1105068,775	2733,072	VIA
3031	1079205,352	1105062,174	2732,827	VIA
3032	1079205,337	1105062,114	2732,992	V:A
3033	1079205,218	1105060,648	2732,923	PA
3034	1079209,936	1105060,381	2732,134	PA

3035	1079209,852	1105061,857	2732,22	V:A
3036	1079209,819	1105061,919	2732,11	VIA
3037	1079210,373	1105068,499	2732,236	VIA
3038	1079210,373	1105068,545	2732,396	V:A
3039	1079210,349	1105069,843	2732,442	PA
3040	1079216,098	1105069,447	2731,455	PA
3041	1079215,966	1105068,161	2731,403	V:A
3042	1079215,902	1105068,123	2731,268	VIA
3043	1079223,168	1105069,108	2729,982	PA
3044	1079223,191	1105067,769	2730,02	V:A
3045	1079223,172	1105067,699	2729,894	VIA
3046	1079224,9	1105069,416	2729,433	VIA
3047	1079224,855	1105069,428	2729,567	V:A
3048	1079223,857	1105069,85	2729,611	PA
3049	1079227,859	1105074,724	2728,56	VIA
3050	1079227,79	1105074,724	2728,697	V:A
3051	1079226,705	1105075,284	2728,728	PARA
3052	1079229,23	1105079,266	2728,139	PARA
3053	1079230,015	1105078,634	2728,074	V:A
3054	1079230,038	1105078,586	2727,959	VIA
3055	1079235,285	1105075,663	2727,88	VIA
3056	1079235,369	1105075,621	2728,086	V:A
3057	1079235,438	1105075,586	2728,086	V:A
3058	1079235,437	1105075,483	2727,107	VIA
3059	1079233,568	1105072,1	2727,64	VIA
3060	1079233,53	1105072,151	2728,313	V:A
3061	1079233,441	1105072,22	2728,305	V:A
3062	1079233,381	1105072,209	2728,198	VIA
3063	1079231,244	1105068,524	2728,363	VIA
3064	1079231,519	1105068,534	2728,307	VIA
3065	1079238,154	1105068,098	2727,163	VIA
3066	1079238,226	1105068,108	2727,329	V:A
3067	1079239,758	1105068,283	2727,225	PARA
3068	1079241,75	1105072,226	2726,861	PARA
3069	1079240,762	1105072,754	2726,873	V:A
3070	1079240,703	1105072,737	2726,715	VIA
3071	1079244,025	1105078,683	2725,821	VIA
3072	1079244,043	1105078,636	2726,001	V:A
3073	1079244,994	1105078,013	2726,037	PARA

3074	1079240,537	1105066,757	2726,724	VIA
3075	1079240,519	1105066,792	2726,899	V:A
3076	1079240,524	1105068,251	2726,93	PARA
3077	1079240,186	1105060,47	2726,759	VIA
3078	1079240,158	1105058,772	2727,111	PARA
3079	1079238,319	1105059,021	2727,186	PARA
3080	1079238,441	1105060,262	2727,131	PARA
3081	1079238,375	1105060,261	2727,252	V:A
3082	1079238,368	1105060,417	2727,229	V:A
3083	1079238,351	1105060,439	2727,034	VIA
3084	1079232,731	1105060,719	2728,052	VIA
3085	1079232,737	1105060,728	2728,199	V:A
3086	1079232,748	1105060,605	2728,201	V:A
3087	1079232,434	1105059,268	2728,329	PARA
3088	1079227,731	1105057,043	2729,389	PARA
3089	1079226,627	1105057,651	2729,199	V:A
3090	1079226,568	1105057,68	2729,017	VIA
3091	1079223,11	1105051,489	2729,263	VIA
3092	1079223,159	1105051,455	2729,414	V:A
3093	1079224,299	1105050,681	2729,453	PARA
3094	1079220,149	1105043,291	2729,485	PARA
3095	1079219,002	1105043,995	2729,504	V:A
3096	1079218,931	1105044,038	2729,312	VIA
3097	1079216,25	1105039,309	2729,229	VIA
3098	1079216,29	1105039,318	2729,632	V:A
3099	1079217,555	1105038,658	2729,57	PARA
3100	1079214,682	1105055,596	2729,852	VIA
3101	1079214,648	1105055,62	2730,006	V:A
3102	1079212,791	1105056,513	2730,077	PARA
3103	1079216,04	1105057,905	2730,154	VIA
3104	1079216,021	1105059,428	2730,515	VIA
3105	1079213,719	1105061,694	2731,31	VIA
3106	1079213,545	1105061,579	2731,518	V:A
3107	1079215,965	1105059,57	2730,643	V:A
3108	1079216,006	1105057,872	2730,292	V:A
3109	1079209,127	1105061,964	2732,104	SUMID6
3110	1079209,153	1105062,43	2732,09	SUMID6
3111	1079209,99	1105061,921	2731,959	SUMID6
3112	1079210,015	1105062,402	2731,95	SUMID6

3113	1079218,467	1105061,404	2730,45	PZ
3114	1079223,139	1105063,388	2729,701	PZ
3115	1079220,314	1105055,78	2729,425	PZ
3116	1079247,262	1105058,605	2725,808	PARA
3117	1079247,281	1105059,988	2725,737	V:A
3118	1079247,267	1105060,069	2725,471	VIA
3119	1079247,558	1105066,428	2725,532	VIA
3120	1079247,57	1105066,492	2725,759	V:A
3121	1079247,723	1105067,924	2725,825	PARA
3122	1079254,773	1105067,585	2725,145	PARA
3123	1079254,523	1105065,496	2724,405	V:A
3124	1079254,222	1105059,713	2724,372	V:A
3125	1079254,239	1105059,669	2724,536	V:A
3126	1079254,186	1105058,128	2724,505	VIA
3127	1079263,32	1105057,797	2723,196	PARA
3128	1079263,29	1105059,169	2723,215	V:A
3129	1079263,336	1105059,257	2722,959	VIA
3130	1079263,616	1105065,667	2722,913	VIA
3131	1079263,63	1105065,724	2723,1	V:A
3132	1079263,749	1105067,1	2723,225	PARA
3133	1079267,668	1105066,918	2722,665	PARA
3134	1079267,615	1105065,578	2722,421	V:A
3135	1079267,578	1105065,505	2722,257	VIA
3136	1079266,832	1105059,085	2722,286	VIA
3137	1079266,837	1105059,074	2722,284	VIA
3138	1079266,799	1105058,996	2722,453	V:A
3139	1079274,269	1105057,298	2721,372	PARA
3140	1079274,236	1105058,696	2721,258	V:A
3141	1079274,228	1105058,737	2721,214	VIA
3142	1079274,157	1105065,21	2721,232	VIA
3143	1079274,183	1105065,281	2721,302	V:A
3144	1079274,1	1105067,111	2721,374	PARA
3145	1079279,432	1105066,613	2720,791	PARA
3146	1079279,362	1105064,993	2720,728	V:A
3147	1079279,31	1105064,954	2720,496	VIA
3148	1079278,709	1105058,589	2720,527	VIA
3149	1079278,669	1105058,461	2720,669	V:A
3150	1079278,633	1105057,103	2720,675	PARA
3151	1079284,144	1105056,778	2718,518	PARA

3152	1079284,244	1105058,183	2719,839	V:A
3153	1079284,214	1105058,267	2719,72	VIA
3154	1079285,137	1105064,652	2719,622	VIA
3155	1079285,099	1105064,721	2719,781	V:A
3156	1079285,145	1105066,456	2720,045	PARA
3157	1079291,554	1105066,002	2719,021	PARA
3158	1079291,477	1105064,517	2719,001	V:A
3159	1079291,469	1105064,444	2718,715	VIA
3160	1079291,372	1105057,92	2718,729	VIA
3161	1079291,387	1105057,874	2718,796	V:A
3162	1079291,46	1105056,417	2718,96	PARA
3163	1079302,831	1105055,873	2717,351	PARA
3164	1079302,669	1105057,278	2717,235	V:A
3165	1079302,709	1105057,401	2717,161	VIA
3166	1079303,366	1105063,866	2717,077	VIA
3167	1079303,372	1105063,866	2717,074	VIA
3168	1079303,396	1105063,905	2717,272	V:A
3169	1079303,525	1105065,329	2717,406	PARA
3170	1079309,558	1105065,484	2716,69	PARA
3171	1079309,442	1105063,815	2716,623	V:A
3172	1079309,548	1105063,752	2716,274	V:A
3173	1079309,439	1105057,085	2716,222	VIA
3174	1079309,471	1105057,034	2716,311	V:A
3175	1079309,55	1105055,534	2716,352	PARA
3176	1079314,891	1105055,486	2715,831	PARA
3177	1079314,835	1105056,778	2715,731	V:A
3178	1079314,802	1105056,859	2715,45	VIA
3179	1079315,61	1105063,335	2715,557	VIA
3180	1079315,656	1105063,38	2715,684	V:A
3181	1079315,666	1105065,614	2715,858	PARA
3182	1079321,695	1105065,742	2715,196	PARA
3183	1079321,695	1105065,743	2715,196	PARA
3184	1079321,5	1105063,13	2715,131	V:A
3185	1079321,532	1105063,066	2714,705	VIA
3186	1079321,526	1105056,551	2714,601	VIA
3187	1079321,577	1105056,464	2714,698	V:A
3188	1079321,611	1105055,078	2714,745	PARA
2000	1079383,012	1105060,306	2707,443	D2
2001	1079325,837	1105054,937	2714,451	PARA

2002	1079326,371	1105062,804	2714,387	VIA
2003	1079326,36	1105062,825	2714,503	V:A
2004	1079332,884	1105062,509	2713,71	V:A
2005	1079332,872	1105062,471	2713,601	VIA
2006	1079332,765	1105055,969	2713,476	VIA
2007	1079332,697	1105055,87	2713,564	V:A
2008	1079332,734	1105055,886	2713,555	V:A
2009	1079332,613	1105054,56	2713,665	PARA
2010	1079336,843	1105054,288	2713,344	PARA
2011	1079336,857	1105055,714	2713,276	V:A
2012	1079336,921	1105055,737	2712,976	VIA
2013	1079337,525	1105062,248	2712,98	VIA
2014	1079337,494	1105062,285	2713,166	V:A
2015	1079337,501	1105063,079	2713,391	PARA
2016	1079345,182	1105062,724	2712,281	PARA
2017	1079345,134	1105061,899	2712,233	V:A
2018	1079345,125	1105061,858	2712,113	VIA
2019	1079345,013	1105061,479	2712,14	CUN
2020	1079344,945	1105055,732	2712,051	CUN
2021	1079344,856	1105055,368	2712,032	VIA
2022	1079344,835	1105055,332	2712,258	V:A
2023	1079344,684	1105053,97	2712,382	PARA
2024	1079349,946	1105053,749	2711,694	PARA
2025	1079349,973	1105055,033	2711,603	V:A
2026	1079349,913	1105055,123	2711,488	VIA
2027	1079349,939	1105055,463	2711,572	CUN
2028	1079350,524	1105061,27	2711,486	CUN
2029	1079350,454	1105061,581	2711,451	VIA
2030	1079350,463	1105061,619	2711,642	V:A
2031	1079350,357	1105063,993	2711,665	PARA
2032	1079357,074	1105064,109	2710,977	PARA
2033	1079356,886	1105061,324	2710,875	V:A
2034	1079356,806	1105061,236	2710,751	VIA
2035	1079356,886	1105061,003	2710,767	CUN
2036	1079356,526	1105055,179	2710,745	CUN
2037	1079356,517	1105054,838	2710,709	VIA
2038	1079356,521	1105054,774	2710,994	V:A
2039	1079356,287	1105053,506	2711,104	PARA
2040	1079363,454	1105053,523	2710,074	PARA

2041	1079363,467	1105054,493	2710,033	V:A
2042	1079363,467	1105054,522	2709,864	VIA
2043	1079363,497	1105054,901	2709,904	CUN
2044	1079363,233	1105060,631	2710,036	CUN
2045	1079363,217	1105060,945	2710,008	VIA
2046	1079363,2	1105061,084	2710,189	V:A
2047	1079363,297	1105063,898	2710,615	PARA
2048	1079367,773	1105061,824	2709,68	PARA
2049	1079367,746	1105060,768	2709,654	V:A
2050	1079367,69	1105060,736	2709,459	VIA
2051	1079367,405	1105054,678	2709,438	CUN
2052	1079367,424	1105054,356	2709,388	VIA
2053	1079367,322	1105054,275	2709,609	V:A
2054	1079367,391	1105053,377	2709,632	PARA
2055	1079374,434	1105052,525	2708,696	PARA
2056	1079377,398	1105052,518	2708,349	PARA
2057	1079377,397	1105053,781	2708,324	V:A
2058	1079374,464	1105053,988	2708,69	V:A
2059	1079374,436	1105054,009	2708,593	VIA
2060	1079377,584	1105053,8	2708,185	VIA
2061	1079377,582	1105054,156	2708,215	CUN
2062	1079374,521	1105054,281	2708,599	CUN
2063	1079375,363	1105060,081	2708,564	CUN
2064	1079375,242	1105060,55	2708,455	VIA
2065	1079375,168	1105060,574	2708,635	V:A
2066	1079373,786	1105061,536	2708,953	PARA
2067	1079373,842	1105061,58	2708,714	PARA
2068	1079373,934	1105064,234	2708,632	PARA
2069	1079374,106	1105069,955	2708,494	PARA
2070	1079385,755	1105069,541	2708,045	PARA
2071	1079385,583	1105063,023	2708,196	PARA
2072	1079383,206	1105063,086	2708,103	V:A
2073	1079383,128	1105063,112	2707,892	VIA
2074	1079383,532	1105069,151	2708,182	V:A
2075	1079383,47	1105069,174	2708,007	VIA
2076	1079375,792	1105070,027	2708,301	VIA
2077	1079375,762	1105070,048	2708,516	V:A
2078	1079375,444	1105064,414	2708,603	V:A
2079	1079375,441	1105064,421	2708,389	VIA

2080	1079385,604	1105059,804	2707,486	VIA
2081	1079385,611	1105059,857	2707,638	V:A
2082	1079385,737	1105060,903	2707,743	PARA
2083	1079385,585	1105059,51	2707,487	CUN
2084	1079385,133	1105053,761	2707,276	CUN
2085	1079385,042	1105053,432	2707,248	VIA
2086	1079385,033	1105053,402	2707,576	V:A
2087	1079384,937	1105053,24	2707,282	V:A
2088	1079384,906	1105052,027	2707,326	PARA
2089	1079387,253	1105051,808	2707,241	PARA
2090	1079387,301	1105053,171	2707,249	V:A
2091	1079387,278	1105053,201	2706,948	VIA
2092	1079387,304	1105053,572	2706,982	CUN
2093	1079387,99	1105059,291	2707,172	CUN
2094	1079388,006	1105059,635	2707,136	VIA
2095	1079388,038	1105059,644	2707,304	V:A
2096	1079388,047	1105060,784	2707,343	PARA
2097	1079396,348	1105060,179	2706,284	PARA
2098	1079396,263	1105059,061	2706,219	V:A
2099	1079396,254	1105059,062	2706,073	VIA
2100	1079396,182	1105058,724	2706,107	CUN
2101	1079397,909	1105052,823	2705,61	CUN
2102	1079397,89	1105052,479	2705,561	VIA
2103	1079397,901	1105052,473	2705,691	V:A
2104	1079397,681	1105050,354	2705,722	PARA
2105	1079397,525	1105050,298	2706,083	PARA
2106	1079397,202	1105045,687	2705,853	PARA
2107	1079395,56	1105045,798	2705,738	V:A
2108	1079395,514	1105045,82	2705,57	VIA
2109	1079395,786	1105050,389	2705,751	VIA
2110	1079395,837	1105050,353	2706,005	V:A
2111	1079396,246	1105051,925	2706,024	V:A
2112	1079396,181	1105051,926	2705,927	VIA
2113	1079395,638	1105051,369	2705,833	POL
2114	1079395,575	1105052,148	2705,978	POL
2115	1079395,699	1105052,818	2705,872	POL
2116	1079396,826	1105052,633	2705,671	POL
2117	1079392,423	1105052,95	2706,284	POL
2118	1079392,496	1105052,391	2706,353	POL

2119	1079392,539	1105051,613	2706,189	POL
2120	1079388,852	1105051,899	2706,587	POL
2121	1079388,49	1105052,425	2706,848	POL
2122	1079388,123	1105053,036	2706,827	POL
2123	1079388,19	1105049,96	2706,648	V:A
2124	1079388,235	1105049,961	2706,395	VIA
2125	1079391,821	1105045,202	2705,782	PZ
2126	1079389,505	1105053,248	2706,56	PZ
2127	1079381,014	1105056,326	2707,847	PZ
2128	1079339,555	1105059,317	2712,725	PZ
2129	1079372,317	1105060,342	2708,903	SUMI5
2130	1079372,338	1105060,764	2708,881	SUMI5
2131	1079373,259	1105060,668	2708,795	SUMI5
2133	1079406,877	1105059,472	2704,894	PARA
2134	1079406,957	1105058,278	2704,844	V:A
2135	1079407,003	1105058,249	2704,719	VIA
2136	1079406,991	1105057,953	2704,731	CUN
2137	1079407,383	1105052,147	2704,501	CUN
2138	1079407,397	1105051,895	2704,438	VIA
2139	1079407,403	1105051,82	2704,546	V:A
2140	1079407,167	1105050,105	2704,758	PARA
2141	1079410,085	1105049,861	2704,314	PARA
2142	1079410,143	1105051,623	2704,277	V:A
2143	1079410,111	1105051,684	2704,132	VIA
2144	1079410,174	1105051,988	2704,178	CUN
2145	1079410,338	1105057,732	2704,319	CUN
2146	1079410,365	1105057,961	2704,317	VIA
2147	1079410,335	1105058,008	2704,61	V:A
2148	1079410,468	1105059,212	2704,641	PARA
2149	1079412,774	1105059,136	2704,099	PARA
2150	1079412,728	1105057,852	2704,125	V:A
2151	1079412,68	1105057,798	2704,02	VIA
2152	1079412,698	1105057,515	2704,033	CUN
2153	1079419,099	1105057,065	2703,197	CUN
2154	1079419,093	1105057,372	2703,191	VIA
2155	1079419,086	1105057,415	2703,434	V:A
2156	1079419,102	1105058,831	2703,525	PARA
2157	1079419,206	1105051,366	2703,13	CUN
2158	1079419,161	1105051,051	2703,142	VIA

2159	1079419,21	1105051	2703,393	V:A
2160	1079419,161	1105049,387	2703,486	PARA
2161	1079428,404	1105048,851	2702,089	PARA
2162	1079428,486	1105050,318	2702,086	V:A
2163	1079428,42	1105050,388	2701,917	VIA
2164	1079428,449	1105050,701	2701,93	CUN
2165	1079428,926	1105056,401	2701,988	CUN
2166	1079428,941	1105056,731	2701,999	VIA
2167	1079428,908	1105056,741	2702,079	V:A
2168	1079430,839	1105056,596	2701,835	V:A
2169	1079430,81	1105056,545	2701,756	VIA
2170	1079440,671	1105049,919	2700,301	CUN
2171	1079440,572	1105049,581	2700,282	VIA
2172	1079440,593	1105049,54	2700,57	V:A
2173	1079440,573	1105048,059	2700,582	PARA
2174	1079440,728	1105055,642	2700,366	CUM
2175	1079440,825	1105055,902	2700,381	VIA
2176	1079438,913	1105055,993	2700,59	VIA
2177	1079438,918	1105056,108	2700,675	V:A
2178	1079446,509	1105055,54	2699,716	V:A
2179	1079446,472	1105055,525	2699,622	VIA
2180	1079447,103	1105055,021	2699,542	CUN
2181	1079440,694	1105049,922	2700,289	CUN
2182	1079440,728	1105049,58	2700,254	VIA
2183	1079440,639	1105049,548	2700,556	V:A
2184	1079440,628	1105048,071	2700,579	PARA
2185	1079445,359	1105047,768	2700,06	PARA
2186	1079445,482	1105049,217	2700,044	V:A
2187	1079445,444	1105049,224	2699,689	VIA
2188	1079445,412	1105049,559	2699,75	CUN
2189	1079451,021	1105049,15	2698,958	CUN
2190	1079451,02	1105048,801	2698,99	VIA
2191	1079450,981	1105048,805	2699,339	V:A
2192	1079450,849	1105047,431	2699,381	PARA
2193	1079460,919	1105046,631	2698,006	PARA
2194	1079460,927	1105046,628	2698,005	PARA
2195	1079460,959	1105048,018	2697,851	V:A
2196	1079460,961	1105048,118	2697,731	VIA
2197	1079461,038	1105048,465	2697,739	CUN

2198	1079467,339	1105048,021	2697,055	CUN
2199	1079467,309	1105047,636	2696,987	VIA
2200	1079467,38	1105047,626	2697,142	V:A
2201	1079467,428	1105046,237	2697,075	PARA
2202	1079476,524	1105045,667	2696,125	PARA
2203	1079476,628	1105046,845	2696,23	PARA
2204	1079476,638	1105046,947	2696,492	PARA
2205	1079476,671	1105047,016	2696,255	V:A
2206	1079476,721	1105047,365	2696,283	VIA
2207	1079476,871	1105053,018	2696,297	CUN
2208	1079476,9	1105053,287	2696,272	VIA
2209	1079467,597	1105053,754	2697,143	CUN
2210	1079461,146	1105054,21	2697,802	CUN
2211	1079451,075	1105054,866	2699,018	CUN
2212	1079451,066	1105055,205	2698,993	VIA
2213	1079451,058	1105055,18	2699,033	V:A
1001	1079461,574	1105056,623	2697,769	VIA
1002	1079461,523	1105056,694	2697,879	V:A
1003	1079461,397	1105057,807	2697,918	PARA
1004	1079451,737	1105058,235	2699,033	PARA
1005	1079439,107	1105058,792	2700,487	PARA
1006	1079446,987	1105058,453	2699,704	PARA
1007	1079467,864	1105057,524	2697,265	PARA
1008	1079467,866	1105056,398	2697,171	V:A
1009	1079467,901	1105056,342	2697,139	VIA
1010	1079467,847	1105056,082	2697,15	CUM
1010	1079467,844	1105056,083	2697,149	CUN
1011	1079476,667	1105055,671	2696,337	CUN
1012	1079476,672	1105056,018	2696,3	VIA
1013	1079476,648	1105056,022	2696,378	V:A
1014	1079476,667	1105057,126	2696,39	PARA
1015	1079471,776	1105055,842	2696,758	CUN
1016	1079471,775	1105055,882	2696,759	POL
1017	1079472,44	1105055,781	2696,719	POL
1018	1079473,238	1105055,814	2696,628	POL
1019	1079471,655	1105053,171	2696,805	POL
1020	1079472,331	1105053,207	2696,792	POL
1021	1079473,144	1105053,115	2696,669	POL
1022	1079472,773	1105050,169	2696,542	POL

1023	1079471,964	1105050,156	2696,663	POL
1024	1079471,298	1105050,162	2696,673	POL
1025	1079481,985	1105049,462	2696,057	VIA
1026	1079481,994	1105049,399	2696,234	V:A
1027	1079483,037	1105048,878	2696,153	V:A
1028	1079483,96	1105046,895	2696,154	V:A
1029	1079485,228	1105042,619	2696,305	V:A
1030	1079487,201	1105035,854	2696,191	V:A
1031	1079486,146	1105033,932	2696,231	V:A
1032	1079484,717	1105033,469	2696,333	V:A
1033	1079485,289	1105031,161	2696,379	V:A
1034	1079486,795	1105031,661	2696,265	V:A
1035	1079488,804	1105030,602	2696,155	V:A
1036	1079490,137	1105025,864	2696,164	V:A
1037	1079490,267	1105025,886	2696,064	VIA
1038	1079488,543	1105031,337	2696,097	VIA
1039	1079486,861	1105031,713	2696,134	VIA
1040	1079484,965	1105031,127	2696,176	VIA
1041	1079484,484	1105033,3	2696,122	VIA
1042	1079486,276	1105033,926	2696,146	VIA
1043	1079487,246	1105035,866	2696,125	VIA
1044	1079485,258	1105042,652	2696,115	VIA
1045	1079483,979	1105042,112	2696,334	PARA
1046	1079485,568	1105036,238	2696,274	PARA
1047	1079485,981	1105034,663	2696,233	PARA
1048	1079485,311	1105030,513	2696,41	PARA
1049	1079486,949	1105031,078	2696,239	PARA
1050	1079488,58	1105025,377	2696,224	PARA
1051	1079494,986	1105027,322	2696,03	VIA
1052	1079493,332	1105032,77	2695,991	VIA
1053	1079491,938	1105037,46	2695,971	VIA
1054	1079490,798	1105041,418	2695,954	VIA
1055	1079491,147	1105041,833	2695,94	VIA
1056	1079491,584	1105041,631	2695,94	VIA
1057	1079492,785	1105037,665	2695,964	VIA
1058	1079494,136	1105033,014	2695,945	VIA
1059	1079495,762	1105027,642	2696,013	VIA
1060	1079500,487	1105029,101	2695,786	VIA
1061	1079498,909	1105034,333	2695,777	VIA

1062	1079497,526	1105039,033	2695,792	VIA
1063	1079497,58	1105039,018	2695,953	V:A
1064	1079498,959	1105034,312	2696,033	V:A
1065	1079500,551	1105029,05	2696,042	V:A
1066	1079495,7	1105027,583	2696,214	V:A
1067	1079495,059	1105027,33	2696,222	V:A
1068	1079493,428	1105032,811	2696,212	V:A
1069	1079494,055	1105033,005	2696,189	V:A
1070	1079492,704	1105037,7	2696,174	V:A
1071	1079492,03	1105037,507	2696,199	V:A
1072	1079490,87	1105041,377	2696,174	V:A
1073	1079491,124	1105041,776	2696,18	V:A
1074	1079491,5	1105041,626	2696,138	V:A
1075	1079496,012	1105044,506	2695,789	V:A
1076	1079496,344	1105048,051	2695,831	V:A
1077	1079496,525	1105048,623	2696,27	V:A
1078	1079500,477	1105057,183	2696,195	V:A
1079	1079504,523	1105066,134	2696,082	V:A
1080	1079508,212	1105074,133	2695,876	V:A
1081	1079502,104	1105076,546	2695,744	V:A
1082	1079498,4	1105068,56	2695,832	V:A
1083	1079496,233	1105064,362	2695,924	V:A
1084	1079492,102	1105061,951	2695,806	V:A
1085	1079492,129	1105061,93	2695,646	VIA
1086	1079496,074	1105064,103	2695,636	VIA
1087	1079499,084	1105069,932	2695,631	VIA
1088	1079502,879	1105078,128	2695,59	VIA
1089	1079508,201	1105074,178	2695,725	VIA
1090	1079502,15	1105076,516	2695,621	VIA
1091	1079504,392	1105065,856	2695,816	VIA
1092	1079500,189	1105056,837	2695,814	VIA
1093	1079496,407	1105048,586	2695,789	VIA
1094	1079496,261	1105047,999	2695,758	VIA
1095	1079502,824	1105029,523	2696,077	PARA
1096	1079501,171	1105034,979	2696,073	PARA
1097	1079500,07	1105038,864	2696,074	PARA
1098	1079498,939	1105043,098	2695,842	PARA
1099	1079498,834	1105044,804	2695,875	PARA
1100	1079500,705	1105047,347	2695,877	PARA

1101	1079499,299	1105049,326	2695,877	PARA
1102	1079517,148	1105062,598	2693,911	PARA
1103	1079518,511	1105060,541	2693,91	PARA
1104	1079500,603	1105077,183	2695,802	PARA
1105	1079496,868	1105069,188	2695,901	PARA
1106	1079494,969	1105065,252	2695,974	PARA
1107	1079491,863	1105063,133	2695,808	PARA
1108	1079489,628	1105071,903	2695,645	PARA
1109	1079491,65	1105063,128	2695,797	V:A
1110	1079489,452	1105071,845	2695,574	V:A
1111	1079478,643	1105069,032	2695,837	V:A
1112	1079480,542	1105059,883	2696,054	V:A
1113	1079481,066	1105057,27	2696,106	V:A
1114	1079480,57	1105056,313	2696,118	V:A
1115	1079480,605	1105056,339	2695,955	VIA
1116	1079481,155	1105057,266	2695,981	VIA
1117	1079480,57	1105059,884	2695,967	VIA
1118	1079478,676	1105068,997	2695,748	VIA
1119	1079489,307	1105071,793	2695,447	VIA
1120	1079491,63	1105063,095	2695,641	VIA
1121	1079492,087	1105061,929	2695,639	VIA
1122	1079479,397	1105059,652	2696,137	PARA
1123	1079477,54	1105068,795	2695,908	PARA
1124	1079480,965	1105056,539	2695,933	R1
1125	1079481,203	1105056,131	2695,921	R1
1126	1079480,46	1105055,685	2695,967	R1
1127	1079480,207	1105056,109	2695,958	R1
1128	1079481,507	1105049,501	2696,004	R2
1129	1079481,55	1105049,902	2696,021	R2
1130	1079482,386	1105049,889	2696,022	R2
1131	1079482,357	1105049,453	2696,028	R2
1132	1079495,412	1105044,728	2695,756	R3
1133	1079495,981	1105044,77	2695,727	R3
1134	1079495,087	1105046,057	2695,72	R3
1135	1079495,541	1105046,122	2695,726	R3
1136	1079494,263	1105062,304	2695,614	R4
1137	1079495,215	1105062,973	2695,604	R4
1138	1079495,999	1105063,911	2695,608	R4
1139	1079496,448	1105063,547	2695,608	R4

1140	1079495,575	1105062,59	2695,613	R4
1141	1079494,565	1105061,766	2695,626	R4
1142	1079499,476	1105058,782	2695,772	PZ
1143	1079490,391	1105052,699	2695,855	PZ
1144	1079486,784	1105055,478	2695,889	PZ
1145	1079485,781	1105052,653	2695,894	PZ
1146	1079486,581	1105048,987	2696,012	PZ
1147	1079482,46	1105051,487	2696,039	PZ
1148	1079469,669	1105052,191	2696,863	PZ
1149	1079485,832	1105061,893	2695,736	PZ

Apéndice B. Plano Planta – Perfil del Levantamiento topográfico escenario de topografía tradicional

