

**SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRÁNSITO DEL HIDROGRAMA DE ROTURA  
DE LA PRESA DEL EMBALSE BUCARAMANGA DESDE LA  
DESEMBOCADURA DEL RIO TONA HASTA LA HIDROELÉCTRICA LAS  
BOCAS EN EL RÍO LEBRIJA.**

**SHAIO RINCÓN CARREÑO  
RICARDO ANDRÉS QUIJANO PRADA**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2021**

**SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRÁNSITO DEL HIDROGRAMA DE ROTURA  
DE LA PRESA DEL EMBALSE BUCARAMANGA DESDE LA  
DESEMBOCADURA DEL RIO TONA HASTA LA HIDROELÉCTRICA LAS  
BOCAS EN EL RÍO LEBRIJA.**

**SHAIO RINCÓN CARREÑO  
RICARDO ANDRÉS QUIJANO PRADA**

**Trabajo de Grado para optar por el título de Ingeniero Civil**

**Director  
ANDRÉS ALMEYDA ORTIZ  
Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-MECÁNICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL  
BUCARAMANGA  
2021**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por brindarme la sabiduría y la fortaleza para cumplir los objetivos que me he propuesto durante este hermoso ciclo de mi vida.

A mis padres que siempre estuvieron a mi lado en las situaciones más duras y me brindaron el apoyo necesario durante mi proceso de formación. A mis hermanos por su cariño e incondicionalidad. A los docentes que estuvieron presentes en todo mi proceso de formación, cultivando en mi ser las ansias del saber. Agradezco a mi compañero de proyecto por su compromiso y disposición para el intercambio de ideas.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a todos mis compañeros con quienes me topé en mi proceso de formación. A mis padres y hermanos por su apoyo y consuelo. A toda la planta docente que me formó como profesional. A mi compañero de tesis por su disposición y compromiso en el desarrollo de la misma.

## CONTENIDO

|  | Pág. |
|--|------|
| INTRODUCCIÓN .....   | 13   |
| 1.OBJETIVOS.....   | 24   |
| 1.1 OBJETIVO GENERAL .....   | 24   |
| 1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....  | 24   |
| 2. METODOLOGÍA .....   | 25   |
| 2.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN .....  | 25   |
| 2.2 VISITA DE CAMPO .....  | 25   |
| 2.3 SIMULACIÓN.....  | 25   |
| 3. DESARROLLO .....  | 26   |
| 3.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN .....  | 26   |
| 3.1.1 Descripción embalse Bucaramanga.....                                   | 26   |
| 3.1.2 Ubicación embalse Bucaramanga.....                                     | 26   |
| 3.1.3 Delimitación área de estudio .....                                     | 27   |
| 3.1.4 Características área delimitada.....                                   | 29   |
| 3.2 VISITA DE CAMPO .....  | 30   |
| 3.2.1 Reconocimiento y recopilación de datos.....                            | 30   |
| 3.2.2 Cálculo coeficiente de rugosidad .....                                 | 31   |
| 3.3 SIMULACIÓN.....  | 32   |
| 3.3.1 COBERTURA VEGETAL .....  | 33   |
| 3.3.1.1 Metodología implementada.....  | 33   |
| 3.3.2 USO DE SUELO .....   | 35   |
| 3.3.3 HIDROGRAMAS .....  | 35   |
| 3.3.4 HUELLAS DE INUNDACIÓN A PARTIR DE CAUDALES DE LOS<br>HIDROGRAMAS ..... | 38   |
| 3.3.5 FASE 1. HEC GEO-RAS DE ARCGIS .....                                    | 39   |
| 3.3.5.1 Curvas de nivel y modelo digital del terreno .....                   | 39   |
| 3.3.5.2 Geometría del cauce.....   | 42   |
| 3.3.5.3 Pendiente del cauce .....  | 44   |
| 3.3.6 FASE 2. HEC-RAS.....   | 44   |
| 3.3.6.1 Metodología En Hec-Ras.....  | 44   |
| 4 RESULTADOS.....  | 52   |
| 4.2 HUELLAS DE INUNDACIÓN .....  | 52   |
| 4.3 VELOCIDADES DE FLUJO .....   | 56   |

|   |                             |    |
|---|-----------------------------|----|
| 5 | ANALISIS DE RESULTADOS..... | 68 |
| 6 | CONCLUSIONES .....          | 74 |
|   | BIBLIOGRAFÍA.....           | 77 |
|   | ANEXOS .....                | 79 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|   | <b>Pág.</b> |
|---|-------------|
| Ilustración 1. Parámetros geométricos de la brecha. Fuente: Wahl Tony L.....  | 14          |
| Ilustración 2. Altura de brecha asumida. Fuente: Casallas&Chacón.....   | 17          |
| Ilustración 3. Línea del cauce principal, bancos laterales y secciones transversales. Fuente: Melgarejo.....                                | 21          |
| Ilustración 4. Variaciones de flujo en condiciones no permanentes. Fuente: repositorio PUCP.....  | 22          |
| Ilustración 5. Fotografía superior pantalla concreto embalse de Bucaramanga....   | 26          |
| Ilustración 6. Ubicación satelital del embalse de Bucaramanga.....  | 27          |
| Ilustración 7. Delimitación de la cuenca.....   | 28          |
| Ilustración 8. Estimación longitud cauce principal.....   | 28          |
| Ilustración 9. Estimación área cuenca.....  | 29          |
| Ilustración 10. Izq. Embalse Bucaramanga; Der. Hidroeléctrica las Bocas.....  | 30          |
| Ilustración 11. Identificación por imagen satelital.....  | 31          |
| Ilustración 12. Cobertura vegetal metodología CORINE LAND COVER.....  | 33          |
| Ilustración 13. Usos del suelo plan de ordenamiento territorial Bucaramanga.....  | 35          |
| Ilustración 14. Barra de menú herramienta HEC Geo-RAS.....  | 39          |
| Ilustración 15. Curvas de nivel correspondiente a las planchas No. 109IVC 109IVD del IGAC.....  | 40          |
| Ilustración 16. Modelo digital del terreno generado por la curva de nivel del IGAG.....   | 40          |
| Ilustración 17. Curvas de nivel generadas y extraídas de Global Mapper con la información topografía del STRM Worldwide Elevation Data..... | 41          |
| Ilustración 18. Modelo digital del terreno (TIN) generado en ArcMap a partir de las curvas de la ilustración 13.....                        | 42          |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 19. a) Trazado completo de: Stream Centerline, Banks Lines, y Flowpaths; b) Stream Centerline, Banks Lines, y Flowpaths; c) Secciones Transversales. Fuente: los autores.....                                | 43 |
| Ilustración 20. Sección transversal tomada como ejemplo del modelo geométrico realizado para la simulación.....  | 43 |
| Ilustración 21. Mapa de pendientes con valores estipulados de las 7 categorías de clasificación según el IGAC. Correspondencia en porcentaje de estas categorías: 0-3%, 3-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50%, 50- 75%, >75% ..... | 44 |
| Ilustración 22. Esquema con secciones transversales, cauce y modelo digital .....  | 44 |
| Ilustración 23. Esquema con secciones transversales y cauce .....  | 45 |
| Ilustración 24. Esquema con secciones transversales y cauce .....  | 45 |
| Ilustración 25. Asignación coeficientes de Manning .....   | 46 |
| Ilustración 26. Interfaz/Herramienta adición caudales pico .....   | 47 |
| Ilustración 27. Interfaz/Herramienta adición de 6 métodos (criterios caudales pico) .....  | 47 |
| Ilustración 28. Interfaz/Herramienta para computo .....  | 48 |
| Ilustración 29. Asignación de régimen de flujo y computado .....   | 48 |
| Ilustración 30. Finalización estado de cómputo .....   | 49 |
| Ilustración 31. Interfaz/Herramienta de generación de la huella de inundación.....   | 49 |
| Ilustración 32. Asignación de caudales método TPYSA por intervalos de tiempo.Fuente: Casallas & Chacón .....   | 50 |
| Ilustración 33. Asignación para flujo permanente/Régimen mixto. Fuente: Los autores .....  | 51 |
| Ilustración 34. Trazo aproximado de la trayectoria del cauce río Tona- Lebrija.....  | 52 |
| Ilustración 35. Huella de inundación y profundidad por método McDonald .....   | 53 |
| Ilustración 36. Huella de inundación y profundidad por método USBR .....   | 53 |
| Ilustración 37. Huella de inundación y profundidad por método FERCH .....  | 54 |
| Ilustración 38. Huella de inundación y profundidad por método TYPYSA .....   | 54 |
| Ilustración 39. Huella de inundación y profundidad por método Froelich .....   | 55 |
| Ilustración 40. Huella de inundación y profundidad por método Von Thum.....  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 41. Huella de inundación y velocidades por método Froelich .....   | 56 |
| Ilustración 42. Huella de inundación y velocidades por método USBR .....   | 57 |
| Ilustración 43. Huella de inundación y velocidades por método Von Thum .....   | 57 |
| Ilustración 44. Huella de inundación y velocidades por método FERCH .....  | 58 |
| Ilustración 45. Huella de inundación y velocidades por método McDonald .....   | 58 |
| Ilustración 46. Huella de inundación y velocidades por método TYPESA .....   | 59 |
| Ilustración 47. Huellas de inundación y profundidad en metros por método de<br>TYPESA flujo permanente. Fuente: Los autores .....                            | 60 |
| Ilustración 48. Afectación zona este Villa Helena. Fuente: Los autores.....  | 61 |
| Ilustración 49. Afectación zona Café Madrid. Fuente: Los autores.....  | 61 |
| Ilustración 50. Afectación Vereda Chitota. Fuente: Los autores .....   | 62 |
| Ilustración 51. Afectación zona PTAT Bosconia. Fuente: Los autores .....   | 63 |
| Ilustración 52. Afectación zona La Cemento. Fuente: Los autores .....  | 63 |
| Ilustración 53. Afectación zona de la fábrica Bavaria. Fuente: Los autores .....   | 63 |
| Ilustración 54. Afectación corredores viales. a) Vía Bucaramanga-Matanza-Charta.<br>b) Puente Av. Libertador. c) Puente la Cemento. Fuente: Los autores..... | 65 |
| Ilustración 55. Huella de velocidades de flujo método TYPESA. Fuente: Los autores<br>.....   | 66 |
| Ilustración 56. Velocidades de flujo método TYPESA. Fuente: Los autores.....   | 67 |
| Ilustración 57. Velocidades de flujo método TYPESA. Fuente: Los autores.....   | 67 |
| Ilustración 58. Vista tridimensional de la huella de profundidad por el método<br>TYPESA .....   | 68 |
| Ilustración 59. Velocidades de flujo mediante el método TYPESA.....  | 69 |
| Ilustración 60. Distribución de tramos a lo largo del cauce principal.....   | 70 |
| Ilustración 61. Distancia y Velocidad entre secciones transversales.....   | 71 |

## GRÁFICAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Gráfica [1]. McDonald y Langridge – Monopolis 1984: 1.41h;17.72m;1h:0.5v | 36          |
| Gráfica [2]. USBR Reclamation 1988: 1.53h;87.2m;1h:1v                    | 36          |
| Gráfica [3]. Von Thum & Gillette 1990: 0.92h;118.85m;1h:1v               | 37          |
| Gráfica [4]. Froehlich 1995: 0.50h;22.61m;1h:1v                          | 37          |
| Gráfica [5]. FERC 1987: 1h;52.30m;1h:1v                                  | 37          |
| Gráfica [6]. FERC 1987: 1h;52.30m;1h:1v                                  | 38          |

## LISTA DE TABLAS

|  | <b>Pág.</b> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Ecuaciones para predicción de formación de brecha. ....   | 15          |
| Tabla 2. Parámetros para valores de ecuaciones.....  | 16          |
| Tabla 3. Ecuaciones para calcular caudal pico.....   | 17          |
| Tabla 4. Valores asignados para los coeficientes ec. Manning .....   | 32          |
| Tabla 5. Caudales pico. Métodos para H1. Fuente: Estimación Del Hidrograma De Salida En La Hipotética Rotura De La Presa Del Proyecto De Regulación Del Río Tona - Embalse De Bucaramanga:2016 ..... | 47          |
| Tabla 6. Tiempos de llegada de la avenida en los tramos de mayor importancia. Fuente: Los autores.....   | 73          |

## ABSTRACT

**TITLE:** HYDRAULIC SIMULATION OF THE TRANSIT OF THE BREAKING HYDROGRAM OF THE BUCARAMANGA RESERVOIR FROM THE TONA RIVER MOUTH TO LAS BOCAS HYDROELECTRIC IN THE LEBRIJA RIVER.\*

**AUTHORS:** RICARDO ANDRÉS QUIJANO PRADA\*\*

**SHAIO RINCON CARREÑO**

**KEYWORDS:** Hydrograph, HEC-RAS, Tona River, Hydraulic Simulation, Flood Area.

### **DESCRIPTION:**

Given the great importance of safety in each of the phases of the life of a dam, it is necessary to use methods aimed at minimizing the risk given their failure, such as hydraulic modeling and simulation; These methods are used to make predictions about the collateral damage that an emergency due to these incidents can generate. The present research project sought, through the modeling and simulation of the avenue produced by the gap generated after the break of the Bucaramanga reservoir dam, to originate the flood tracks, flow velocities and arrival times of the a to estimate a future emergency plan by virtue of the protection of the territories that will be affected and, therefore, provide some light on the correct action in the event of a rupture of the reservoir. The modeling and simulation were done through a process of digitization and analysis using the AcrGIS and HEC-RAS software, in the latter, given the instability of the software for the simulation under non-permanent flow, which would be ideal, it was necessary to work with permanent flow and mixed regime. Another parameter that made the model unstable was the absence of a detailed topography, which prevents the correct demarcation of the geometry of the channel; the scale used in this investigation was 1: 25000. In order to carry out the simulation in the HEC-RAS software, information on land use and land cover, roughness coefficients and rupture hydrograms were collected. The results give an inconclusive panorama since, due to the scarcity of resources, this research can be considered as an academic exercise, but with all the rigor of an adopted methodological process. Havoc can be seen from the 3 kilometers of the avenue route, since from this section depths and high speeds are observed, which considerably affect the population and infrastructure of that area.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Ingeniero Civil.

## RESUMEN

**TITULO:** SIMULACIÓN HIDRÁULICA DEL TRÁNSITO DEL HIDROGRAMA DE ROTURA DE LA PRESA DEL EMBALSE BUCARAMANGA DESDE LA DESEMBOCADURA DEL RIO TONA HASTA LA HIDROELÉCTRICA LAS BOCAS EN EL RÍO LEBRIJA. \*

**AUTORES:** RICARDO ANDRÉS QUIJANO PRADA\*\*

**SHAIO RINCON CARREÑO**

**PALABRAS CLAVE:** Hidrograma, HEC-RAS, Río Tona, Simulación Hidráulica, Área Inundación.

### **DESCRIPCIÓN:**

Dada la gran importancia que tiene la seguridad en cada una de las fases de la vida de una presa, se hace necesario usar métodos, encaminados a reducir al máximo el riesgo por la rotura de las mismas, como la modelación y simulación hidráulica; estos métodos sirven para hacer predicciones en torno a los daños colaterales que una emergencia debido a estos siniestros puede generar. La presente investigación buscó, mediante el modelamiento y simulación de la avenida producida por la brecha generada luego de la rotura de la presa del embalse Bucaramanga, originar las huellas de inundación, velocidades de flujo y tiempos de llegada de la avenida, para poder estimar un futuro plan de emergencia en virtud de la protección de los territorios que se verán afectados y, por ende, brindar algunas luces sobre el correcto actuar dado el caso de rotura del embalse. La modelación y simulación se hizo mediante un proceso de digitalización y análisis utilizando los software AcrGIS y HEC- RAS, en este último, por la inestabilidad del software para la simulación bajo flujo no permanente, lo cual sería de lo ideal, fue necesario trabajar con flujo permanente y régimen mixto. Otro parámetro que volvió inestable el modelo, fue la ausencia de una topografía de detalle, la cual impide la demarcación correcta de la geometría del cauce; la escala con la que se trabajó en esta investigación fue 1:25000. Para poder realizar la simulación en el software HEC- RAS, se recolectó información de uso de suelos y cobertura de la tierra, coeficientes de rugosidad e hidrogramas de rotura. Los resultados arrojan un panorama poco concluyente, y se aprecian estragos desde los 3 kilómetros del recorrido de la avenida, pues desde este tramo se observan profundidades y velocidades altas, que afectan a la población e infraestructura de esa zona

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Andrés Almeyda Ortiz, Ingeniero Civil.

## INTRODUCCIÓN

El agua al ser un recurso hídrico de alta demanda global se convierte en un elemento esencial para la vida de cualquier ser vivo. Su importancia no solo radica en la vida que genera en la tierra, sino en las grandes cantidades de beneficios que trae consigo. Sus usos son variables, y el ser humano ha logrado darle a este recurso muchas funciones de las cuales se puede sacar provecho. Pese a ser un elemento tan abundante y con tantos beneficios, este hermoso recurso hídrico también trae consigo, debido a su dinámica por una fuerza importante, que, pese a los grandes beneficios, puede ocasionar eventos catastróficos fortuitos. Estos eventos se caracterizan por generar inundaciones con repercusiones adversas a las comunidades. Por lo general, estas contingencias generan pérdidas económicas, ambientales y sociales.

El embalse de Bucaramanga es una mega obra que tiene como objetivo proveer de agua a varios sectores de la población tales como industria, comercio y hogar. Pese a ser una mega obra, se han presentado casos en los cuales las presas fallan y generan problemas a las comunidades que se benefician de estas construcciones, por eso es importante tener en cuenta que esta situación podría tener cabida en cualquier momento.

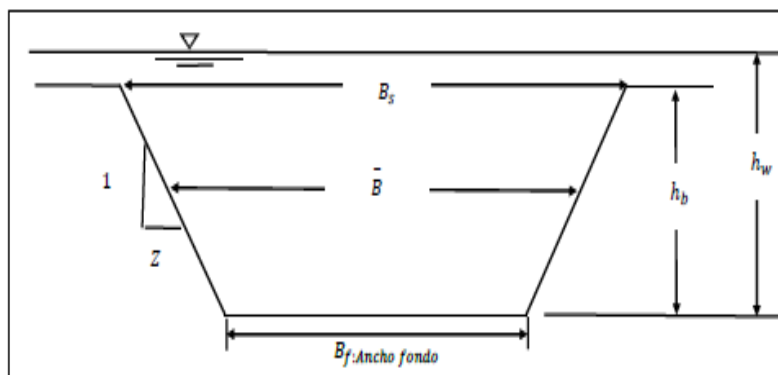
La ciudad de Bucaramanga colinda con el cauce del río Unión Surata- Río de Oro, estos conformando el río Lebrija, por lo que, en caso de una eventualidad adversa por rotura del embalse de Bucaramanga, se hace necesario contar con información que ayude a dar predicciones sobre qué eventos van suceder, qué riesgos conlleva y posiblemente a futuro, generar un plan de emergencia.

## MARCO TEÓRICO

Para esta investigación fue necesario extraer información de distintos métodos de predicción para formación de brechas y cálculo de caudales pico como lo son TYPESA, McDonald, Froehlich, Von Thum, FERC, USBR, entre otros<sup>1</sup>, así mismo la información de coeficientes de rugosidad<sup>2</sup> y regímenes de flujo, ya que representan insumos importantes para la modelación de la avenida en los software usados de los que a su vez se expondrá brevemente su funcionamiento en lo que respecta a esta investigación. El uso de estas herramientas SIG (Sistemas de Información Geográfica) permitieron la obtención de resultados visuales y numéricos.

**Formación de brechas y caudales pico.** Existen métodos asociados al cálculo de caudales pico y predicción de formación de brechas. Para el caso de la formación de una brecha, se requieren datos que parametrizan a esta. Estas características (profundidad, ancho, ángulos de los taludes) ayudan a describir la brecha y a definir el tiempo en el cual se inicia y se desarrolla. Los parámetros físicos por la definición adaptada de Bureau of Reclamation of United States (USBR) se representan gráficamente de la siguiente manera.

*Ilustración 1. Parámetros geométricos de la brecha. Fuente: Wahl Tony L.*



<sup>1</sup> WAHL, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. Journal of hydraulic engineering, 130(5), 389-397.

<sup>2</sup> ARCEMENT, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.

Donde los valores

**hb:** Distancia vertical de la brecha medida desde la cresta de la presa hasta el fondo de la brecha generada.

**hw:** Carga sobre la brecha. Distancia medida desde la altura de la lámina de agua hasta el fondo de la brecha generada.

**B:** Ancho de la brecha. Parámetro dependiente de la geometría de la brecha ya que esta puede ser de forma rectangular, trapezoidal o triangular.

**Bs:** Base superior de la brecha

**Z:** Pendiente lateral brecha

**Predicción para formación de brecha.** Para la formación de la brecha se tiene en cuenta un valor de tiempo para que esta ocurra ( $t_f$ ). Este valor se puede medir desde el momento en que la falla por sobrevvertido y la descarga toman lugar (erosionado de la presa). En la tabla número 1, se presentan relaciones propuestas entre el tiempo de formación con las características geométricas de la brecha por varios métodos que son usados como referencia<sup>3</sup>.

Tabla 1. Ecuaciones para predicción de formación de brecha. Fuente: Wahl Tony L.

| Reference                                | Number of Case Studies | Relations Proposed (S.I. units, meters, m <sup>3</sup> /s, hours)  |
|--|------------------------|--|
| Johnson and Ilies (1976)                 |                        | $0.5h_d \leq B \leq 3h_d$ for earthfill dams   |
| Singh and Snorrason (1982, 1984)         | 20                     | $2h_d \leq B \leq 5h_d$<br>$0.15 \text{ m} \leq d_{\text{outtop}} \leq 0.61 \text{ m}$<br>$0.25 \text{ hr} \leq t_f \leq 1.0 \text{ hr}$   |
| MacDonald and Langridge-Monopolis (1984) | 42                     | <b>Earthfill dams:</b><br>$V_{er} = 0.0261(V_{out}^* h_w)^{0.769}$ [best-fit]<br>$t_f = 0.0179(V_{er})^{0.564}$ [upper envelope]<br><b>Non-earthfill dams:</b><br>$V_{er} = 0.00348(V_{out}^* h_w)^{0.882}$ [best fit]   |
| FERC (1987)                              |                        | $B$ is normally 2-4 times $h_d$<br>$B$ can range from 1-5 times $h_d$<br>$Z = 0.25$ to $1.0$ [engineered, compacted dams]<br>$Z = 1$ to $2$ [non-engineered, slag or refuse dams]<br>$t_f = 0.1-1$ hours [engineered, compacted earth dam]<br>$t_f = 0.1-0.5$ hours [non-engineered, poorly compacted] |
| Froehlich (1987)                         | 43                     | $\bar{B}^* = 0.47K_c (S^*)^{0.25}$<br>$K_c = 1.4$ overtopping; $1.0$ otherwise<br>$Z = 0.75K_c (h_w^*)^{1.57} (\bar{W}^*)^{0.73}$<br>$K_c = 0.6$ with corewall; $1.0$ without a corewall<br>$t_f^* = 79(S^*)^{0.47}$   |
| Reclamation (1988)                       |                        | $B = (3)h_w$<br>$t_f = (0.011)B$   |
| Singh and Scarlatos (1988)               | 52                     | Breach geometry and time of failure tendencies<br>$B_{\text{top}}/B_{\text{bottom}}$ averages $1.29$   |
| Von Thun and Gillette (1990)             | 57                     | $B, Z, t_f$ guidance (see discussion)  |
| Dewey and Gillette (1993)                | 57                     | Breach initiation model; $B, Z, t_f$ guidance  |
| Froehlich (1995b)                        | 63                     | $\bar{B} = 0.1803K_c V_w^{0.32} h_b^{0.19}$<br>$t_f = 0.00254V_w^{0.82} h_b^{(-0.99)}$<br>$K_c = 1.4$ for overtopping; $1.0$ otherwise   |

<sup>3</sup> CASALLAS ROZO, E. I., & Chacón García, S. G. (2016). Estimación Del Hidrograma De Salida En La Hipotética Rotura De La Presa Del Proyecto De Regulación Del Rio Tona-Embalse De Bucaramanga (Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Civil).

Donde los valores

**dovtop:** Calado del flujo de la cresta de la presa al momento de la rotura.

**Vver:** Volumen material erosionado.

**Vout:** Volumen de agua descargada a través de la brecha.

**ko:** Factor corrección por rebose

**Z1:** Inclinación de la cara de aguas arriba de la presa.

**Z2:** Inclinación de la cara de aguas debajo de la presa.

**C:** Ancho de cresta de la presa.

**Cb:** Función del almacenamiento en el embalse.

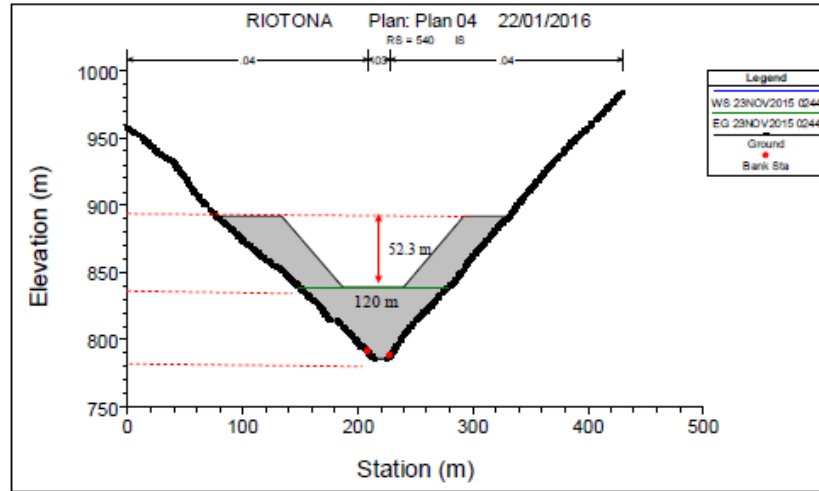
Teniendo en cuenta que los criterios de estudio tomados por Casallas&Chacon, para tiempos de formación de brecha y cálculo de caudales pico son las metodologías propuestas por Singh&Snorrason, McDonald y Langridge-Monopolis, USBR, Von Thum & Gillette, Froehlich, FERC, TYPESA, ya que se han utilizado en varios estudios para seguridad de presas y se puede contar con datos históricos para presas de esta tipología (enrocado con cara de concreto CFRD).

Para poder realizar los métodos de predicción y cálculo de caudal pico, se hace necesario establecer una altura de brecha (ver ilustración 2) que se ajuste a un resultado (cálculo de la base promedio de la brecha) que no sobrepase la longitud de la presa. Así mismo se establecieron los parámetros necesarios para poder realizar los métodos propuestos para dichas predicciones y cálculos (Ver tabla No. 2).

Tabla 2. Parámetros para valores de ecuaciones. Fuente: Casallas&Chacón.

| Nivel máximo normal de operación |                        |             | Nivel máximo Extraordinario |                        |             |
|----------------------------------|------------------------|-------------|-----------------------------|------------------------|-------------|
| Par.                             | Valores                | Cota (msnm) | Par.                        | Valores                | Cota (msnm) |
| $h_w$                            | 46.5 m                 | 839.3       | $h_w$                       | 52.8 m                 | 839.3       |
| $h_d$                            | 104.6 m                | 787.0       | $h_d$                       | 104.6 m                | 787.0       |
| $h_b$                            | 52.3 m                 | 839.3       | $h_b$                       | 52.3 m                 | 839.3       |
| S                                | 17.80 H m <sup>3</sup> | 885.8       | S                           | 17.80 H m <sup>3</sup> | 885.8       |
| $V_w$                            | 17.80 H m <sup>3</sup> | 885.8       | $V_w$                       | 21.17 H m <sup>3</sup> | 892.1       |

Ilustración 2. Altura de brecha asumida. Fuente: Casallas&Chacón.



**Cálculo caudales pico.** Para el cálculo de caudales pico se recurre al estudio realizado por Wahl. Estos métodos son estimaciones para el caudal pico producto de la rotura de una presa. En la tabla número 3, se presentan relaciones propuestas para el caudal pico que varía según una función dependiente de las características geométricas de la brecha que irán cambiando en el tiempo, determinados por los mismos métodos que son usados como referencia.

Tabla 3. Ecuaciones para calcular caudal pico. Fuente: Walh Tony L.

| Reference                                | Case Studies                              | Relations Proposed   | Notes  |
|--|---|--|--|
| Babb and Mermel (1968)                   | >600 incidents                            |  | Many cases not well-documented               |
| Kirkpatrick (1977)                       | 16 (plus 5 hypothetical failures)         | $Q_p = f(h_w)$   |  |
| SCS (1981)                               | 13  | $Q_p = f(h_w)$   |  |
| Hagen (1982)                             | 6   | $Q_p = f(h_w, S)$  |  |
| Reclamation (1982)                       | 21  | $Q_p = f(h_w)$   |  |
| Graham (1983)                            | 6   |  | dams with large storage-to-height ratios     |
| Singh and Snorrason (1982, 1984)         | 20 real failures and 8 simulated failures | Guidance for $B$ , $d_{max}$ , and $t_f$<br>$Q_p = f(S)$ ; $Q_p = f(h_d)$    | $Q_p$ relations based on simulations         |
| Graham (undated)                         | 19  | $Q_p = f(h_w, S)$  |  |
| MacDonald and Langridge-Monopolis (1984) | 42  | $V_{er} = f(V_{out}^2 h_w)$<br>$t_f = f(V_{er})$<br>$Q_p = f(V_{out}^2 h_w)$ |  |
| Costa (1985)                             | 31 constructed dams                       | $Q_p = f(h_d)$<br>$Q_p = f(S)$<br>$Q_p = f(h_d, S)$                          | Includes information on natural dam failures |
| Evans (1986)                             |   | $Q_p = f(V_w)$   |  |
| FERC (1987)                              |   | Guidance for $B$ , $Z$ , $t_f$   |  |
| Froehlich (1987)                         | 43  | $B$ , $Z$ , $t_f$ relations  |  |
| Reclamation (1988)                       |   | $B$ , $t_f$ guidance   |  |
| Singh and Scarlatos (1988)               | 52  | Guidance for $B$ , $Z$ , $t_f$   |  |
| Von Thun and Gillette (1990)             | 57  | $Z$ guidance<br>$B = f(h_w, S)$<br>$t_f = f(h_w, \text{erosion resistance})$ |  |
| Froehlich (1995b)                        | 63  | $B$ , $Z$ , $t_f$ relations  |  |
| Froehlich (1995a)                        | 22  | $Q_p = f(V_w, h_w)$  |  |

Donde los valores

**hd:** Altura de la presa.

**vw:** Volumen de agua en el embalse al momento de la formación de la brecha

**S:** Volumen de almacenamiento.

**Qp:** Caudal pico.

En la investigación realizada por Casallas & Chacón, mediante un proceso matemático estimado usando el software HEC-RAS, se generan los hidrogramas de salida del flujo, donde se presentan los caudales picos para cada uno de los métodos.

## **FUNCIONAMIENTO DE LOS SOFTWARE ARCGIS Y HEC-RAS.**

Para entender el funcionamiento de los software es necesario comprender los conceptos de los objetos geométricos con los que estos trabajan. Todos estos conceptos están estrechamente ligados a los insumos que permiten un correcto modelado para la comprensión visual y numérica de distintas investigaciones geomorfo- hidrológicas<sup>4</sup>.

### **Funcionamiento de ArcGis para la creación del MDT (Modelo Digital de Terreno)**

El software permite visualizar modelos de superficie RASTER Y TIN, y con sus herramientas de análisis espacial, análisis 3D y análisis Geoestático, permite crear, analizar y extraer información sobre superficies.

---

<sup>4</sup> ARCGIS FOR DESKTOP. (2019, 5 junio). Creación y análisis de superficies. <https://desktop.arcgis.com/>.

**Superficies en ArcGIS.** Cuando se habla de una superficie se refiere a una extensión, y ArcGis reconoce estas extensiones como conjuntos de puntos cuya cantidad está dada por un número definido, que a su vez es producto de un muestreo, ya que estas extensiones poseen una cantidad infinita de puntos, que poseen propiedades de referencia espacial. Estos puntos pueden representar distintos valores referidos a distintos objetos de estudio; es decir, la superficie puede formarse a partir de puntos con valores de elevación, o también se puede formar una superficie con puntos cuyos valores sean densidad poblacional, o bien datos de temperatura, etc. Los cuales tienen en común la propiedad de georeferenciación. Luego de obtener la muestra de puntos georeferenciados, mediante procesos de interpolación se asignan valores a la superficie.

La representación de las superficies en ArcGis se puede dar mediante curvas de nivel, isoyetas, conjuntos de puntos, Rasteres y TIN. Se debe aclarar que en los SIG los datos que se procesan, provienen de archivos Raster o TIN. A continuación, se definen las entidades anteriormente mencionadas.

**Puntos.** Son entidades que se pueden distribuir de manera uniforme o no, es decir, con regularidad o sin ella, en una superficie. Constituyen el elemento de entrada para las herramientas matemáticas de interpolación en el software, por ejemplo, Kriging y triangulación, con las cuales se crean las superficies ráster o TIN.

**TIN.** Son entidades formadas por redes de triángulos o facetas triangulares que se definen por nodos y bordes que cubren una superficie. Estas entidades se forman a partir de la interpolación de las distancias entre los puntos o lados con valores conocidos de altura. Los TIN suelen utilizarse para representar superficies de terreno en aplicaciones de ingeniería, ya que las alturas de puntos pueden distribuirse irregularmente con el fin de acoger en la superficie áreas de gran variabilidad, y sus valores y posiciones exactas se conservan en forma de nodos en el TIN.

**Ráster.** Son conjuntos rectangulares de celdas (o píxeles), y cada una de ellas almacena un valor correspondiente a la parte de superficie que cubre. Toda celda contiene un valor individual, por lo que el nivel de detalle que puede representarse en la superficie se ve limitado al tamaño de las celdas ráster. Los ráster son los modelos de superficie que se utilizan con más asiduidad en ArcGIS. La simplicidad de la estructura de datos ráster posibilita que los cálculos en ráster (o comparaciones entre ráster) se realicen más rápidamente que otras representaciones de superficie. Los ráster se utilizan también para almacenar imágenes, mapas escaneados e información por categorías, como, por ejemplo, las clases de uso de suelo, que suelen tener su origen en imágenes.

**Hec-GeoRAS.** Hec-GeoRAS constituye un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades especialmente diseñadas para procesar datos georreferenciados que permiten bajo el entorno (SIG), facilitar y complementar el trabajo con HEC-RAS, creando un archivo para ser importado a este, en donde se dispone de datos de geometría del terreno incluyendo cauce del río, secciones transversales (ver Ilustración 3). Posteriormente los resultados obtenidos de calados y velocidades se exportan desde HEC-RAS a ArcGis y pueden ser procesados para obtener mapas de inundación y riesgo<sup>5</sup>.

Para el uso de esta extensión es necesario un MDT (modelo digital del terreno) en formato vectorial TIN (Trianguled Irregular Network) lo más detallado posible. De este TIN se extraerán los datos geométricos de las secciones transversales.

Las principales herramientas que usa esta extensión para el modelado del cauce son las siguientes:

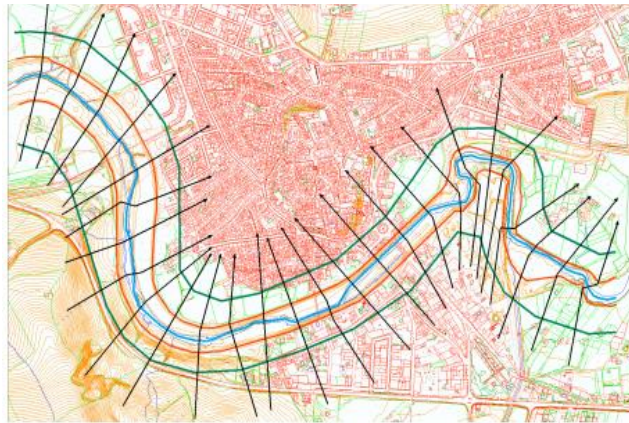
- **LAYER SETUP:** Especifica los temas para el fichero de importación

---

<sup>5</sup> MELGAREJO, E. (2013). Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3a edición) (3.a ed., Vol. 1). Universidad de Granada

- **STREAM CENTERLINE ATTRIBUTES:** Añade topología y atributos al cauce del río.
- **XS CUT LINE ATTRIBUTES:** Añade topología y atributos a las secciones transversales.

*Ilustración 3. Línea del cauce principal, bancos laterales y secciones transversales.  
Fuente: Melgarejo, E. (2013). Manual Básico de HEC-GeoRAS 10.*



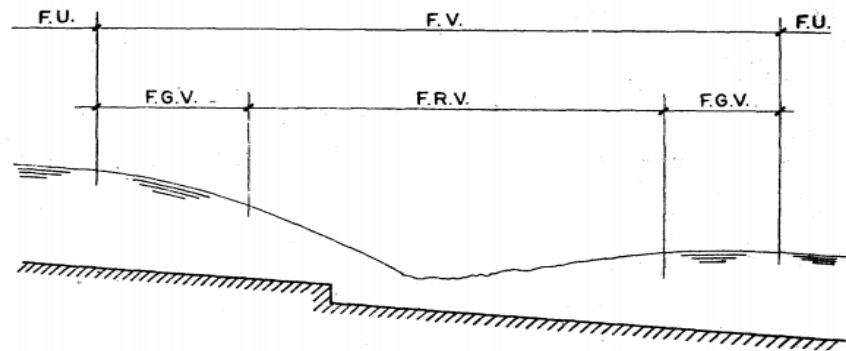
**Coeficiente de rugosidad.** Una de las variables que influyen de manera significativa a la hora de realizar un modelo hidráulico ya sea unidimensional o bidimensional, es precisamente el coeficiente de rugosidad [14]. Este coeficiente, permite determinar en cierta medida la capacidad de transporte de una sección siendo denotada por Robert Manning con la letra  $n$  [14].

Para modelos hidráulicos, especialmente los realizados en el software HEC-RAS, es apropiado trabajar con la metodología propuesta por la United States Geological Survey (USGS), la cual presenta una guía avanzada de cómo definir estos parámetros de rugosidad para posteriormente asignarlos al software HEC-RAS. Esta metodología se basa en la formula empírica propuesta por Manning.

**Flujo permanente y no permanente en canales.** Cuando un cauce presenta un flujo de tipo permanente en una sección transversal del canal, permanecen constantes con respecto al tiempo sus características hidráulicas, como lo son:

caudal, velocidad media, tirante hidráulico, etc. Cuando el caso es contrario, es decir, el flujo es no permanente, estas características hidráulicas se ven afectadas por el paso del tiempo debido a factores como lo son la rugosidad del terreno, los meandros y la variación en general de sus características hidráulicas.

Ilustración 4. Variaciones de flujo en condiciones no permanentes. Fuente: repositorio PUCP.



En un flujo no permanente (ver Ilustración 4), se presenta una variación que se clasifica en flujo uniforme (F.U), flujo gradualmente variado (F.G.V), flujo variado (F.V) y flujo rápidamente variado. (F.R.V), los cuales representan un papel importante, ya que, dependiendo del tipo de régimen, los resultados obtenidos para las velocidades y alturas de calado de la simulación hidráulica pueden variar.

**Regímenes de flujo.** Teniendo en cuenta las características de variación del flujo, este se clasifica en varios regímenes que dependen de la variación del número de Froude.

Donde

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gD}}$$

**Fr:** número Froude

**V:** velocidad

**g:** gravedad

**D:** Profundidad hidráulica.

Ecuación 1. Número de Froude. Fuente: Repositorio PUCP

**Régimen Subcrítico:**  $Fr < 1$

**Régimen Crítico:**  $Fr=1$

**Régimen Supercrítico:**  $Fr > 1$

**Régimen Mixto:** Estas condiciones varían a lo largo del cauce.

El número de Froude es un indicador del comportamiento del flujo a través de diversas secciones transversales, dado que el software Hec-RAS arroja este tipo de información y se hace necesario interpretarla.

## **1. OBJETIVOS**

### **1.1 OBJETIVO GENERAL**

Modelación Hidráulica del hidrograma de rotura del embalse Bucaramanga desde la unión ríos Tona- Surata, incorporándose con el río de Oro formando el río Lebrija hasta la hidroeléctrica las Bocas.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Recopilar información topográfica, morfológica y de usos de suelo de las posibles áreas de inundación.
- Modelación Hidráulica mediante el software Hec-RAS, Geo-RAS.
- Determinación de las zonas de inundación, velocidades del flujo y tiempos de llegada de la inundación. Definición o delimitación de la zona segura.

## **2. METODOLOGÍA**

Para el desarrollo de los objetivos propuestos se implementó la siguiente metodología.

### **2.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN**

La delimitación de la zona se hizo siguiendo el cauce del río Tona – Suratá, mediante la herramienta geográfica Google Earth Pro, la cual permitió sectorizar el área de afectación.

### **2.2 VISITA DE CAMPO**

Por medio de inspección visual (Google Earth, SAS.Planet2006, Landstat, USGS) a la zona de análisis, se recopiló la información pertinente de datos con los cuales se determinó la rugosidad del terreno mediante la comparación con la bibliografía de *Ven te Chow*. Para la clasificación de la cobertura del suelo y sus usos, se tomó en cuenta la metodología CORINE adaptada para Colombia en escala 1:100000, junto con el plan de ordenamiento territorial (POT).

### **2.3 SIMULACIÓN**

Mediante el uso de los software ArcGIs, HEC-RAS, se hizo la modelación y simulación bajo flujo permanente del cauce afectado dada la avenida producida por la rotura del embalse Bucaramanga, para la generar huellas de inundación, obtención de datos como la velocidad de flujo y tiempos de llegada.

## 3. DESARROLLO

### 3.1 LOCALIZACIÓN Y DELIMITACIÓN

**3.1.1 Descripción del embalse Bucaramanga.** El embalse de Bucaramanga, es una obra diseñada para el abastecimiento de agua para uso humano e industrial. Comprende una altura de presa de 103 m, presentando un volumen de almacenamiento total de unos 17.8 Hm<sup>3</sup>.<sup>6</sup> En épocas de invierno, este embalse posee la capacidad de regular los excesos de captación y almacenarlos, siendo transportados al acueducto de Bucaramanga para una reserva aproximada de 3 meses. Este proyecto cuenta con una planta de redes de agua potable. Tiene la capacidad de tratar alrededor de 1200 litros por segundo, junto con una línea de canal de 3800 metros que permite aducir esta agua.

*Ilustración 5. Fotografía superior pantalla concreto del embalse Bucaramanga Fuente: blog.structuralia*

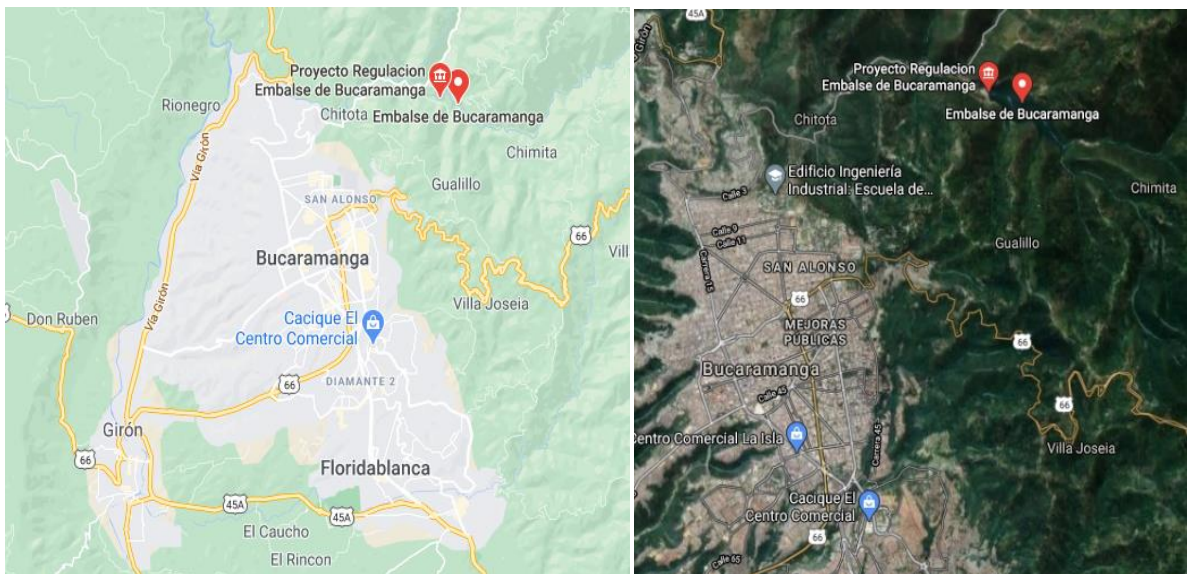


---

<sup>6</sup> A.M.B. (2016, 1 mayo). Proyecto de regulación del río Tona embalse Bucaramanga. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

**3.1.2 Ubicación embalse Bucaramanga.** El embalse de Bucaramanga se encuentra ubicado al noreste de la ciudad de Bucaramanga (ver Ilustración 6). Se encuentra en la parte baja de la Vereda Retiro Grande perteneciente al municipio de Bucaramanga. Su construcción fue realizada sobre la cuenca baja del río Tona, teniendo el eje preseleccionado a unos 400 m aguas arriba de la dirección del cauce del río Tona – Suratá, cerca de la vía Bucaramanga – Matanza.

*Ilustración 6. Ubicación satelital embalse Bucaramanga. Fuente: Google Maps.*

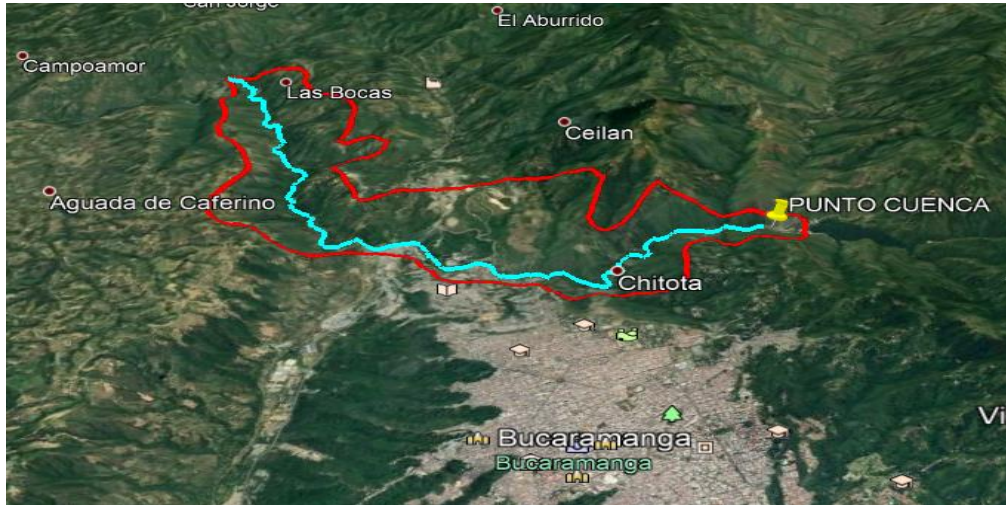


**3.1.3 Delimitación área de estudio.** Para la delimitación del área de estudio se tuvo en cuenta principalmente la dirección del cauce después de presentarse la avenida debido a la rotura de la presa del embalse Bucaramanga. Esto implicó trazar la posible ruta que seguirá el cauce hasta el punto de interés final que es la hidroeléctrica Las Bocas.

Posteriormente, se requirió delimitar el área de interés siguiendo la zona más alta de las montañas que delimitan el cauce desde el afluente inicial del embalse Bucaramanga hasta la desembocadura de Las Bocas. Esta área de interés

delimitada proporcionó información útil para la posterior simulación. Esta delimitación se hizo mediante un proceso visual y manual (ver Ilustración 7).

*Ilustración 7. Delimitación de la cuenca / área de interés. Fuente: Google Earth.*



Gracias a las herramientas aportadas por el Software Google Earth PRO, se pudo hacer una primera estimación de medida de longitud del cauce de interés el cual (ver ilustración 8), es de aproximadamente 14,74 Km, así como el área de interés que es de aproximadamente 19.58 Km<sup>2</sup> (ver Ilustración 9).

*Ilustración 8. Estimación longitud cauce principal – Fuente: Google Earth.*

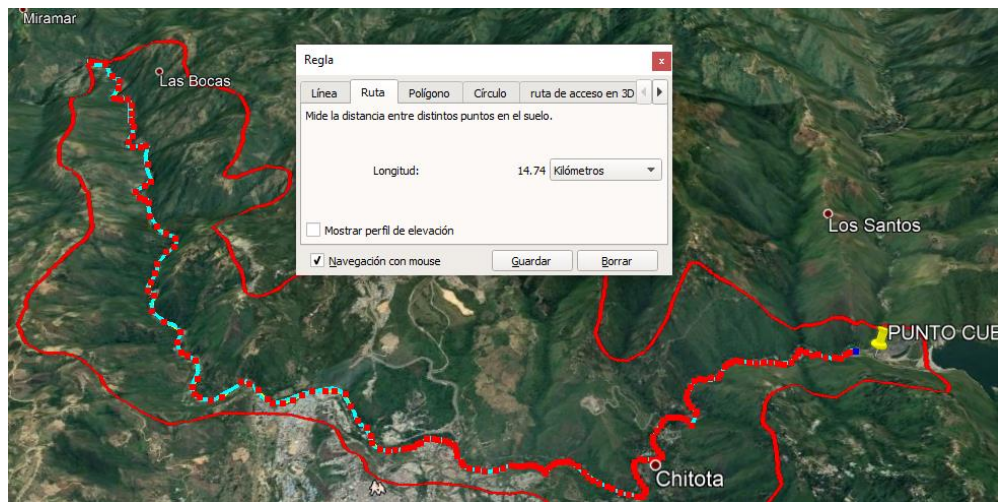
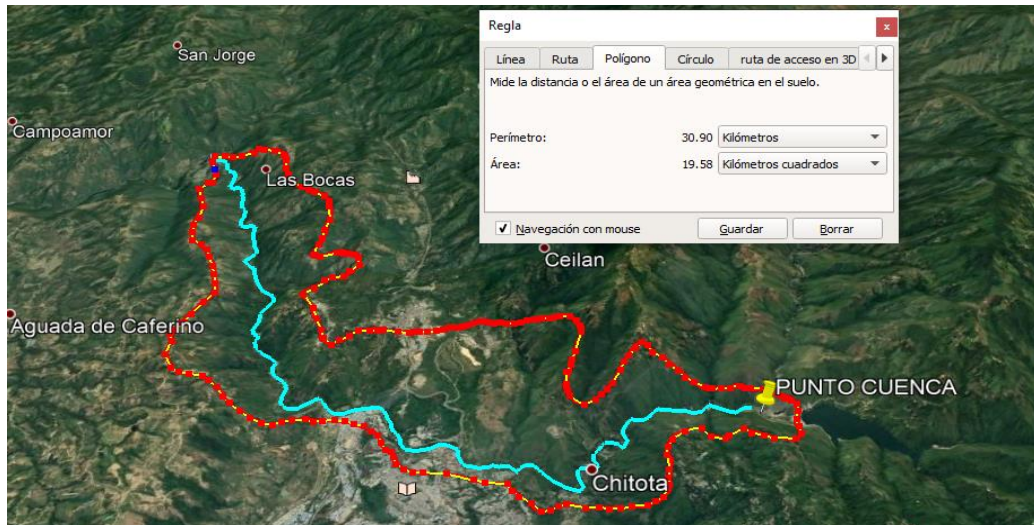


Ilustración 9. Estimación área de interés. Fuente: Google Earth.



**3.1.4 Características área delimitada.** Para la realización del modelamiento y simulación, el área de interés debe ser examinada en aspectos como el tipo de suelo, cobertura vegetal ya que pueden incidir en el modelamiento del cauce por la rotura de la presa del embalse Bucaramanga. Estos datos son consecuentes a la información brindada por estudios previos. Para el tipo de suelo, la geología del lugar arroja resultados para tipo de rocas de característica metamórficas (pizarras, filitas, esquistos verdes) poco meteorizadas. Esta característica predomina a lo largo de toda el área de delimitación. En cuanto a la cobertura vegetal, las imágenes satelitales arrojan un sistema de redes de bosques y árboles que tienden a densificarse en los bordes del cauce circundante. Predomina en la zona de área de interés bosques y pastos. Cerca del área de Las Bocas, se evidencia la presencia de pastos y cultivos. La cantidad de precipitación media anual de la zona es de 670 mm.<sup>7</sup>

<sup>7</sup> INTEGRAL S.A, Memorando técnico 06 - PRESA, Documento Numero I-2128-MT-06-R3, septiembre de 2011.

Ilustración 10. Ilustración 10 Izq. Embalse Bucaramanga; Der. Hidroeléctrica las Bocas.

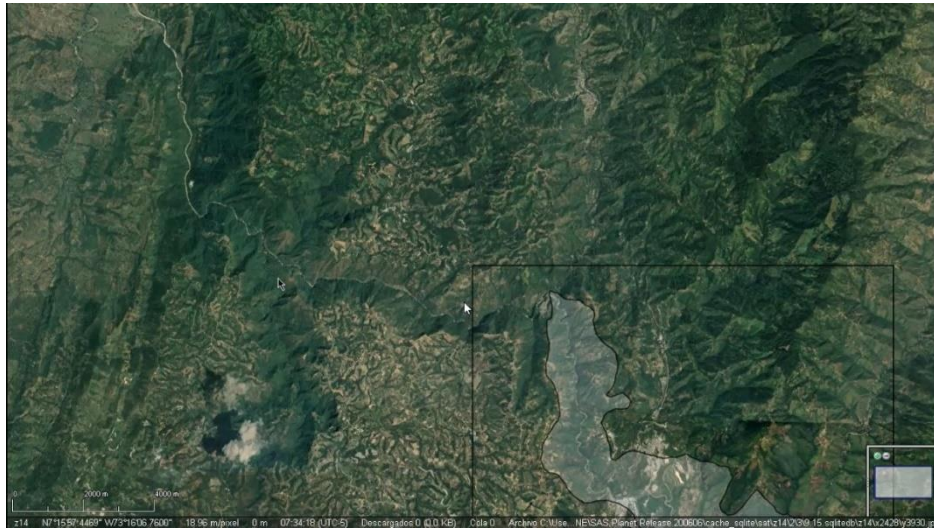


### 3.2 VISITA DE CAMPO

**3.2.1 Reconocimiento y recopilación de datos.** Para el reconocimiento y recopilación de datos mediante exploración por visita de campo, se tenía planeado visitar el área de estudio en un tiempo designado que fue estipulado en el cronograma de actividades. Dada la contingencia que se vive desde mediados de marzo de 2020 por causa del COVID-19, esta información tuvo que ser recopilada por diversas fuentes de internet e investigaciones, ya que no fue posible el desplazamiento al lugar de estudio. Esta información recopilada, arroja datos que afectan el cálculo del coeficiente de rugosidad mediante el método propuesto por *Ven Te Chow*, junto con la metodología CORINE, la cual facilita la información sobre el uso de suelos, tipo de cobertura vegetal y como clasificarlos adecuadamente. Estos datos arrojados por el CORINE son contrastados con la metodología propuesta por *Ven Te Chow*, para lograr obtener el coeficiente de rugosidad (coeficiente de Manning), el cual se requiere como dato de entrada para la simulación en HEC-RAS.

Por medio la herramienta Google Earth Pro y SAS.Planet2006 se logró obtener información requerida para esta investigación.

Ilustración 11. Identificación por imagen satelital. Fuente: SAS.Planet2006.



**3.2.2 Calculo Coeficiente de Rugosidad.** Se pide como dato de entrada para la simulación en Hec-RAS el coeficiente de rugosidad (coeficiente de Manning) que hay a lo largo del cauce. Para poder realizar el cálculo de este coeficiente, fue necesario recurrir a la ecuación de Manning. Esta ecuación nos da como resultado este coeficiente de rugosidad, teniendo en cuenta factores como los materiales involucrados, volumen de vegetación, variaciones en la sección transversal, entre otros.

$$n = (n0 + n1 + n2 + n3 + n4)m5$$

*Ecuación 2. Coeficiente rugosidad Manning. Ven Te Chow.*

*Hidráulica de canales abiertos. pág. (94-96)*

Tabla 4. Valores asignados para los coeficientes ec. Manning.

| Condiciones del Canal                 |                           | Valores   |        |
|---------------------------------------|---------------------------|-----------|--------|
| Material Involucrado                  | Tierra                    | <b>n0</b> | 0,02   |
|                                       | Corte en roca             |           | 0,025  |
|                                       | Grava Fina                |           | 0,024  |
|                                       | Grava gruesa              |           | 0,028  |
| Grado de irregularidad                | Suave                     | <b>n1</b> | 0      |
|                                       | Menor                     |           | 0,005  |
|                                       | Moderado                  |           | 0,01   |
|                                       | Severo                    |           | 0,02   |
| Variaciones de la sección transversal | Gradual                   | <b>n2</b> | 0      |
|                                       | Ocasionalmente alternante |           | 0,005  |
|                                       | Frecuentemente altemante  |           | 0,012  |
| Efecto relativo de obstrucciones      | Insignificante            | <b>n3</b> | 0      |
|                                       | Menor                     |           | 0,012  |
|                                       | Apreciable                |           | 0,0025 |
|                                       | Severo                    |           | 0,05   |
| Vegetación                            | Baja                      | <b>n4</b> | 0,008  |
|                                       | Media                     |           | 0,018  |
|                                       | Alta                      |           | 0,035  |
|                                       | Muy alta                  |           | 0,08   |
| Grado de los efectos por meandros     | Menor                     | <b>m5</b> | 1      |
|                                       | Apreciable                |           | 1,15   |
|                                       | Severo                    |           | 1,3    |

Al realizar el análisis espacial del área de interés (cuenca delimitada) se pudo ver que predomina un tipo de vegetación en específico. Los pastos predominantes a lo largo del cauce, tienen su afectación en este cálculo del coeficiente de Manning, por lo que se encuentran a los costados de la sección por ende se asignaron valores para la vegetación de 0.035. Para las partes donde el cauce tiene una curva pronunciada (meandros), se tendrá en cuenta valores entre 1,15 y 1,3. Para el manejo de la variabilidad de las secciones transversales, se manejaron valores entre 0.005 y 0,012. Los coeficientes de Manning estimados fueron,  $n = 0,05$  para el cauce central y de  $n = 0,035$  para las laderas del terreno natural debido a la presencia de vegetación tipo pastos.

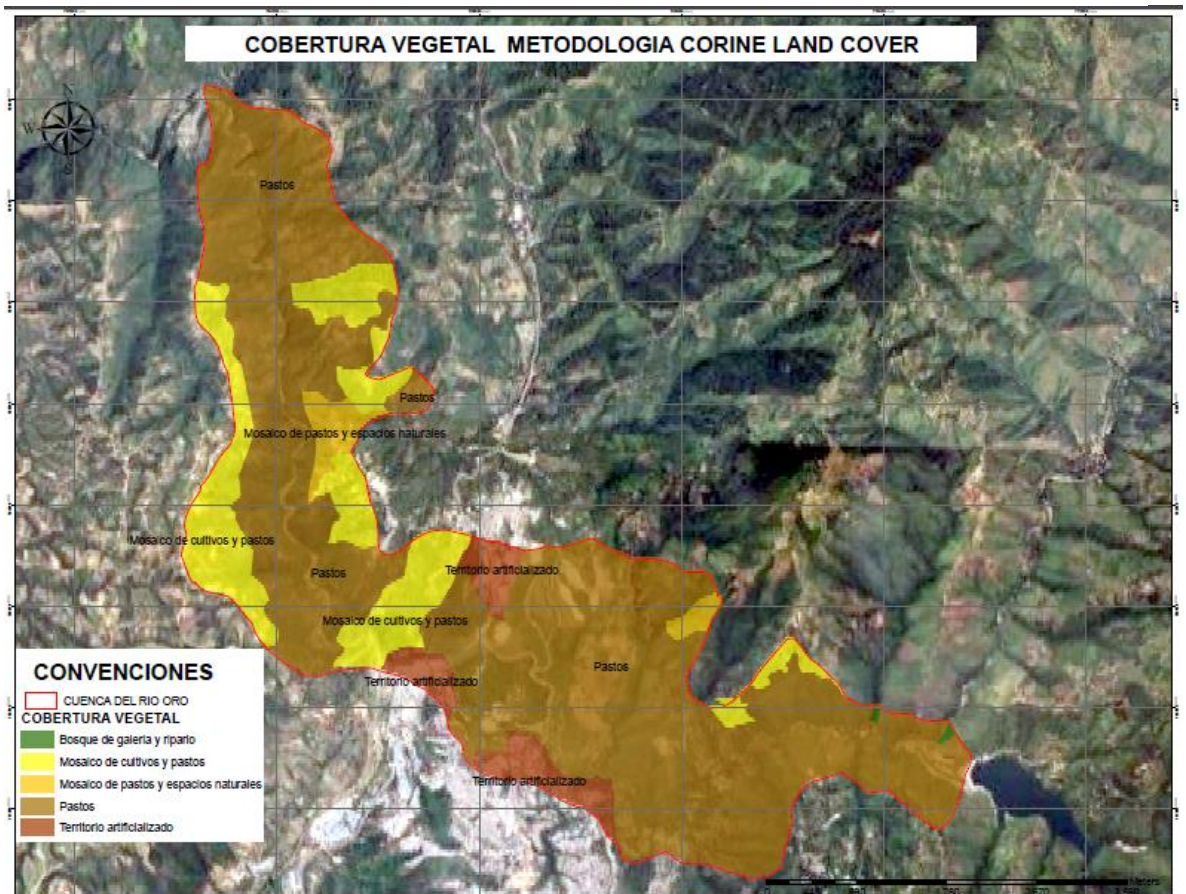
### 3.3 SIMULACIÓN

Para realizar la simulación del cauce generado por la rotura del embalse Bucaramanga, se requiere datos morfométricos de esta. Estos datos suministran información necesaria para poder cumplir con lo que requiere el software HEC- RAS como datos de entrada.

### 3.3.1 COBERTURA VEGETAL.

**3.3.1.1 Metodología Implementada.** En la cuenca de estudio se localiza una diversidad en su cobertura vegetal la cual comprende una biomasa de 5 unidades con diferentes características de las cuales se destacan la cobertura de pastos de la extensión total de la cuenca analizada. Para esto se definen las unidades y se describen con base en la metodología CORINE LAND COVER leyenda nacional de coberturas vegetales para Colombia. La clasificación, interpretación y mapeo se realizó a través de herramientas de sistemas de información geográfica (SIG).

*Ilustración 12. Cobertura vegetal metodología CORINE LAND COVER. Fuente. Autores.*



### **Bosque de galería y ripario**

Se refiere a las coberturas constituidas por vegetación arborea localizada en los márgenes de curso de aguas permanentes o temporales. Este tipo de cobertura está limitada por su amplitud, ya que bordea los cursos de agua y drenajes naturales.

### **Mosaico De Pastos Y Cultivos**

Comprende las tierras ocupadas por pastos y cultivos, en los cuales el tamaño de las parcelas es muy pequeño y el patrón de distribución de los lotes es demasiado intrincado para representarlos cartográficamente de manera individual.

### **Mosaico de Cultivos, Pastos y Espacios Naturales**

Comprende las superficies del territorio ocupadas principalmente por coberturas de cultivos y pastos en combinación de espacios naturales, en este tipo de cobertura no se puede representar individualmente, los espacios naturales poseen relictos de bosque natural, arbustales, bosques de galería y ripario, y otras áreas no intervenidas o poco transformadas.

### **Pastos**

Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por la familia Poaceae, dedicadas a pastoreo permanente por un período de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente.

## Territorios Artificiados

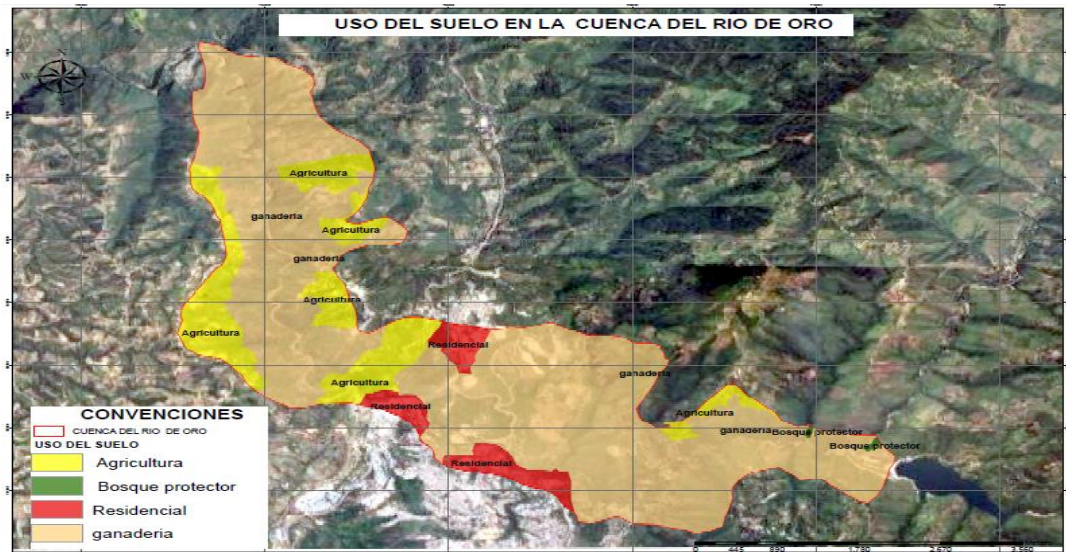
Las zonas urbanizadas están constituidas por territorios cubiertos por infraestructura urbana como redes de comunicación y espacios verdes esta a su vez subdividen en: Tejido urbano continuo y tejido urbano discontinuo.<sup>8</sup>

### 3.3.2 USO DEL SUELO

El uso del suelo comprende "las acciones, actividades e intervenciones que realizan las personas sobre un determinado tipo de superficie para producir, modificarla o mantenerla".

El uso del suelo abarca la gestión y modificación del medio ambiente natural para convertirlo en terreno agrícola: campos cultivables, pastizales; o asentamientos humanos. El término uso del suelo también se utiliza para referirse a los distintos usos del terreno en zonificaciones. Para el caso de la cuenca de estudio se tuvo en cuenta el plan de ordenamiento territorial de Bucaramanga 2014-2027.<sup>9</sup>

Ilustración 13. Usos de suelo. Fuente. Plan de ordenamiento territorial Bucaramanga 2014-2027.



<sup>8</sup> ARDILA, N. J. M., & García, U. G. M. (Eds.). (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: Escala 1: 100.000. IDEAM.

<sup>9</sup> Gobernación de Santander, Plan de ordenamiento territorial (POT), (2014-2027).

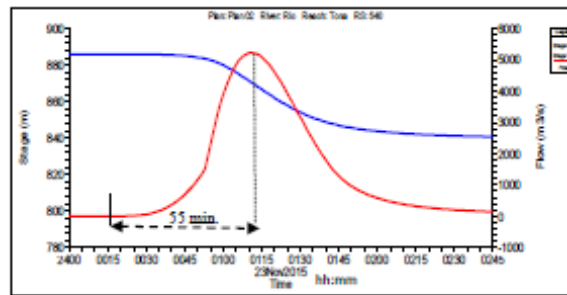
### 3.3.3 HIDROGRAMAS

Los hidrogramas de salida del flujo presentados a continuación fueron estimados utilizando software HEC-RAS para simular los dos escenarios de rotura para la presa del embalse de Bucaramanga.

#### *Descripción de graficas de los hidrogramas*

El color rojo representa el caudal, el color azul el nivel del tirante hidráulico, la ordenada derecha el caudal, la ordenada izquierda el nivel del tirante hidráulico y en la abscisa el tiempo de simulación.

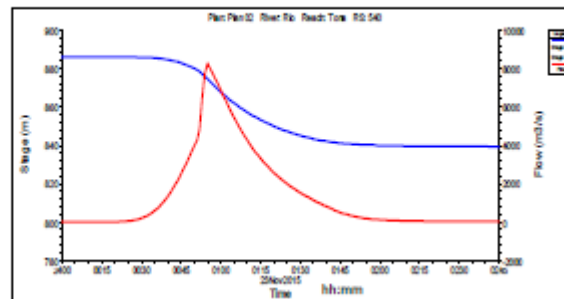
**Gráfica 1. McDonald y Langridge-Monopolis (1984): 1.41h; 17.72 m; 1h: 0.5v**



[1]

En la Gráfica 1 el caudal pico de la rotura de la presa es de 5337 m<sup>3</sup>/s y el tiempo pico se presenta 55 min.

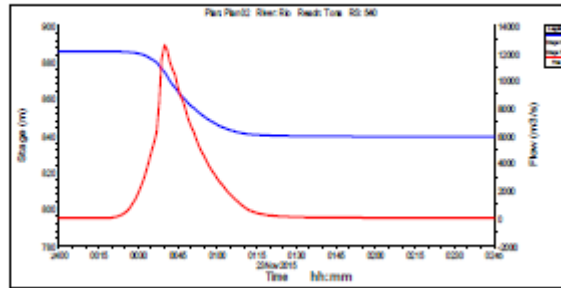
**Gráfica 2. USBR; Reclamation (1988): 1.53h; 87.2m; 1h: 1v**



[2]

En la Gráfica 2 el caudal pico es de 8258 m<sup>3</sup>/s y el tiempo en que alcanza este pico se produce 40 min.

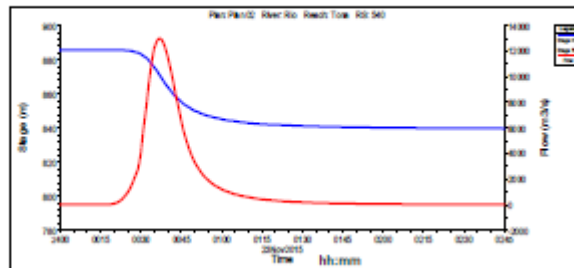
**Gráfica 3. Von Thum & Gillette (1990): 0.92h; 118.85m; 1h: 1v**



[3]

En la Gráfica 3 el caudal pico de la rotura de la presa es de 12570 m<sup>3</sup>/s y el tiempo pico se presenta 25min.

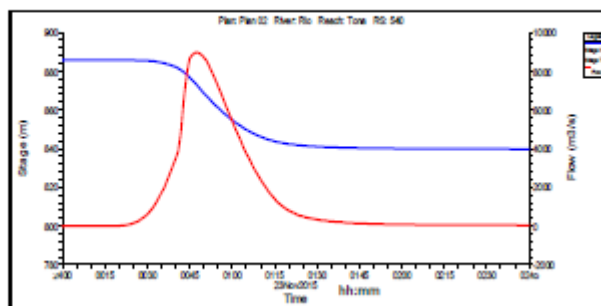
**Gráfica 4. Froehlich (1995) 0.50h; 22.61m; 1h: 1v**



[4]

En la Gráfica 4 el caudal pico de la rotura de la presa es de 12988 m<sup>3</sup>/s y el tiempo pico se presenta 22min.

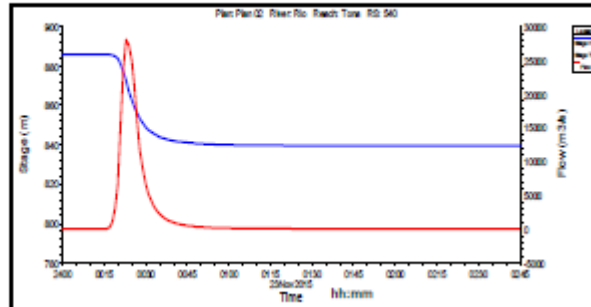
**Gráfica 5. FERC (1987) 1h; 52.30m; 1h: 1v**



[5]

En la Gráfica 5 el caudal pico de la rotura de la presa es de 8960 m<sup>3</sup>/s y el tiempo pico se presenta 32 min.

**Gráfica 6. FERC (1 TYPESA-ECM 1996 0.19h; 79.06 m; 1h: 1v**



[6]

En la Gráfica 6 el caudal pico de la rotura de la presa es de 28071 m<sup>3</sup>/s y el tiempo pico se presenta 8 min después.

*Fuente [1,2,3,4,5,6]: Estimación Del Hidrograma De Salida En La Hipotética Rotura De La Presa Del Proyecto De Regulación Del Río Tona - Embalse De Bucaramanga:201*

### **3.3.4 HUELLAS DE INUNDACIÓN APARTIR DE LOS CAUDALES DE LOS HIDROGRAMAS.**

Para la evaluación de inundaciones la USACE (United States Army Corps of Engineers) creó un modelo hidráulico unidimensional llamado Hec-RAS, donde se pueden establecer modelaciones de flujo tanto estacionarios como no estacionarios y HEC-GEORAS aplicaciones de Hec-RAS para entornos GIS como ArcGis donde permite generar la geometría del cauce.<sup>10</sup> El módulo Hec-RAS fue diseñado para generar simulaciones en diferentes factores de flujo como lo son permanentes,

<sup>10</sup> Hec.usace.army.mil. 2021. HEC-RAS Downloads. [Online] Available at: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/download.aspx>> [Accessed 17 January 2021].

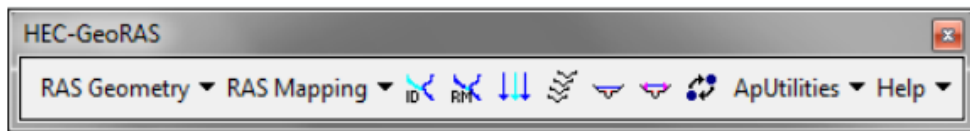
semipermanentes y no permanentes. Para la simulación el Hec-RAS se deben tener:

- Modelo Digital del Terreno (TIN o DEM)
- Imágenes satelitales
- Cobertura vegetal o uso actual del suelo
- Cuenca hidrográfica
- Caudales máximos generados en los hidrogramas de ruptura de presa, para evaluar

La metodología se divide en dos fases:

### 3.3.5 FASE 1 HEC GEO- RAS ARCGIS.

Ilustración 14. Barra menú herramienta HEC- GeoRAS.

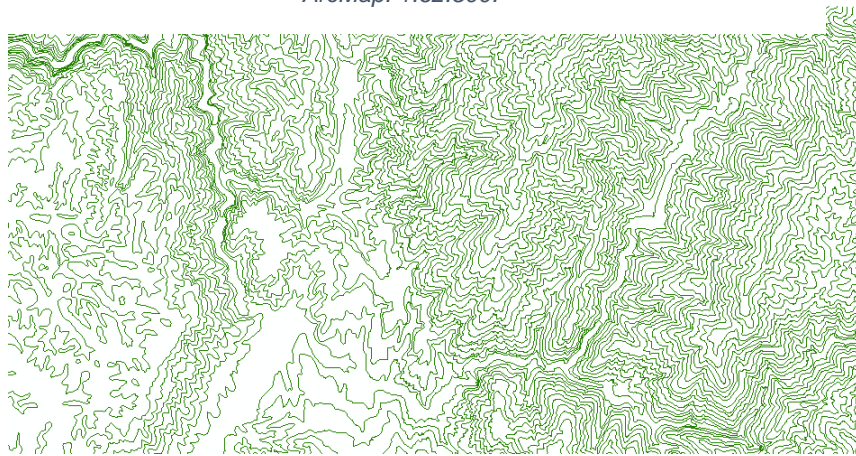


Para el montaje de la simulación del tránsito del hidrograma de rotura del embalse, se recopiló información cartográfica en *archivos shapefile* del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), que sirvieron como parámetros de comparación para analizar la precisión y calidad del modelo digital del terreno, el cual constituye la base de dicha simulación. A continuación, se expondrá detalladamente el procedimiento para generar la geometría del cauce principal en el software ArcMap.

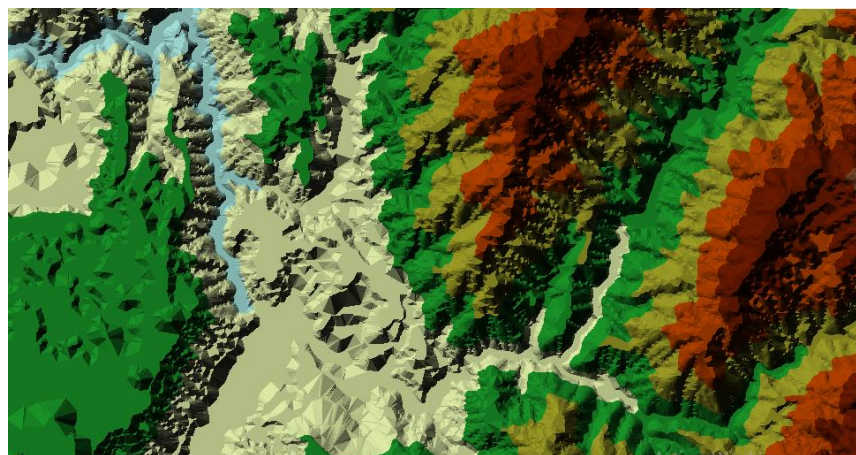
**3.3.5.1 Curvas de nivel y modelo digital del terreno.** El insumo más importante de este trabajo es un levantamiento topográfico adecuado; inicialmente se usaron datos de curvas de nivel del IGAG a escala 1:25.000 y separación cada 75 [m], puesto que no se encontró esta data en una escala más apropiada como lo sería la 1:10.000, la cual ofrecería una mejor disposición de detalles del trayecto y secciones


transversales de los cauces a analizar; sin embargo al procesar la información topográfica para generar el modelo digital del terreno [TIN], se observó una evidente falta de precisión, puesto que el modelo obtenido mostró un lecho de los cauces que afectan el análisis de la simulación con un área considerable de planos inclinados, tal como se muestra en la ilustración 2; esto por supuesto no permite abordar en detalle el cauce ni la geometría de las secciones transversales.

*Ilustración 15. Curvas de Nivel correspondientes a las planchas 109IVC - 109IVD proporcionado por el IGAC. Escala del mapa en el área de trabajo de ArcMap: 1:62.500.*



*Ilustración 16. Modelo digital del terreno generado por las curvas de nivel del IGAC. Escala del mapa en el área de trabajo de ArcMap: 1:62.500*



En contraste con lo anterior se procedió a la búsqueda de curvas de nivel más apropiadas, pero con la misma escala 1:25.000. El resultado fue producto del uso de los softwares Google Earth y Global Mapper, en los cuales se identificó la zona de análisis y se descargó información cartográfica respectivamente. Con el Global Mapper mediante su herramienta de búsqueda en base de datos cartográficos a través del mundo [ *Connect to online data*] se obtuvo acceso a los datos de modelo de elevación del terreno en buena calidad y posteriormente las curvas de nivel, las cuales configuramos para que se generaran cada 5 m, considerando que así se obtendría mayor detalle al generar el modelo TIN en ArcMap. El servidor con el que se conecta Global Mapper para obtener el modelo de elevación del terreno es el satélite SRTM y su base de datos *Worldwide elevation data*, el cual funciona con un sistema de antenas de radar con dos reflectores los cuales están separados uno del otro 60 metros y cuya técnica de captación de imágenes y datos de elevación topográfica consiste en el manejo de software interferométrico, el cual funciona combinando la luz captada por los reflectores en las antenas de radar superponiéndola a la imagen que genera el radar mismo, creando así imágenes con una resolución mayor, lo cual permite obtener un conjunto de curvas de nivel bastante detallado, que posteriormente se trató con el software ArcGis.

*Ilustración 17. Curvas de nivel, generadas y extraídas de Global Mapper, con la información topográfica del SRTM Worldwide elevation data. Escala en el campo de trabajo de ArcMap 1:62.500.*

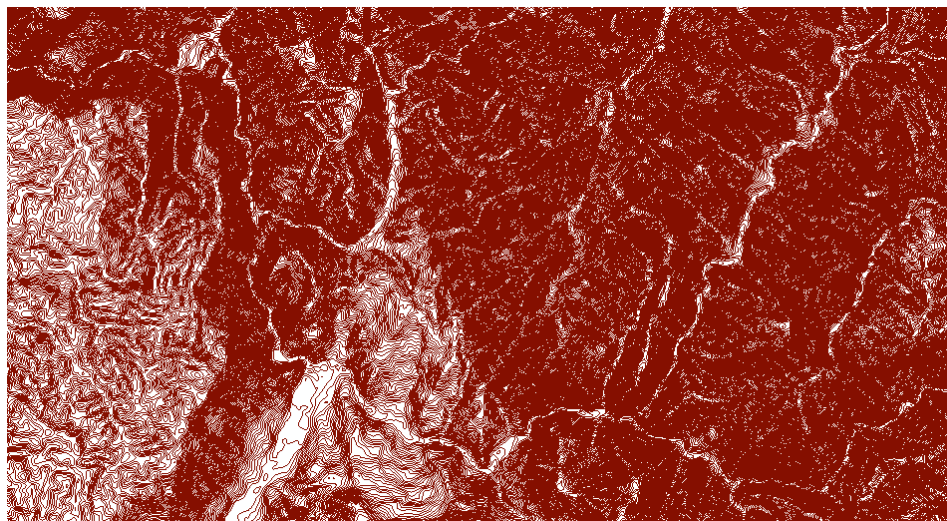
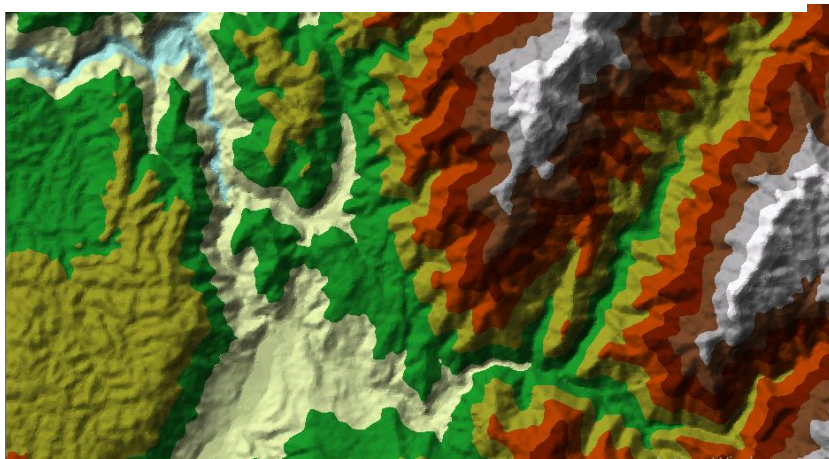


Ilustración 18. Modelo digital del terreno [TIN] generado en ArcMap a partir de las curvas de la ilustración3. Escala en el área de trabajo de ArcMap 1:62.500.

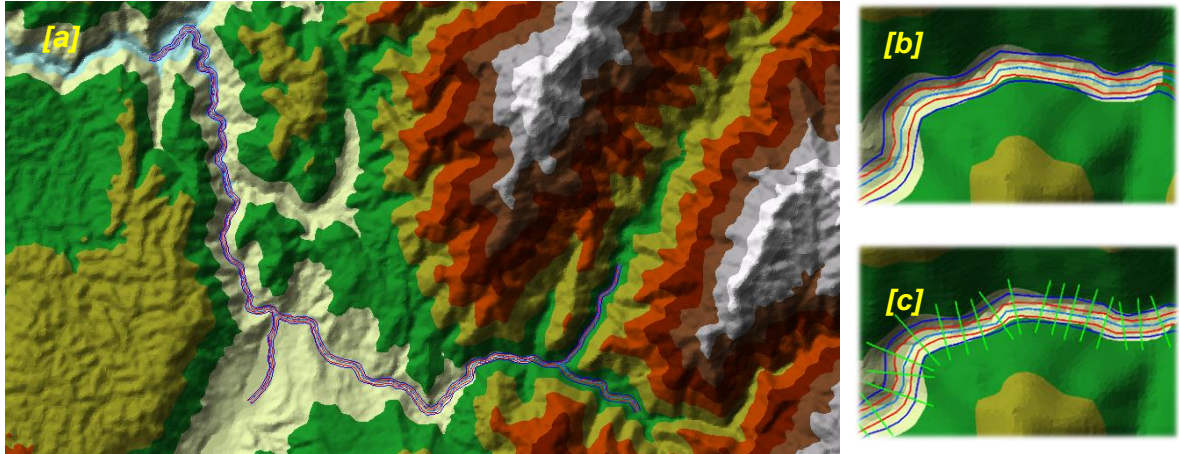


**3.3.5.2 Geometría del cauce.** Luego de considerar el modelo digital del terreno de la ilustración 18, se procede a generar los parámetros geométricos del río con las herramientas Hec-Geo RAS de ArcMap. Primero que todo se traza una polilínea por la zona que se considera será la trayectoria del cauce principal del río Tona hasta llegar a la zona de la pequeña hidroeléctrica Las Bocas, con la función de *Stream Centerline*. Después con la herramienta *Banks Lines* se procede a generar los bancos laterales que demarcarán la zona del cauce principal cuando el río se encuentra en condiciones normales de profundidad, seguido de los *Flowpaths* que corresponden a polilíneas externas que encierran a los bancos laterales y a la línea central del río, y que representan el centro de masas de las llanuras de inundación y a su vez actúan como líneas ejes por donde circula el agua y que determinan la dirección del flujo. Finalmente se trazan las líneas que representarán las secciones transversales *XS Cut Lines*; estas deben trazarse en sentido *aguas abajo*, y su trazado debe ser siempre desde el margen izquierdo al derecho del campo de trabajo de ArcMap.

A continuación, en la ilustración 19 se puede observar lo anterior, en donde a) es el trazado completo de la trayectoria de *Stream Centerline*, *Banks Lines*, y *Flowpaths*; b) es una imagen aumentada del trazado de las anteriores líneas en donde del

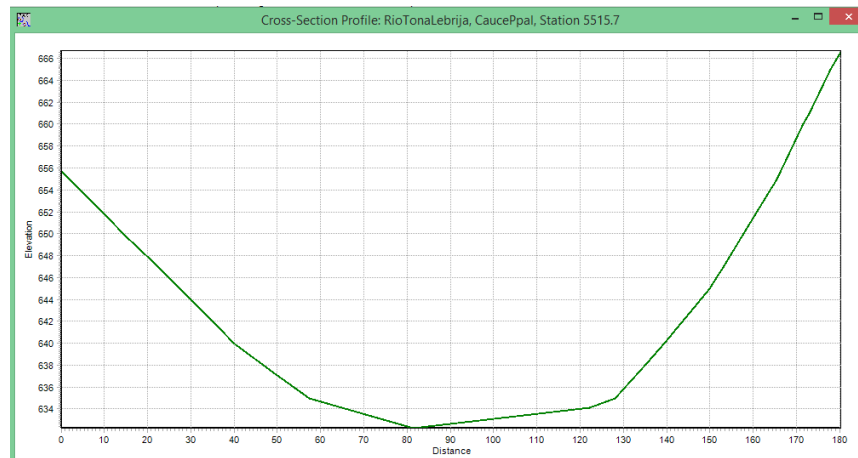
centro hacia afuera se observan *Stream Centerline*, *Banks Lines*, y *Flowpaths*; c) secciones transversales con una aproximación a la perpendicularidad a los *Flowpaths*.

Ilustración 19. a) Trazado completo de: *Stream Centerline*, *Banks Lines*, y *Flowpaths*; b) *Stream Centerline*, *Banks Lines*, y *Flowpaths*; c) Secciones Transversales. Fuente: los autores.



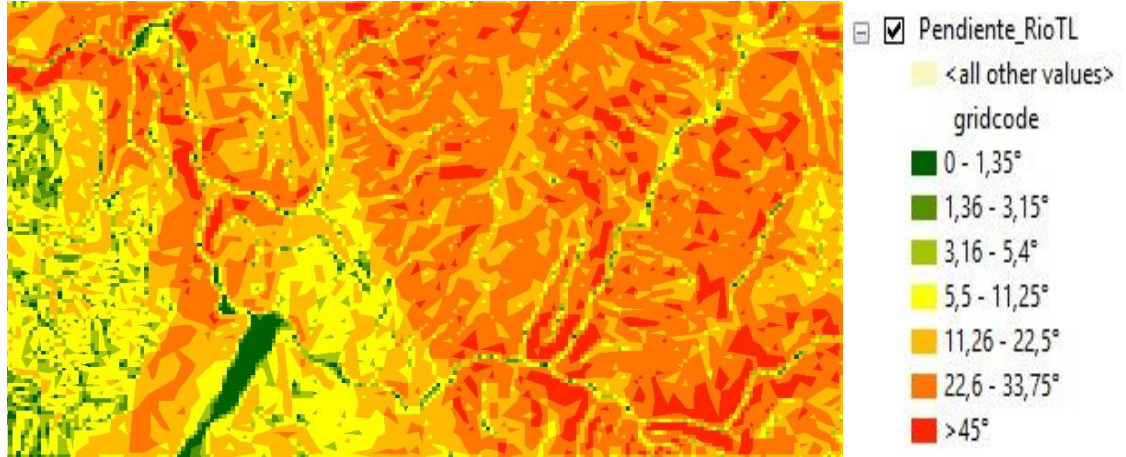
Se debe aclarar que luego de este procedimiento se concluye con generar los atributos tridimensionales del *Stream Centerline* y las *XS Cut Lines*, esto a través de las combinaciones matemáticas y geométricas que procesa el software. Finalmente se pueden observar y revisar las secciones transversales una a una si se desea (ver ilustración 20).

Ilustración 20. Sección transversal tomada como ejemplo del modelo geométrico realizado para la simulación.



### 3.3.5.3 Pendiente del cauce

Ilustración 21. Mapa de pendientes con valores estipulados de las 7 categorías de clasificación según el IGAC. Correspondencia en porcentaje de estas categorías: 0-3%, 3-7%, 7-12%, 12-25%, 25-50%, 50- 75%, >75%.

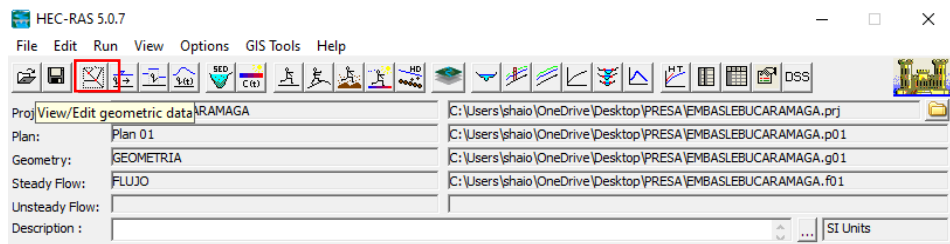


### 3.3.6 FASE 2 EN HEC-RAS.

Al exportar los datos geométricos del Hec Geo Ras, se debe iniciar el proceso en Hec-Ras iniciando un nuevo proyecto e importando los datos ya realizados, además de crear los archivos de flujo.

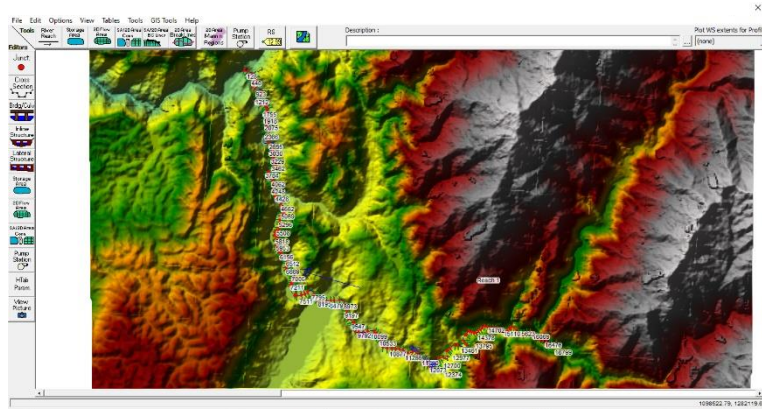
**3.3.6.1 Metodología en Hec-RAS.** Una vez se ha exportado de Hec GEO-RAS a Hec-RAS, se hace uso de la opción View/Edit Geometric Data para poder visualizar las secciones exportadas desde Hec GEO-RAS (ver ilustración 22).

Ilustración 22. Carga de datos exportados en HEC-RAS.

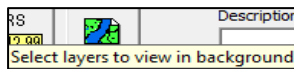


Al poder visualizar el diseño del cauce junto con las secciones transversales también se verá consigo el terreno sobre el cual fue modelado (ver ilustración 23).

Ilustración 23. Esquema con secciones transversales, cauce y modelo digital.



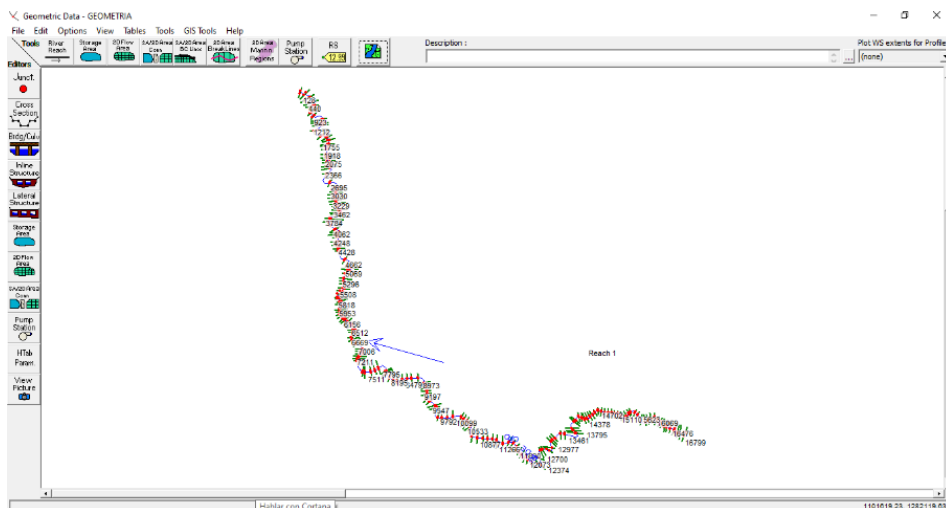
Se hizo uso de la opción



/select \_layers\_ to\_view\_in

\_background / para retirar la capa del terreno y dejar únicamente el flujo principal con las secciones transversales (ver ilustración 24).

Ilustración 24. Esquema con secciones transversales y cauce.



Para los valores de rugosidad / coeficiente de Manning se tiene en cuenta los valores calculados para la sección del tramo (ver anexos) y para cobertura vegetal se toma un valor de 0.035.

|                 |                  |  |       |       |       |
|-----------------|------------------|--|-------|-------|-------|
| 2. Flood Plains |                  |  |       |       |       |
| a.              | Pasture no brush |  | 0.025 | 0.030 | 0.035 |
| 1.              | Short grass      |  | 0.030 | 0.035 | 0.050 |
| 2.              | High grass       |  |       |       |       |

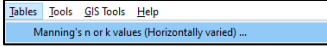
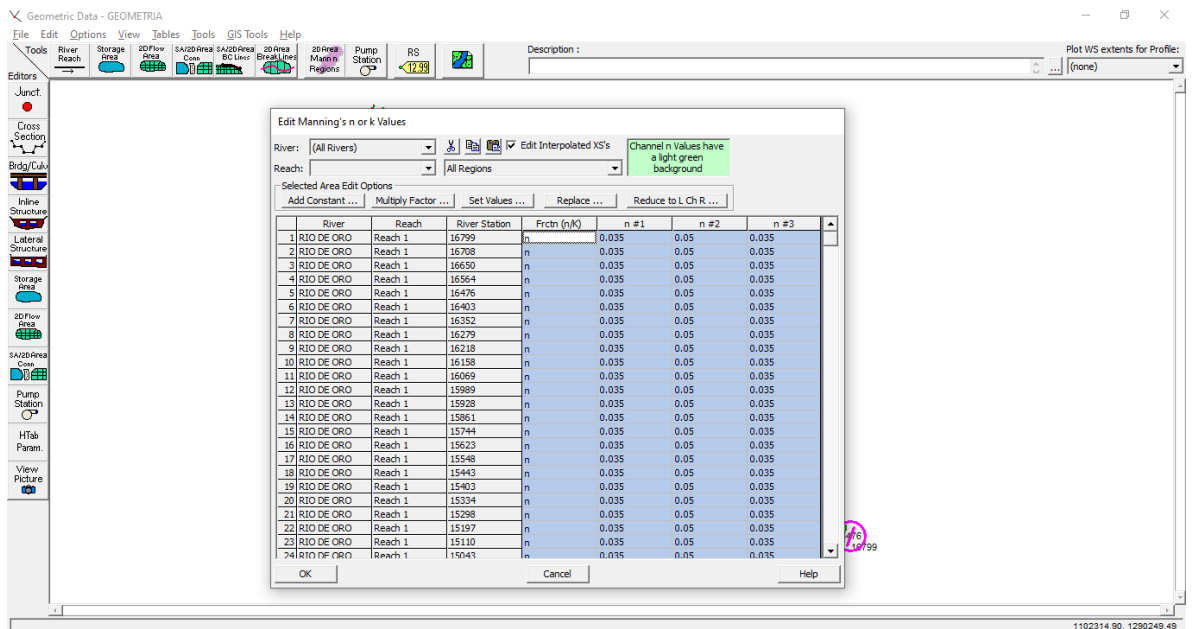
Se usó la opción *tables/Manning's n*  para asignar estos valores de rugosidad a las secciones transversales a lo largo del cauce (ver ilustración 25).

Ilustración 25. Asignación de coeficientes de Manning.



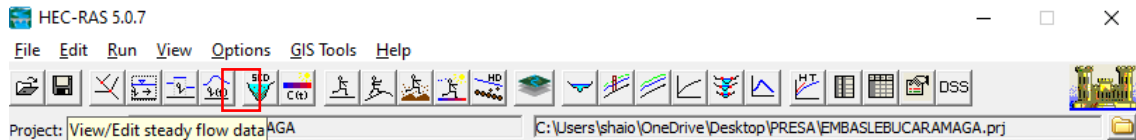
Una vez agregados los coeficientes de rugosidad, procedemos a agregar los valores de caudales picos extraídos de los hidrogramas de rotura.

Tabla 5. Caudales pico. Métodos para H1. Fuente: Estimación Del Hidrograma De Salida En La Hipotética Rotura De La Presa Del Proyecto De Regulación Del Río Tona - Embalse De Bucaramanga:2016

| NOMBRE (Fecha)                        | H1                      | H2                      |
|---------------------------------------|-------------------------|-------------------------|
|                                       | Qp. (m <sup>3</sup> /s) | Qp. (m <sup>3</sup> /s) |
| McDonald y Langridge-Monopolis (1984) | 5337                    | 5786                    |
| USBR; Reclamation (1988)              | 8258                    | 5675                    |
| Von Thum & Gillette (1990)            | 12570                   | -                       |
| Froehlich (1995)                      | 12988                   | 14685                   |
| FERC (1987)                           | 8960                    | 8677                    |
| TYPSA-ECM 1996                        | 28071                   | 33557                   |

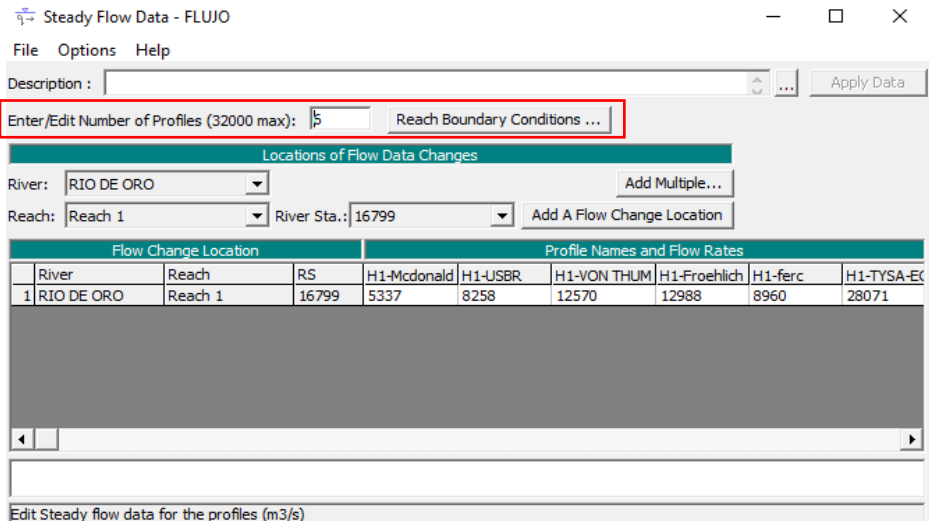
Para agregar los caudales pico a la simulación, se requiere del uso de la opción de `/steady_flow_data`

Ilustración 26. Interfaz/herramienta adición caudales pico.



Dado que los caudales pico calculados mediante los hidrogramas de rotura son 6 se procede a agregar los 6 datos mediante la opción `/Reach_Boundary_Conditions`

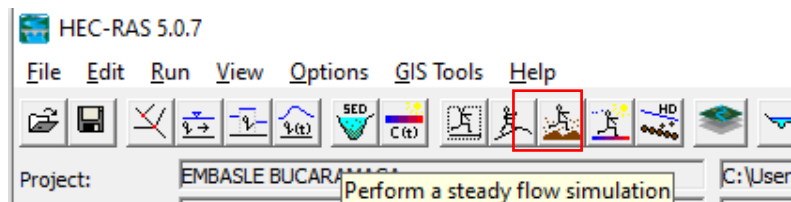
Ilustración 27. Interfaz/Herramienta adición de seis métodos (Criterios caudales pico).



Esto garantiza que la simulación se hará bajo los 6 criterios de caudales pico calculado por los 6 métodos; McDonald, USBR, VON THUM, Froehlich, Ferch, TYPASA.

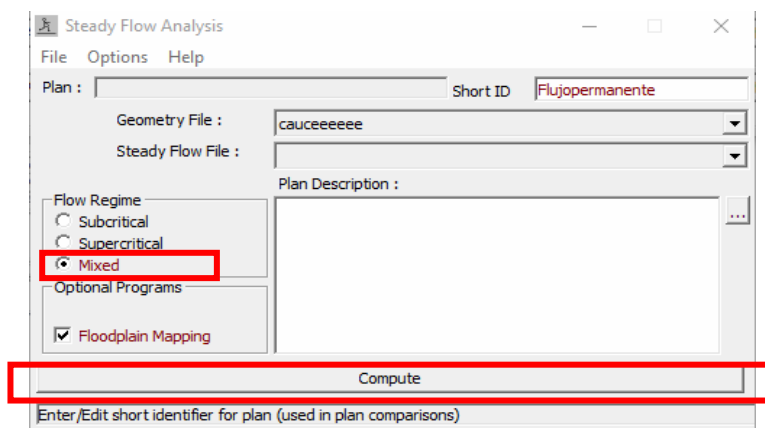
Una vez agregados estos parámetros (ver ilustración 27), se puede proceder a correr la simulación posterior al cómputo. Para realizar el cómputo es necesario hacer uso de la herramienta /*Steady\_Flow\_Simulation*.

Ilustración 28. Interfaz/Herramienta para cómputo.



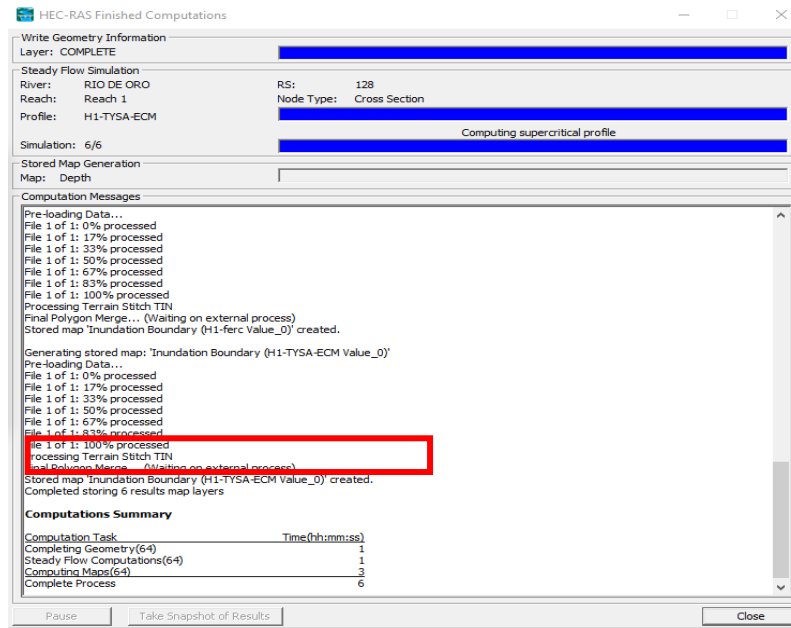
Por último, se corre el modelo hidráulico en condición de flujo permanente (la ecuación de la energía no será incluidos términos que dependan del tiempo), generando el plan en régimen de flujo subcrítico y elegimos la opción /*compute* (ver ilustración 29).

Ilustración 29. Asignación de régimen de flujo y computado.



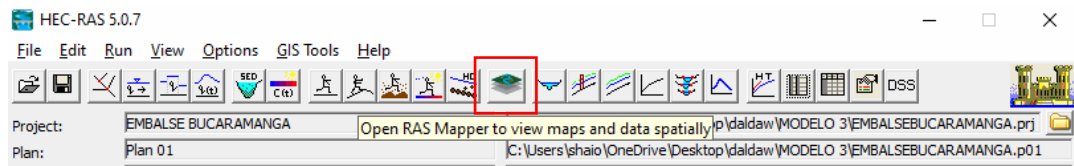
Se asegura que el proceso haya completado

Ilustración 30. Finalización estado de cómputo.



Finalmente, para generar las huellas de inundación se hace uso de la opción */View\_maps\_and\_data\_spatially* (ver ilustración 31).

Ilustración 31. Interfaz/Herramienta generación huella inundación.



## Simulación bajo flujo permanente para el método TYPASA

Al realizar el análisis espacial del área de interés se pudo ver que predomina un tipo de vegetación en específico. Los pastos predominantes a lo largo del cauce tienen su afectación en este cálculo del coeficiente de Manning, por lo que se encuentran a los costados de la sección por ende se asignaron valores para la vegetación de

0.035. Para las partes donde el cauce tiene una curva pronunciada (meandros), se tendrá en cuenta valores entre 1,15 y 1,3. Para el manejo de la variabilidad de las secciones transversales, se manejaron valores entre 0.005 y 0,012.

Los coeficientes de Manning estimados fueron,  $n = 0,05$  para el cauce central y de  $n = 0,035$  para las laderas del terreno natural debido a la presencia de vegetación tipo pastos. Para las zonas donde el cauce colinda con áreas urbanas, se tendrán tramos donde el valor de  $n$  para la línea central del cauce es de 0,05 y para las laderas el valor de  $n$  será de 0.066 o 0,075.

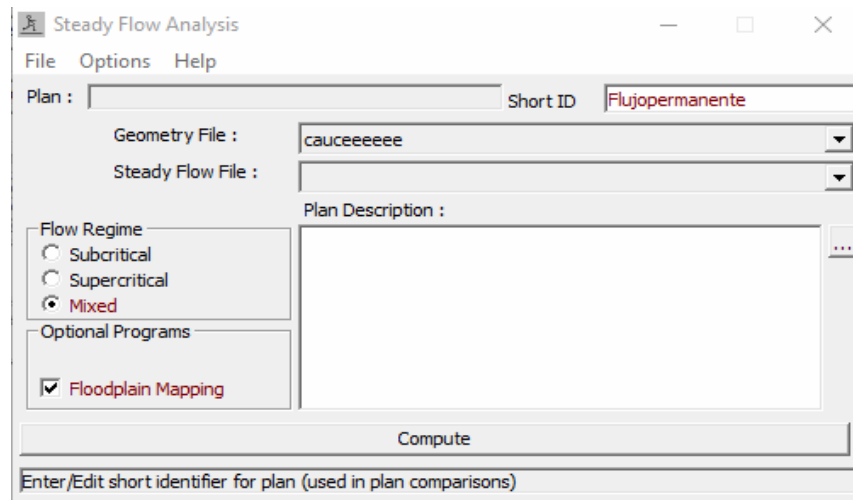
Una vez agregados los coeficientes de rugosidad, se adjuntaron los valores de caudales picos extraídos del hidrograma de rotura con un valor correspondiente a un intervalo de tiempo de 2 minutos para cada uno (ver ilustración 32) del método TYPESA, que están adjuntados en la gráfica 6.

*Ilustración 32. Asignación de caudales método TPYSA por intervalos de tiempo.  
Fuente: Casallas & Chacón.*

| Flow Change Location |         |       | Profile Names and Flow Rates |           |           |           |           |           |
|----------------------|---------|-------|------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| River                | Reach   | RS    | TYPESA-18                    | TYPESA-20 | TYPESA-22 | TYPESA-24 | TYPESA-26 | TYPESA-28 |
| 1 TONALEBRIJA        | Reach 1 | 14342 | 800                          | 2000      | 11500     | 28071     | 17500     | 8800      |

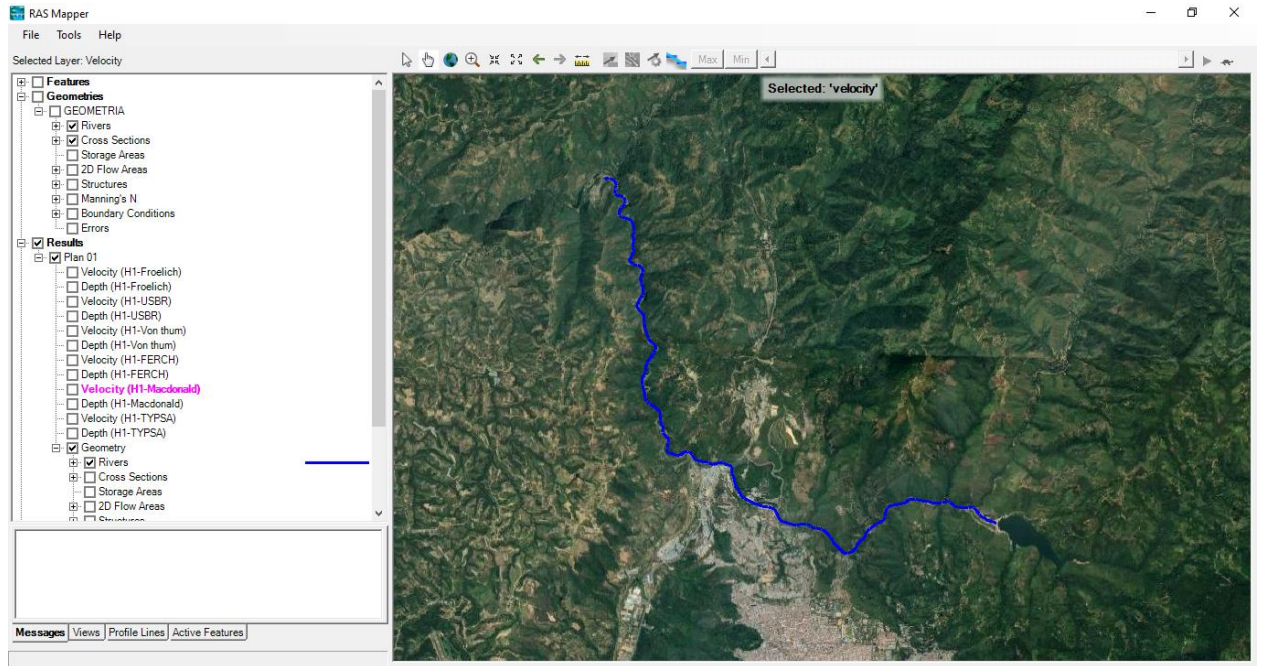
Esto garantiza que la simulación se hará bajo los criterios de caudales pico calculado por el método de TYPISA [5]. Por último, se corrió el modelo hidráulico en condición de flujo permanente /steady\_flow\_data y se eligió la opción /compute (Ver ilustración 33).

*Ilustración 33. Asignación para flujo permanente/Régimen mixto. Fuente: Los autores.*



## 4. RESULTADOS

Ilustración 34. Trazo aproximado de la trayectoria del cauce del río Tona-Lebrija.



Debido a las limitantes topográficas y batimétricas, el análisis se hizo teniendo en cuenta la trayectoria aproximada que se muestra a continuación (ver ilustración 34).

**4.1 Huellas de inundación.** Tomando en cuenta los datos de los 6 hidrogramas obtenidos por los métodos de: McDonald, USBR, VON THUM, Froehlich, Ferch, TYPASA, suministrados por la tesis de Casallas y Chacón, se desarrolló la simulación en HEC-RAS y se obtuvieron los siguientes resultados.

Ilustración 36. Huella de inundación y profundidad por método McDonald.

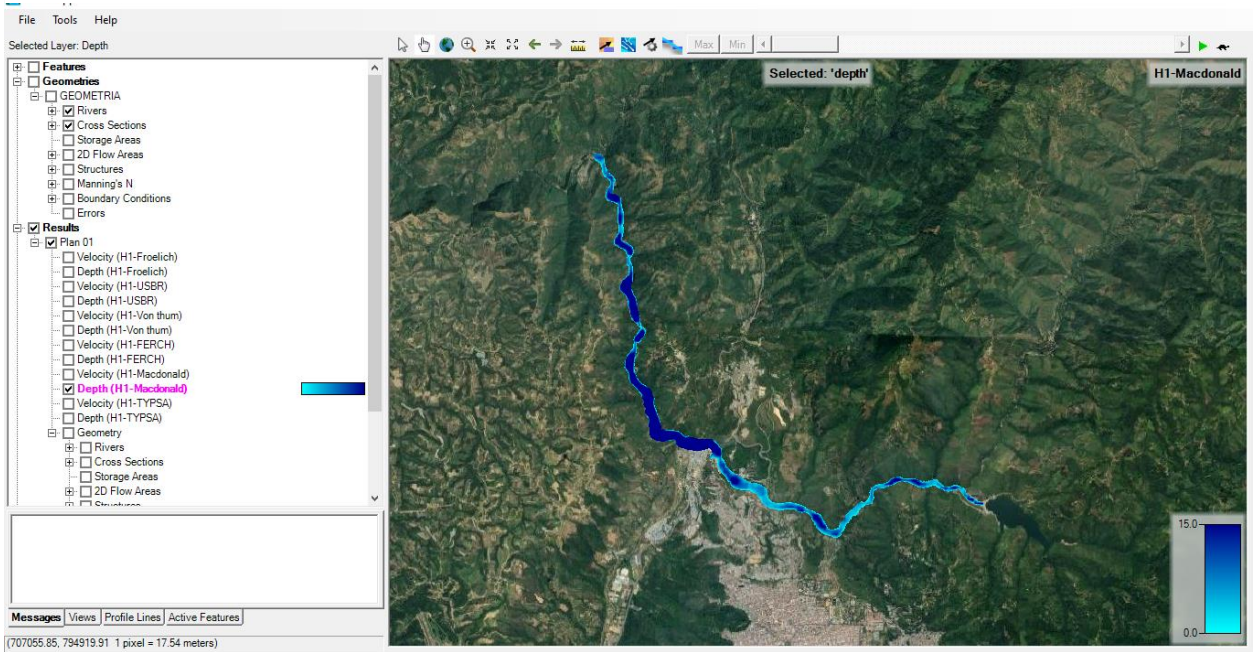


Ilustración 35. Huella de inundación y profundidad por método USBR.

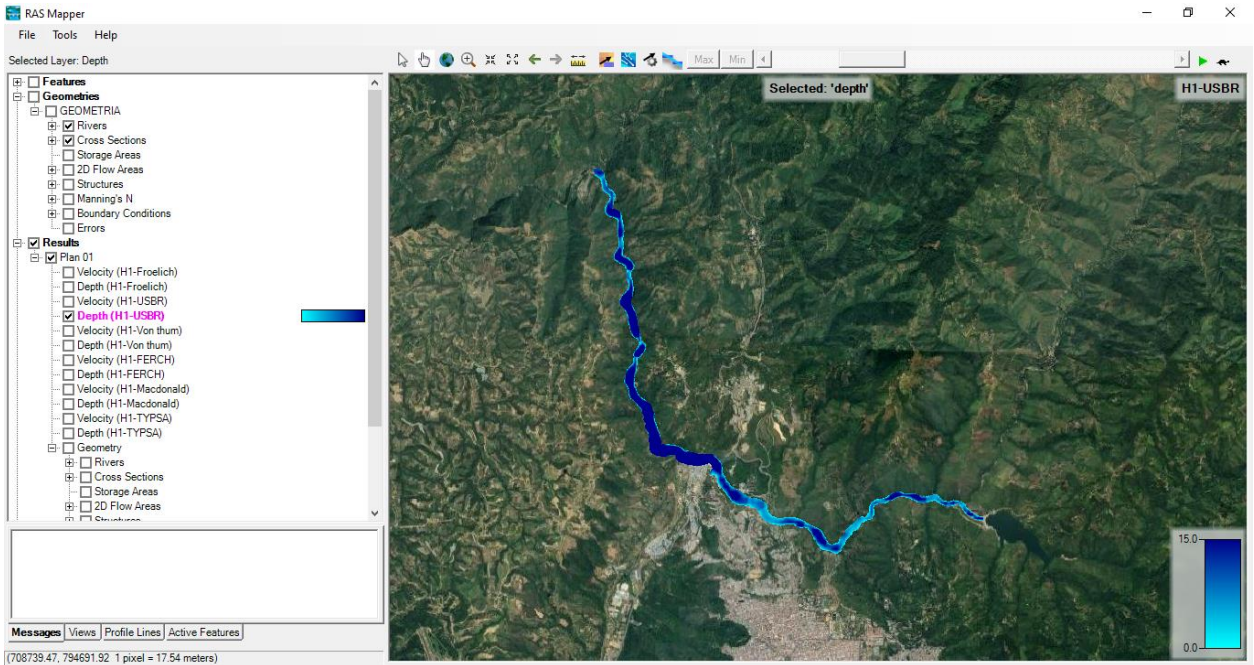


Ilustración 37. Huella de inundación y profundidad por método FERCH.

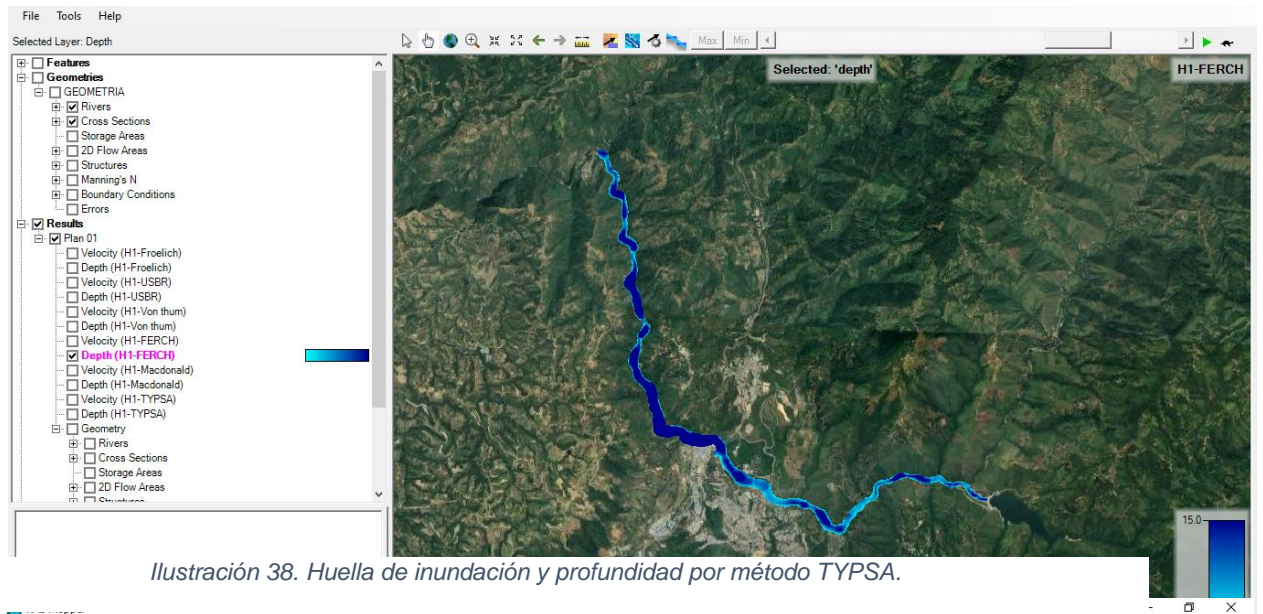


Ilustración 38. Huella de inundación y profundidad por método TYPSA.

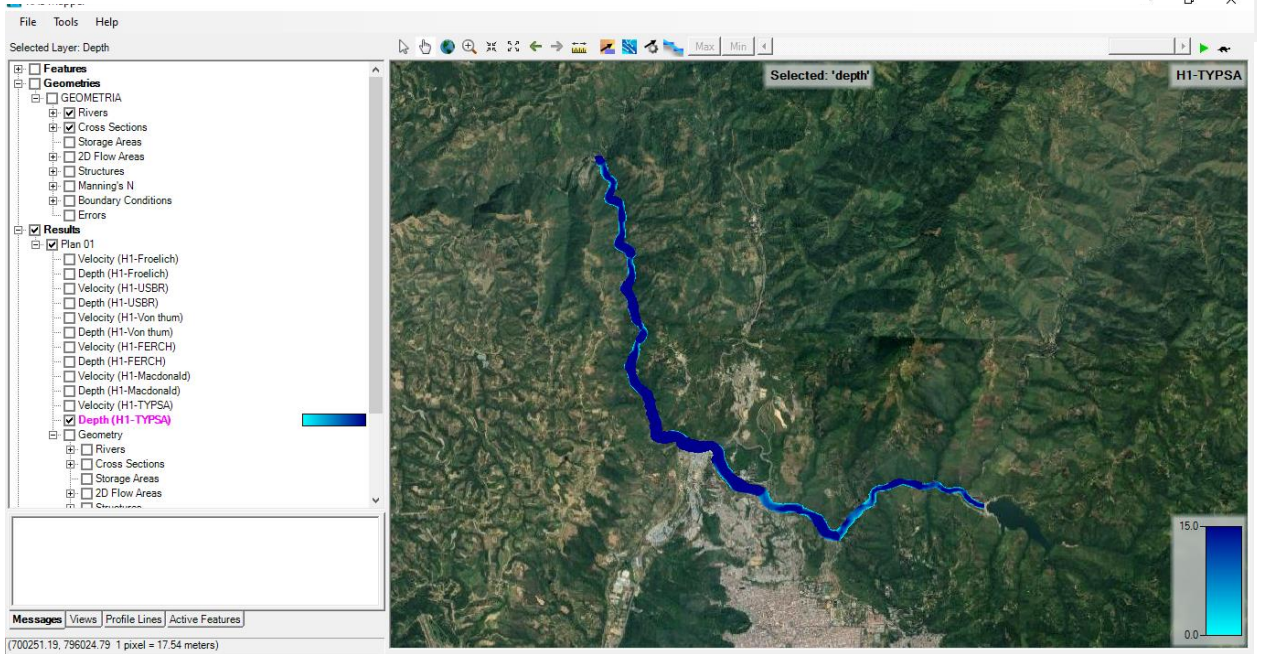


Ilustración 40. Huella de inundación y profundidad por método Froelich.

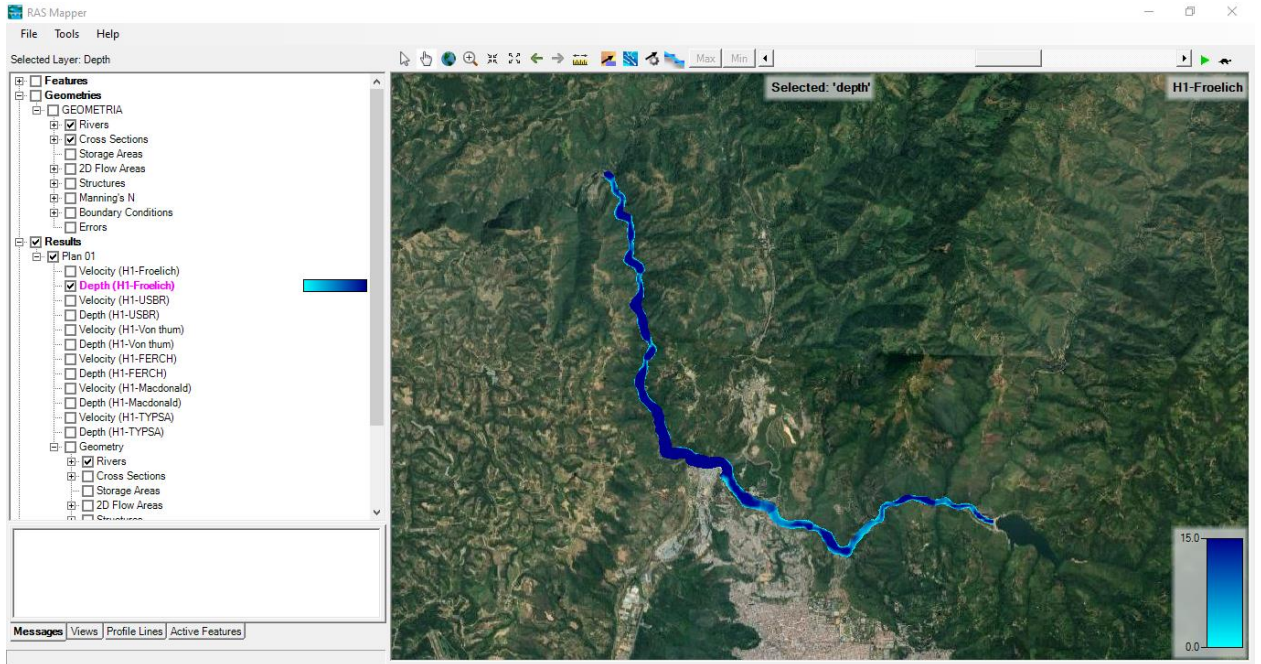
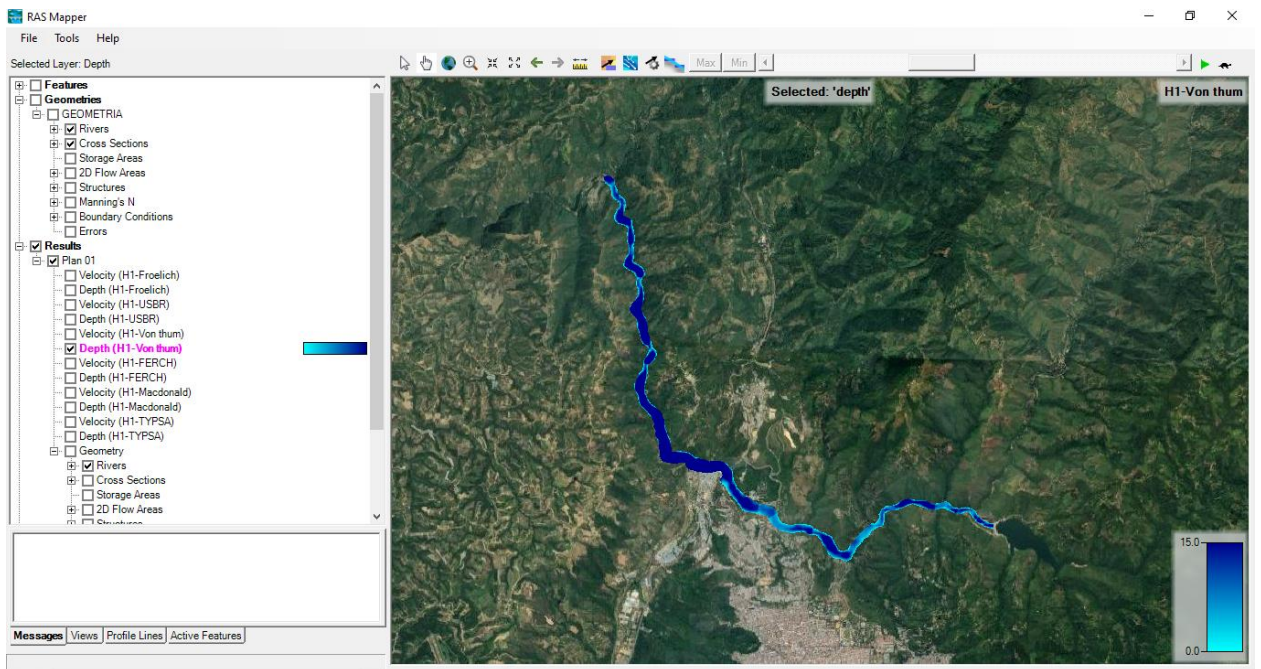


Ilustración 39. Huella de inundación y profundidad por método Von Thum.



Las ilustraciones anteriores muestran el nivel de profundidad que ha dejado la huella de inundación según la escala de azules que se muestra en la parte inferior derecha de cada imagen en donde los valores se encuentran en unidades de metros y en intervalo de (0 – 15) m. En los anexos se incluyen muestras de las tablas con los valores críticos de profundidad (ver anexos), que superan los de la escala manejada por el programa.

**4.2 Velocidades de flujo.** Tomando en cuenta los datos de los 6 hidrogramas obtenidos por los métodos de: McDonald, USBR, VON THUM, Froehlich, Ferch, TYPASA, suministrados por la tesis de Casallas y Chacón, se desarrolló la simulación en HEC-RAS y se obtuvieron los siguientes resultados.

*Ilustración 41. Huella de inundación y velocidades de flujo método Froelich.*

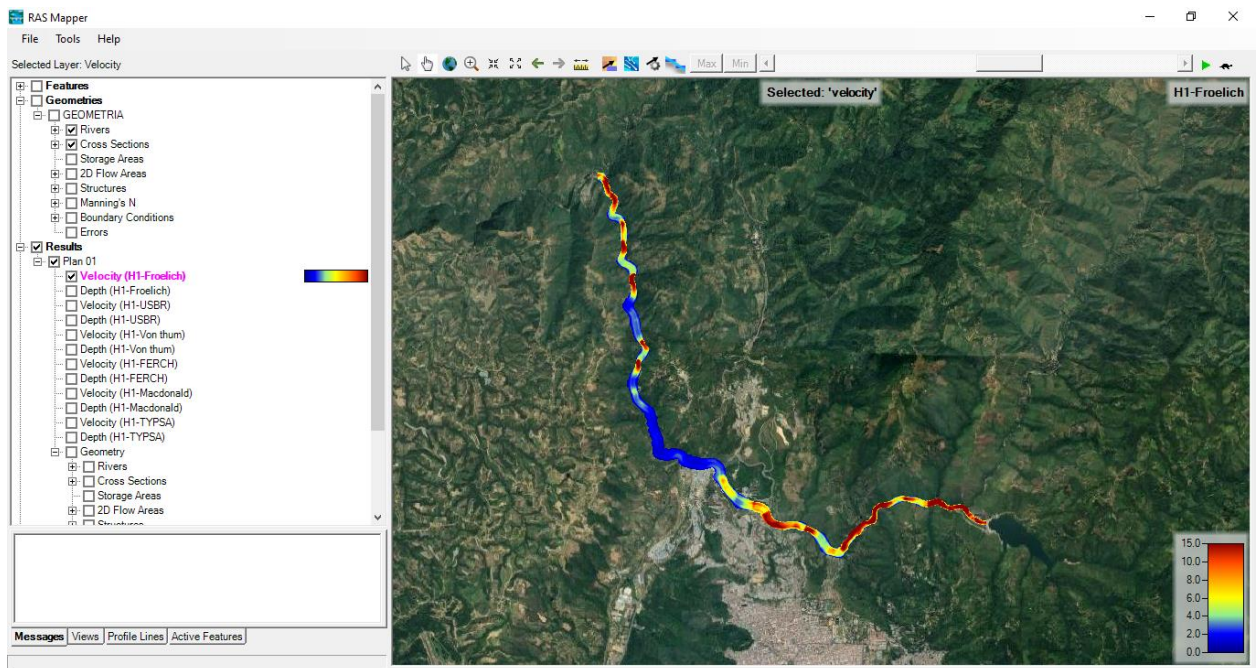


Ilustración 42. Huella de inundación y velocidades de flujo método USBR

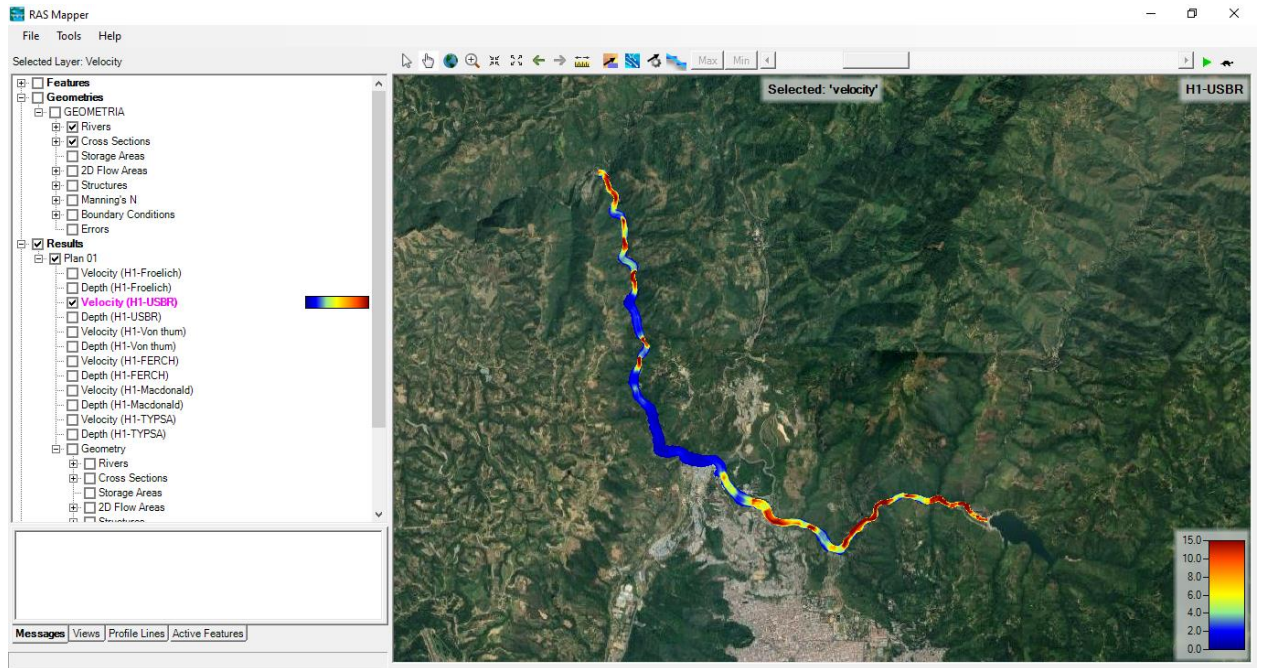


Ilustración 43. Huella de inundación y velocidades de flujo método Von Thum.

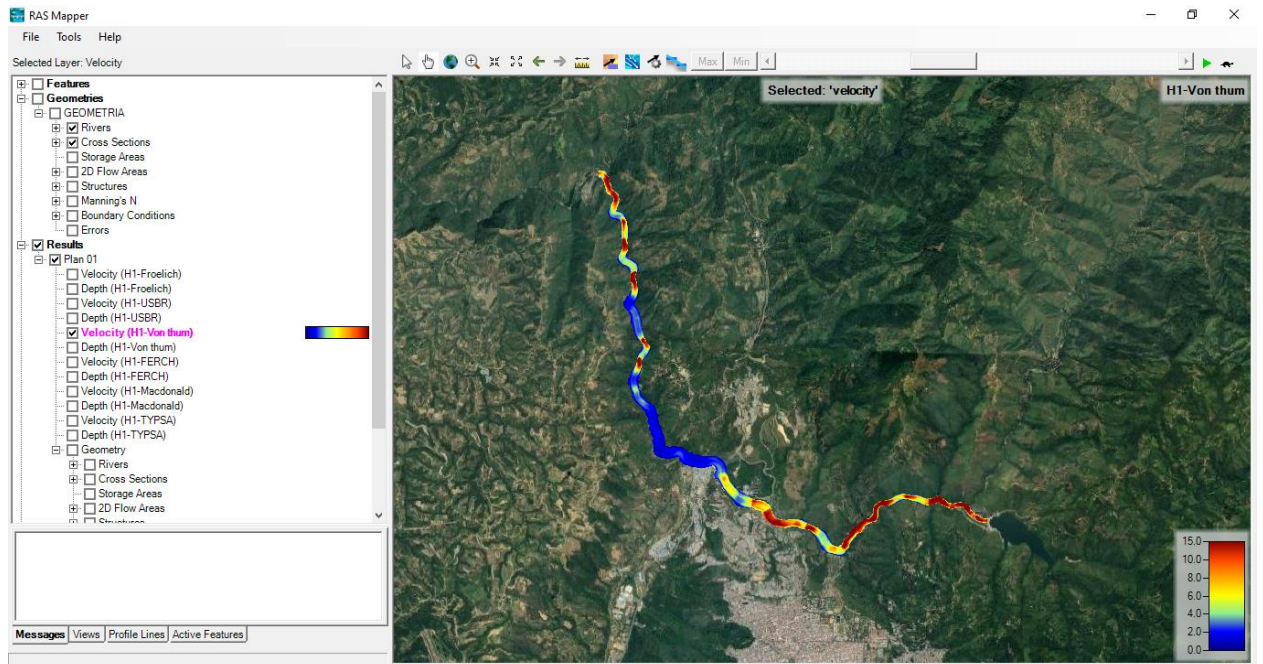


Ilustración 45. Huella de inundación y velocidades de flujo método FERCH.

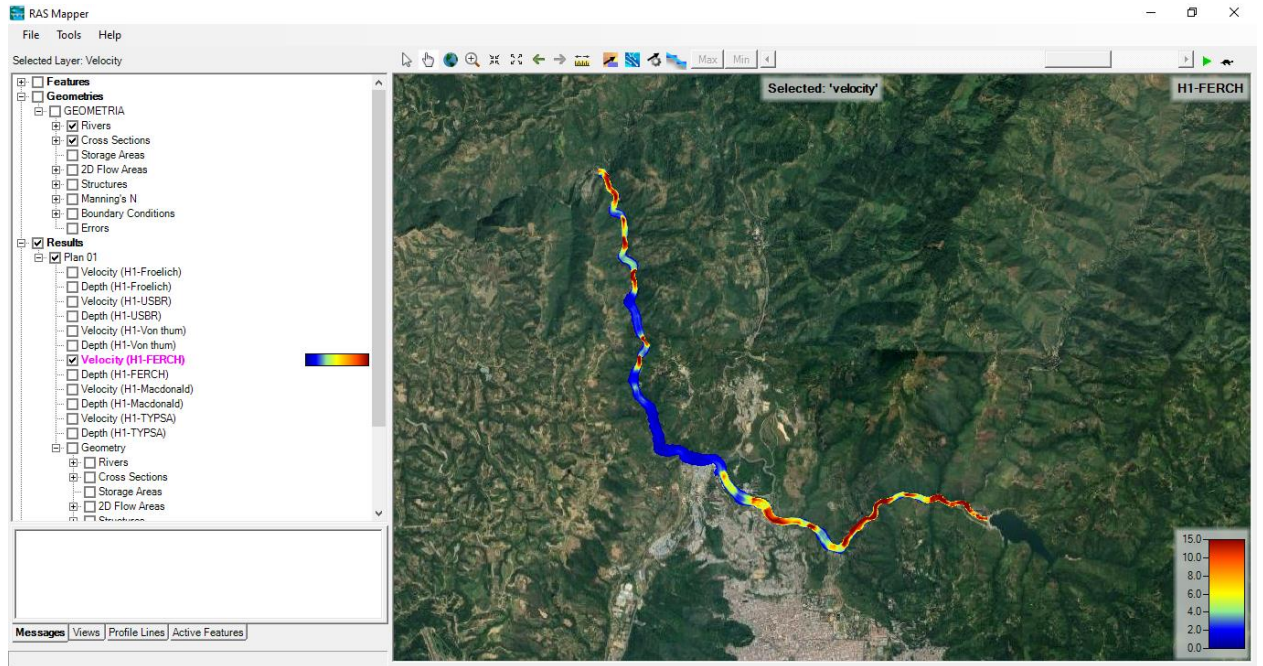


Ilustración 44. Huella de inundación y velocidades de flujo método McDonald.

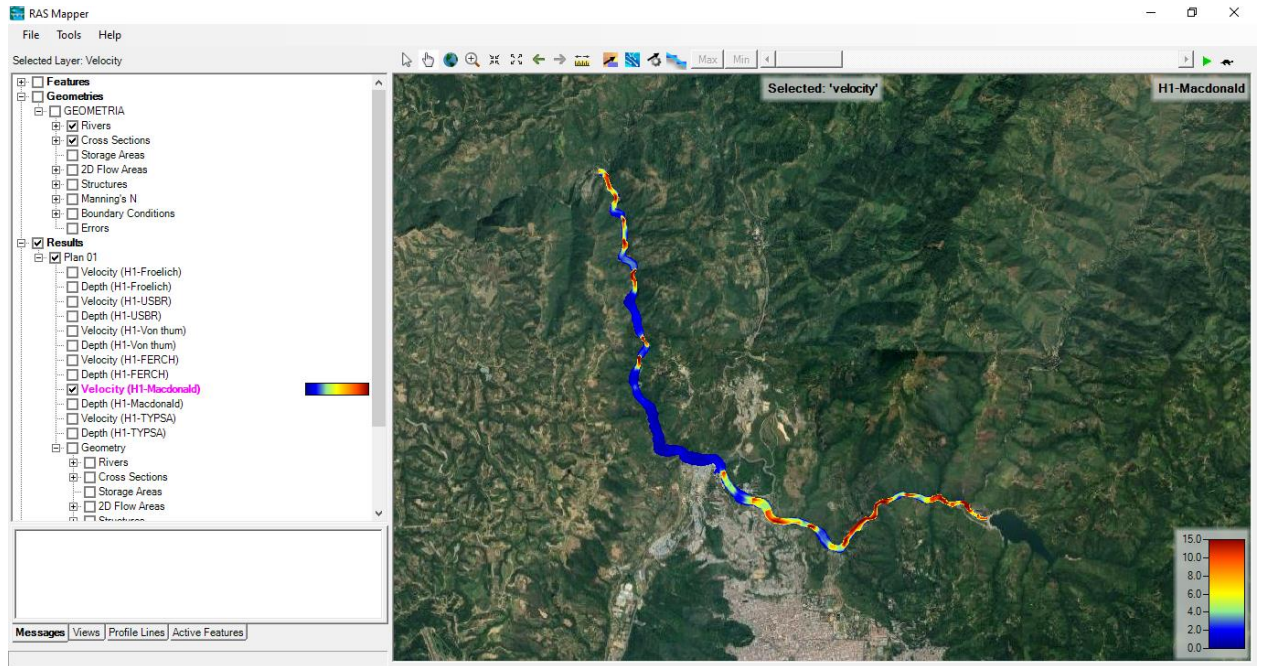
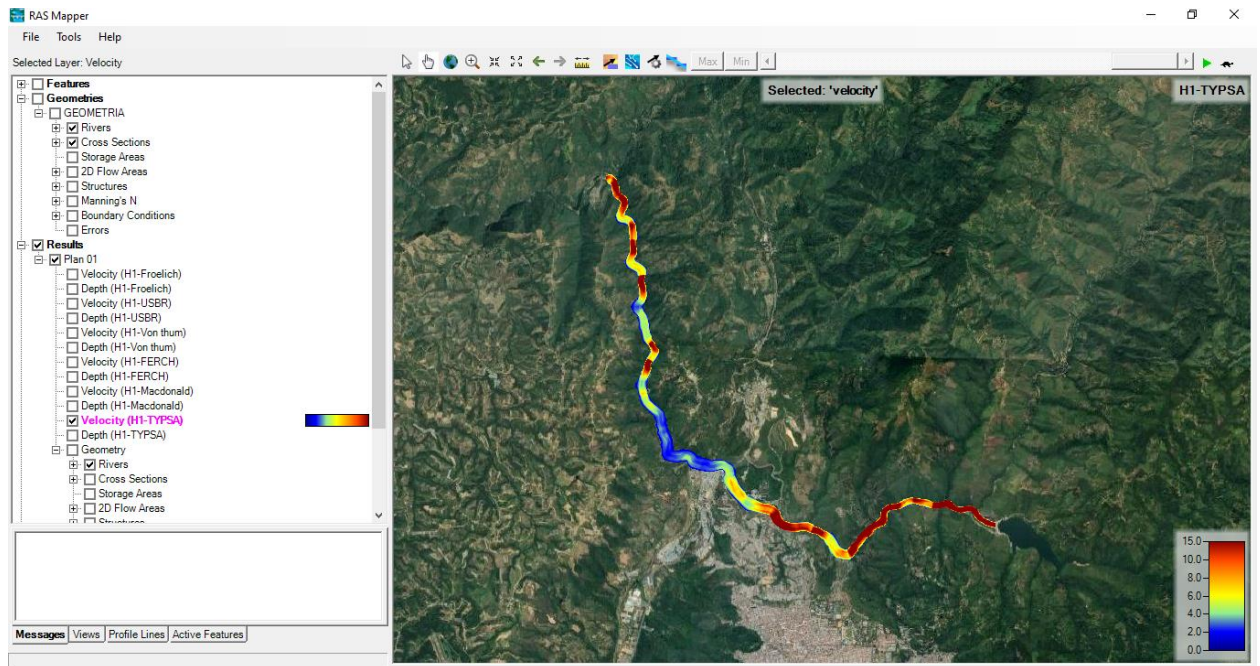


Ilustración 46. Huella de inundación y velocidades de flujo método TYPASA.



Las ilustraciones anteriores muestran las velocidades de flujo que ha dejado la huella de inundación según la escala de colores que se muestra en la parte inferior derecha de cada imagen en donde los valores se encuentran en unidades de metros/segundo (m/s) y en intervalo de (0 – 15) m/s. En los anexos se incluyen muestras de las tablas con los valores críticos de velocidad de flujo (ver anexos), que superan los de la escala manejada por el programa.

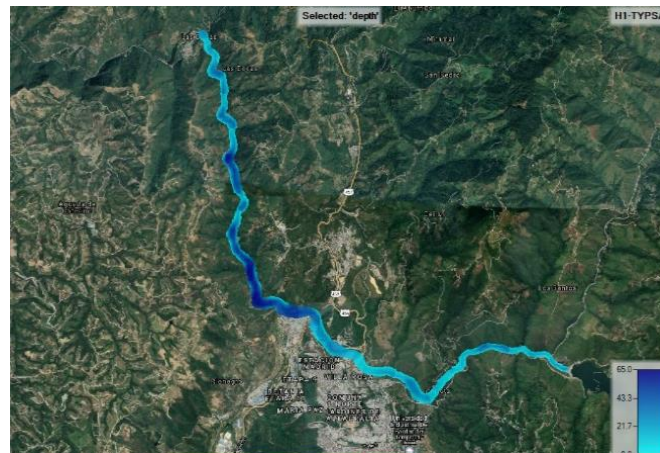
### **Resultados para la simulación del hidrograma TYPASA bajo flujo permanente.**

Para esta parte de la metodología se tuvo en cuenta únicamente los resultados correspondientes al método de análisis de TYPASA suministrados por la tesis de Casallas y Chacón, el cual arrojó un caudal pico de 28071 m<sup>3</sup>/s, siendo esta la descarga que genera las situaciones más críticas aguas abajo. Se generaron las huellas de inundación bajo los criterios de flujo permanente y se desarrolló la simulación en HEC-RAS en su versión 5.0.7.

La ilustración 47, muestra el nivel de profundidad que ha dejado la huella de inundación. La escala de azules para profundidades está dada en metros, siendo el azul más tenue las zonas de inundación menos profundas, mientras que el azul oscuro siendo las zonas de inundación con más profundidad o altura de calado. Se lograron alcanzar valores de profundidad entre 0 y 65 metros para la simulación bajo flujo permanente a lo largo del trayecto afectado por la avenida. Estos valores no son confiables y están sujetos al modelo digital del terreno en escala 1:25000, el cual es bastante deficiente en cuanto al detalle geométrico que el cauce principal necesita para ser modelado y simulado.

Las huellas de inundación para flujos permanente (Ver ilustraciones de la 47 a la 54), muestran las zonas de afectación, clasificadas como *Residencial*, *Industrial*, *Comercial*, *Bosques* y *corredores viales*.

*Ilustración 47. Huellas de inundación y profundidad en metros por método de TYPISA flujo permanente. Fuente: Los autores.*



- **Residencial**

Como se puede apreciar en las ilustraciones 48, 49 y 50, las zonas residenciales de los barrios Café Madrid, Villa Helena y la vereda Chitota, se ven afectadas por la avenida.

Ilustración 48. Afectación zona este Villa Helena. Fuente: Los autores

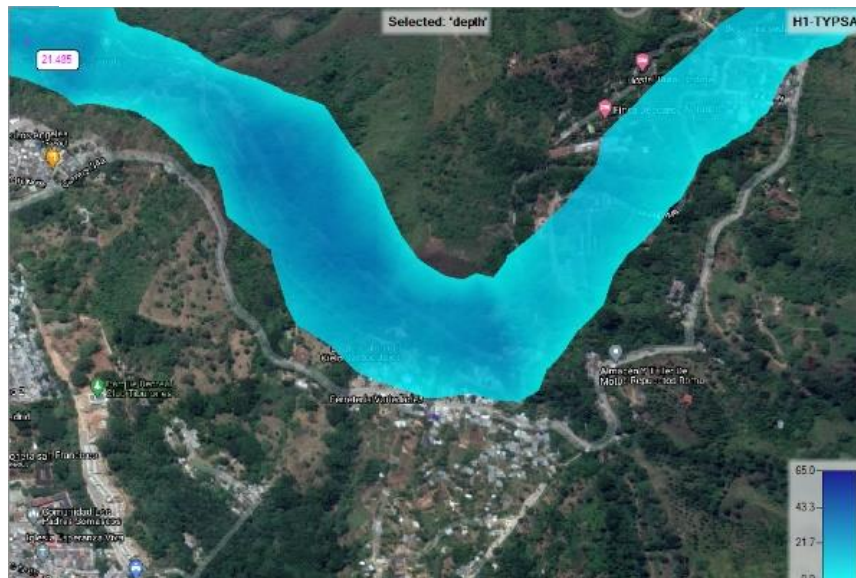


Ilustración 49. Afectación zona Café Madrid. Fuente: Los autores.

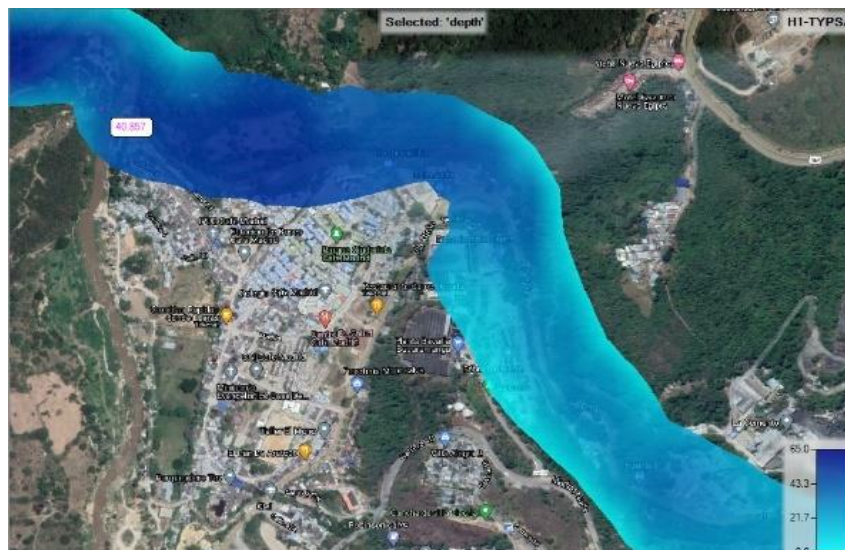
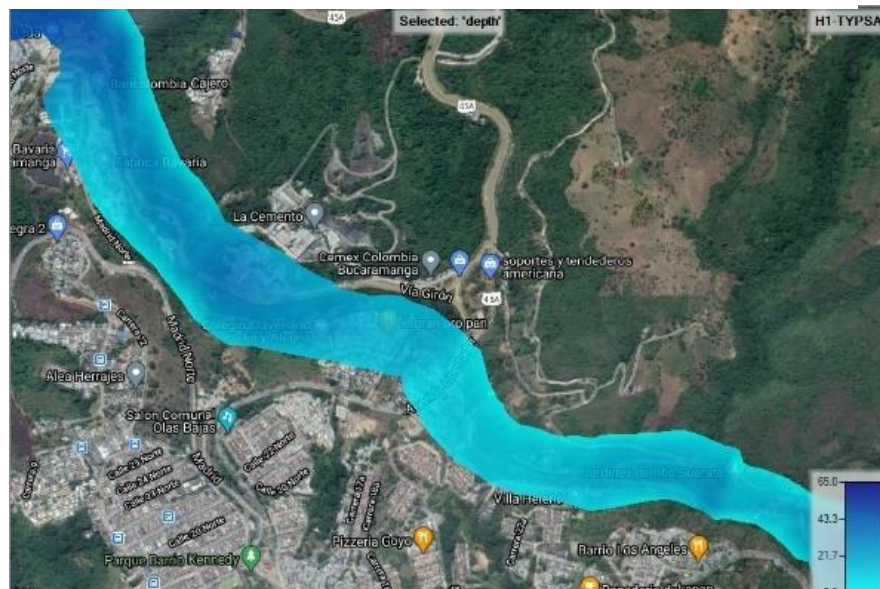


Ilustración 50. Afectación Vereda Chitota. Fuente: Los autores



Para precisar, siguiendo la trayectoria de la avenida, se mencionan en orden las zonas que se verán afectadas: finca Shalom casa de paz, Vereda Chitota zona aledaña al Río Tona-Suratá, Parte este del Barrio Villa Helena, Barrio Claveriano (Colegio Fe y Alegría), y zona aledaña al río Tona-Suratá del barrio Café Madrid

- **Industrial**

Como se puede apreciar en las ilustraciones 51, 52 y 53, las zonas industriales como PTAP Bosconia del amb, La Cemento, Fabrica Bavaria y Balco Ltda, se ven afectadas por la avenida.

Ilustración 51. Afectación zona PTAT Bosconia. Fuente: Los autores



Ilustración 52. Afectación zona La Cemento. Fuente: Los autores.



Ilustración 53. Afectación zona de la fábrica Bavaria. Fuente: Los autores.



- **Comercial**

La avenida afectará, tal como se aprecia en la ilustración (bosconia), las zonas comerciales de Ecoparque El Espino, Hostal rural Chitota, Finca Descanso Naranjito.

- **Bosque Forestal**

La avenida causará daños en zonas de bosque forestal, a lo largo del cauce principal, especialmente en las zonas de Jardines del río Suratá y el trayecto del río Lebrija tal como se muestra en la ilustración (ver ilustración 47), hasta la hidroeléctrica las bocas.

- **Corredores Viales**

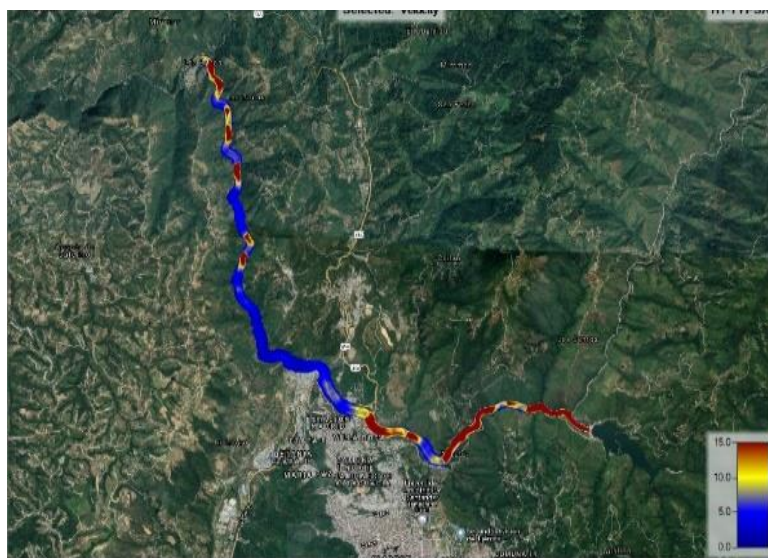
Como se puede apreciar en la ilustración 54(a, b, c, para flujo permanente y no permanente) las zonas de corredores viales como la vía Bucaramanga-Charta-Matanza, Puente Av. Libertador vía Bucaramanga- San Alberto, y puente La cemento vía Girón, se ven afectadas por la avenida.

Ilustración 54. Afectación corredores viales. a) Vía Bucaramanga-Matanza-Charta. b) Puente Av. Libertador. c) Puente la Cemento. Fuente: Los autores.



También, con los datos del hidrograma obtenido por el método de TYPASA suministrados por la tesis de Casallas y Chacón, se obtuvieron las huellas de velocidades para flujo permanente en [m/s]. (Ver ilustración 55).

*Ilustración 55. Huella de velocidades de flujo método TYPASA. Fuente: Los autores.*



Las ilustraciones 56 y 57 muestran las velocidades de flujo. La escala para estas velocidades se interpreta bajo un rango de colores, siendo el azul oscuro las zonas con velocidades más bajas, mientras que el amarillo y rojo, zonas con velocidades altas. Se lograron alcanzar valores de velocidad entre 0 y 35 m/s a lo largo del cauce afectado por la avenida. Estos valores también están sujetos a discusión debido a la precaria precisión topográfica y por ende a las deficientes secciones transversales generadas con los parámetros geométricos del cauce principal del río Tona-Suratá.

Ilustración 56. Velocidades de flujo método TYPISA. Fuente: Los autores.

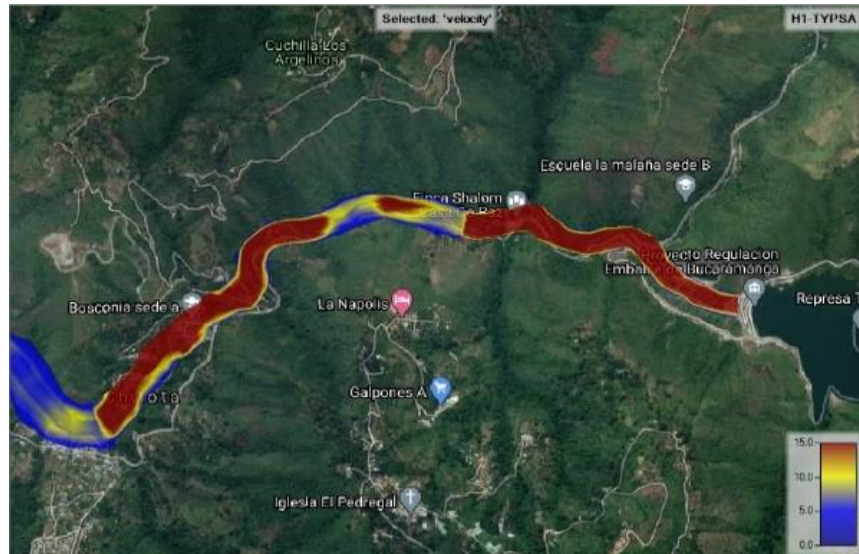
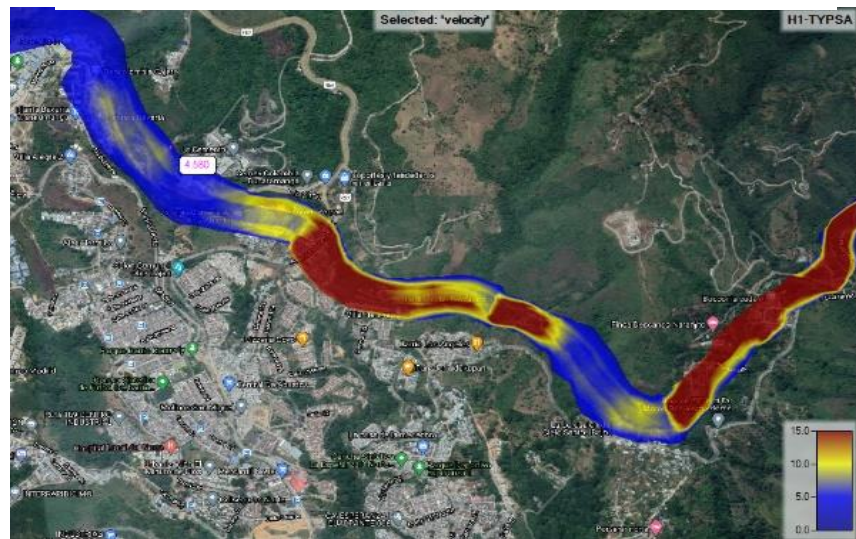


Ilustración 57. Velocidades de flujo método TYPISA. Fuente: Los autores.



Como se puede apreciar en las ilustraciones 56 y 57, las zonas rojas y amarillas, representan las altas velocidades que llevará la avenida en esos sectores, pues la masa de agua que pasará por ellos traerá consigo una mayor energía que se traducirá a fuerza de impacto y afectará lo que haya a su paso.<sup>11</sup> Estos sectores

<sup>11</sup> SERWAY, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Cengage Learning Editores.

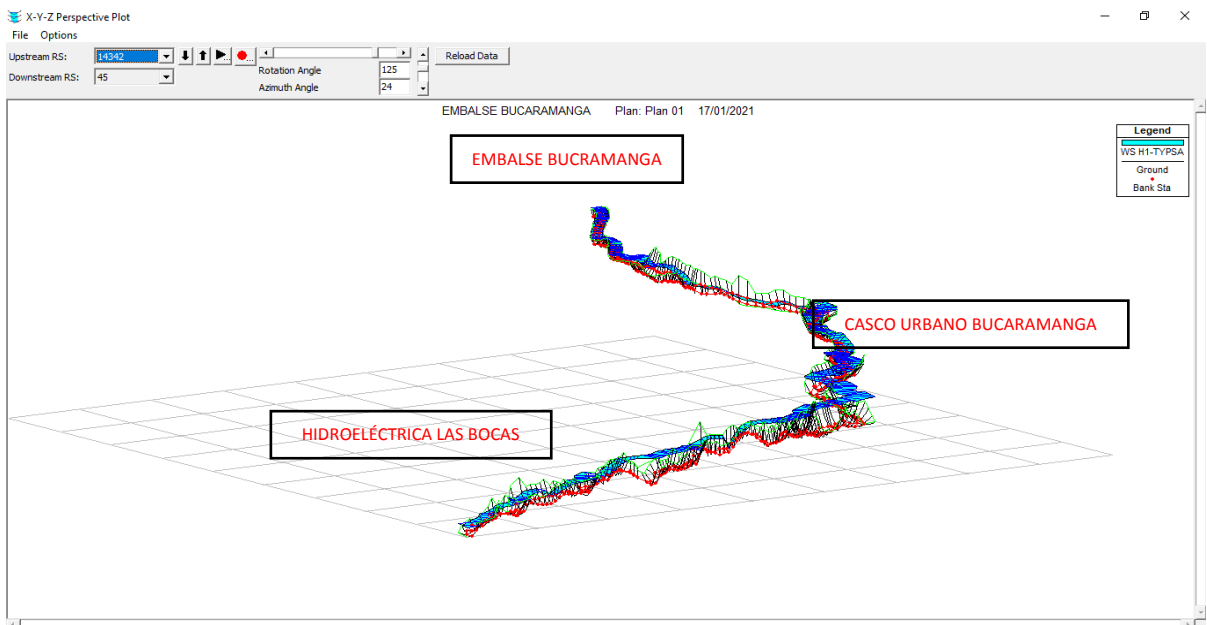
comprenden zonas de tipo industrial, residencial, corredores viales entre los cuales se encuentran: PTAP Bosconia del amb, La Cemento, Fabrica Bavaria y Balco Ltda. Corredores viales como la vía Bucaramanga-Charta-Matanza, Puente Av. Libertador vía Bucaramanga- San Alberto y puente La cemento vía Girón

## 5. ANALISIS DE RESULTADOS

### Huellas de inundación

**Profundidad.** Según las imágenes (ver ilustraciones 47 a 54) y los datos obtenidos en las tablas arrojadas por el software HEC-RAS (ver anexos), se evidencia (como se esperaba) que la huella de inundación con mayor profundidad distribuida es la generada por el hidrograma basado en el método de TYPESA con un caudal pico de 28071 m<sup>3</sup>/s (ver tabla No. 5) Dado que este caudal pico es el mayor con respecto a los otros 5 caudales calculados por los métodos restantes, se esperaba tener una mayor descarga de agua aportando una profundidad superior y uniforme a lo largo del cauce afectado por esta avenida. Como se puede observar en las imágenes, la profundidad máxima en todos los casos de análisis es aproximadamente 60 metros.

Ilustración 58. Vista tridimensional de la huella de profundidad por el método TYPESA.



En la imagen puede apreciarse el terreno y la lámina azul que representa el agua a una altura determinada en el terreno que a su vez esta demarcada por las secciones transversales (líneas negras) y la línea del cauce principal (línea roja).

**Velocidades de flujo.** Según las imágenes y los datos obtenidos en las tablas arrojadas por el software HEC-RAS, se evidencia que la huella de inundación con mayor velocidad de flujo distribuida es la generada por el hidrograma basado en el método de TYPESA con un caudal pico de  $28071 \text{ m}^3/\text{s}$  (ver tabla No. 2) Dado que este caudal pico es el mayor con respecto a los otros 5 caudales calculados por los métodos restantes, se esperaba tener una mayor descarga de agua aportando una velocidad de flujo superior debido a la que relación de proporcionalidad entre caudal y velocidad es. Como se puede observar en las imágenes, la velocidad de flujo máxima en todos los casos de análisis es aproximadamente  $35 \text{ m/s}$ .

**Tiempos de llegada.** Para el cálculo de los tiempos de llegada de la avenida se plantearon tramos de aproximadamente 500 metros, que en total suman 31 tramos (ver ilustración 60), y se extrajeron los datos de la distancia entre las secciones transversales (S.T.) en las que se dividió el cauce para la simulación. (Ver Tabla 6).

*Ilustración 59. Velocidades de flujo mediante el método TYPESA.*

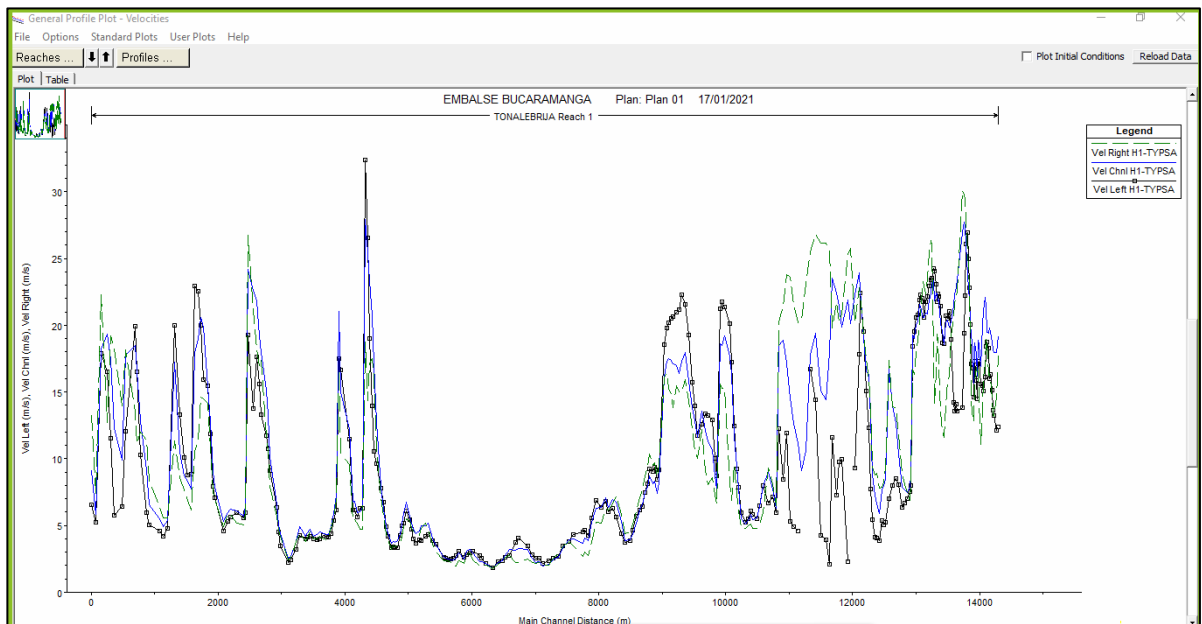
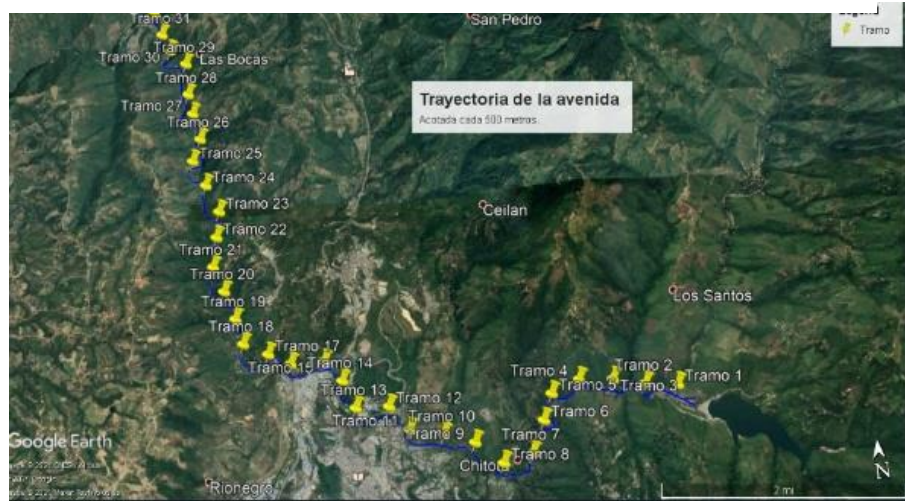


Ilustración 60. Distribución de tramos a lo largo del cauce principal. Fuente: Los autores.



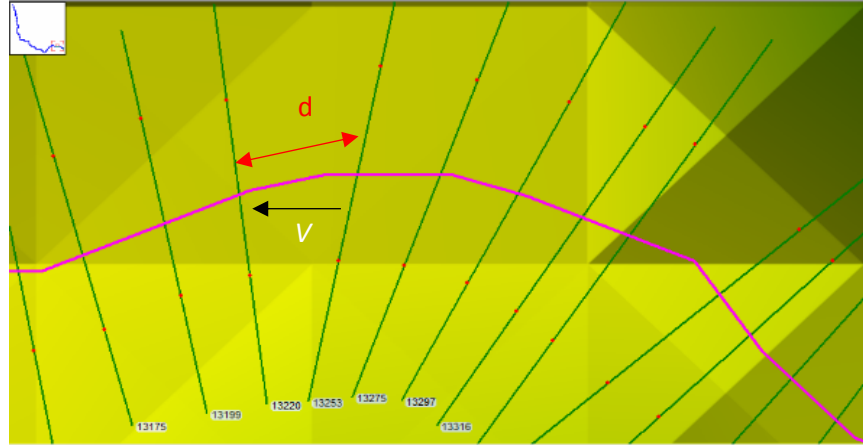
La tabla B (ver anexos) muestra los datos correspondientes a las distancias entre las secciones transversales a lo largo del cauce. Estas distancias son necesarias para el cálculo de los tiempos de llegada de la avenida a cada tramo de análisis. Posteriormente, con los datos de velocidades para un tiempo de 24 minutos transcurridos luego de la rotura (TYP SA-24) que arroja el software HEC-RAS (ver anexos- ilustración H), se calculó el tiempo de llegada de la avenida, bajo condiciones de flujo permanente, para cada tramo (ver tabla 6) con la siguiente ecuación:

$$v = \frac{\Delta d}{\Delta t}$$

Ecuación 3. Velocidad media Fuente: Física Serway séptima edición.

La ecuación 3 plantea una partícula que lleva una velocidad ( $v$ ) con una variación del espacio ( $\Delta d$ ) en un intervalo de tiempo ( $\Delta t$ ) considerado. Para efectos de este análisis se procedió a calcular el tiempo ( $t$ ) que tarda la avenida de una sección a otra ( $d$ ), con una velocidad ( $v$ ) medida entre estas mismas (ver ilustración 61).

Ilustración 61. Distancia y Velocidad entre secciones transversales. Fuente: Los autores.



A continuación, se presenta el cálculo tipo para el tiempo de recorrido del flujo, en condición permanente, entre las secciones transversales K0+0 – K0+30.9. Según la simulación en HEC-RAS, la distancia entre estas dos secciones transversales (Length Channel) es de 30.9 metros; la velocidad entre estas dos secciones transversales (Vel. Channel) es de 24.6 m/s.

$$t = \frac{30.9 \text{ m}}{24.6 \text{ m/s}} = 1.25 \text{ s}$$

Posteriormente se procede al cálculo tipo para el tiempo de recorrido del flujo entre tramos de aproximadamente 500 metros. Para el primer tramo se tomaron las secciones transversales RS K0+0 – K0+506.4. Según la simulación en HEC-RAS, la sumatoria de las distancias entre todas las secciones transversales que están dentro de RS 14342 – RS13852 es de 506.4 metros.

$$t_{tramos} = \sum_i^n \left( \frac{d_i}{V_i} + \dots + \frac{d_n}{V_n} \right)$$

$$t_{tramo1} = \sum \left( \frac{30.9m}{24.6 \left( \frac{m}{s} \right)} + \dots + \frac{16.2m}{25.28 \left( \frac{m}{s} \right)} \right) = 22.05 s$$

El cálculo para el primer tramo de 506.4 metros, arrojó un tiempo de recorrido de la avenida de 22.05 segundos.

La ilustración H (ver anexos), muestra los valores de velocidad en cada sección transversal, bajo las condiciones de flujo permanente en un tiempo de análisis de 24 minutos desde el inicio de la rotura, en el que se generó un caudal máximo (28071 m<sup>3</sup>/s) con el que se hizo el análisis de los tiempos de llegada, desde el embalse de Bucaramanga hasta la hidroeléctrica las Bocas.

Tabla 6. Tiempos de llegada de la avenida en los tramos de mayor importancia. Fuente: Los autores.

| Lugar                    | Tiempo llegada (min) | Acumulado Distancia (m) |
|--------------------------|----------------------|-------------------------|
| PTAP Bosconia            | 3.17                 | 3073.00                 |
| Chitota                  | 3.78                 | 3612.70                 |
|                          | 4.64                 | 4141.90                 |
| Villa Helena             | 7.00                 | 5206.60                 |
| Claveriano               | 9.25                 | 6290.00                 |
| Café Madrid              | 10.45                | 6793.80                 |
|                          | 12.28                | 7339.80                 |
| Hidroeléctrica las Bocas | 41.04                | 15735.30                |

Se realizó el proceso de cálculo de tiempos de llegada de la avenida en cada tramo desde el embalse de Bucaramanga hasta la hidroeléctrica Las Bocas, y se tabuló los resultados para las zonas urbanas (ver anexos - tabla A), teniendo en cuenta el caudal punta bajo flujo permanente que atraviesa cada sección transversal del cauce.

## 6. CONCLUSIONES

Según los resultados arrojados por el modelo simulado en HEC-RAS bajo flujo permanente en régimen mixto, se pudo apreciar que el área de inundación afectará las zonas de la vereda de Chitota, la planta de tratamiento de agua potable de Bosconia, la parte Noreste del barrio Claveriano y parte del barrio Villa Helena. También la zona industrial perteneciente a la fábrica de Bavaria y parte Sur de la Cemento. La parte urbana más afectada del barrio Café Madrid es aquella que colinda con el cauce afectado por la avenida. Algunas estructuras de la malla vial como puentes y vías (Pte. la Cemento, Pte. La avenida el Libertador, vía matanza-Charta – Bucaramanga) también se verán afectados por el paso de la avenida, siendo esto una posible interferencia en la comunicación entre Bucaramanga y estas zonas.

Los tiempos de llegada a estos tramos urbanísticos e industriales oscilan entre los 3 y 42 minutos (ver tabla 4) siendo tiempos considerablemente muy bajos para la total evacuación de las zonas.

En los tramos ubicados entre la PTAP de Bosconia hasta el Barrio Claveriano, se presentan velocidades extremas con magnitudes que oscilan entre los 20- 35 m/s. Esto presenta un panorama crítico para toda la infraestructura e integridad de los habitantes de las zonas que serán afectadas, pues la avenida, dada a estas velocidades, trae consigo una gran energía que hará que la fuerza de impacto de la masa de agua arrase con todo a su paso.

Debido a las limitaciones en cuanto a insumos como la topografía de detalle, una batimetría del cauce y datos de caudales tributarios correspondientes a los ríos Suratá y río de Oro; y también a que la simulación no se hizo teniendo en cuenta el desplazamiento de sedimentos, estos resultados no representan un panorama

concluyente. Sin embargo, esto no excluye el potencial peligro que representa la rotura del embalse de Bucaramanga.

Este trabajo de investigación se limitó a dar resultados del tránsito de la avenida bajo los parámetros de un *flujo permanente* con régimen mixto, debido a los frecuentes errores que arrojaba la simulación en condiciones de *flujo no permanente*, errores de inestabilidad del software Hec-Ras para grandes trayectos mal detallados topográficamente y para cambios abruptos en hidrogramas de entrada, provenientes de la rotura de la presa. El software es bastante sensible a estos aspectos que requieren de años de experiencia y un agudo manejo de conceptos hidráulicos para poder dar posibles soluciones a las inestabilidades presentadas. En los anexos se presentan algunas ilustraciones de los errores que genera el software bajo flujo no permanente (ver anexos, Ilustraciones A, B, C, D), en los cuales se aprecian interrupciones muy pronunciadas en la continuidad de la huella de velocidad e inundación (literal C y D). En cuanto a los hidrogramas de entrada y de salida (literales A y B), arroja incongruencias en los tiempos de los mismos, ya que no se puede saber si la masa de agua que transita desde el primer instante llega de alguna manera a la salida del sistema, pues los tiempos en ambos hidrogramas son idénticos; es decir, los resultados arrojados por el hidrograma de salida presentan la misma fecha de inicio que el hidrograma de entrada.

Para la realización de un estudio con resultados más concluyentes y ajustados a los parámetros geométricos de la zona, se recomienda un levantamiento topográfico a detalle mediante herramientas actuales como el uso de *drones* a escala 1:5000, ya que así se podría tener incluso modelos raster a partir de grandes conjuntos de puntos de tipo *de primer retorno*, o de *suelo desnudo* (Ver anexos, ilustración E), que permitirán a demás observar el detalle de las edificaciones y bosques.

También sería de suma utilidad un estudio de la batimetría de los cauces comprometidos en este análisis para obtener el detalle espacial de las secciones

transversales para que así el modelo en HEC-RAS arroje resultados más acordes con la realidad.

Se recomienda que para el análisis se tengan los datos de entrada, tales como flujo bases de afluentes tributarios y en general sobre información hidrometeorológica de la zona lo más actualizadas posible, esto con el fin de lograr una simulación que muestre con más detalle las áreas de inundación.

Ya que en este estudio se presentaron las zonas de posible mayor afectación, se recomienda la implementación de un plan de emergencia que dé a conocer la información a los habitantes de la zona para que estos tomen conciencia de la rapidez y responsabilidad con la que deberán actuar en caso de ocurrir el siniestro, ayudando a las autoridades competentes en la evacuación de la zona en peligro.

Se recomienda que esta investigación se plantee a futuro mediante el análisis de flujo no permanente, teniendo en cuenta datos actualizados de caudales base tributarios y principal, así mismo tener preferiblemente la información completa de los datos de hidrogramas de rotura, ya que este insumo fue netamente gráfico (ver ilustración 6). También es necesario plantear una propuesta económica para costear un levantamiento topográfico de la zona de análisis, junto al estudio de batimetría.

Para este tipo de estudios es necesario obtener un buen bagaje conceptual del manejo de los software (ArcGis, Hec Geo-RAS, HMS-RAS, Hec- Ras) por lo que se hace necesario la capacitación por parte de la universidad en el manejo de estos.

## BIBLIOGRAFIA.

ARDILA, N. J. M., & García, U. G. M. (Eds.). (2010). Leyenda nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia: Escala 1: 100.000. IDEAM.

ARCEMENT, G. J., & Schneider, V. R. (1989). Guide for selecting Manning's roughness coefficients for natural channels and flood plains.

ARCGIS FOR DESKTOP. (2019, 5 junio). Creación y análisis de superficies. <https://desktop.arcgis.com/>.

A.M.B. (2016, 1 mayo). Proyecto de regulación del río Tona embalse Bucaramanga. Acueducto Metropolitano de Bucaramanga.

CASALLAS ROZO, E. I., & Chacón García, S. G. (2016). Estimación Del Hidrograma De Salida En La Hipotética Rotura De La Presa Del Proyecto De Regulación Del Rio Tona-Embalse De Bucaramanga (Universidad Industrial de Santander, Escuela De Ing. Civil).

CHOW, V. T., Maidment, D. R., Mays, L. W., & Saldarriaga, J. G. (1994). Hidrología aplicada (No. 551.48 C4H5).

Crear DEM y DSM de ráster a partir de grandes conjuntos de puntos LIDAR. (2018). <https://desktop.arcgis.com/>.

GOBERNACIÓN DE SANTANDER, Plan de ordenamiento territorial (POT), (2014-2027).

GOODELL, C. (2018). Stabilizing a Dynamic Unsteady HEC-RAS. Model – Kleinschmidt. <https://www.kleinschmidtgroup.com/raspost/stabilizing-a-dynamic-unsteady-hec-ras-model/>.

Hec.usace.army.mil. 2021. HEC-RAS Downloads. [Online] Available at: <<https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/download.aspx>> [Accessed 17 January 2021].

HERNÁNDEZ-Uribe, R. E., Barrios-Piña, H., & Ramírez, A. I. (2017). Análisis de riesgo por inundación: metodología y aplicación a la cuenca Atemajac. Tecnología y ciencias del agua, 8(3), 5-25.

INTEGRAL S.A, Memorando técnico 06 - PRESA, Documento Numero I-2128-MT-06-R3, septiembre de 2011.

MELGAREJO, E. (2013). Manual Básico de HEC-GeoRAS 10 (3a edición) (3.a ed., Vol. 1). Universidad de Granada.

OLIVERAS, J. (2016). Como seleccionar el coeficiente de rugosidad de Manning en cauces naturales. Obtenido de HidrojING: <http://www.hidrojing.com/como-seleccionarel-coeficientede-rugosidad-demanning-en-cauces-naturales>.

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ. (2010). Hidráulica de canales abiertos. <http://repositorio.pucp.edu.pe>.

SERWAY, R. A., & Jewett, J. W. (2009). Física para ciencias e ingeniería con física moderna. Cengage Learning Editores.

WAHL, T. L. (2004). Uncertainty of predictions of embankment dam breach parameters. Journal of hydraulic engineering, 130(5), 389-397.

## 7. ANEXOS

Ilustración A. Hidrograma de rotura, dato de entrada.  
Fuente: Los autores.

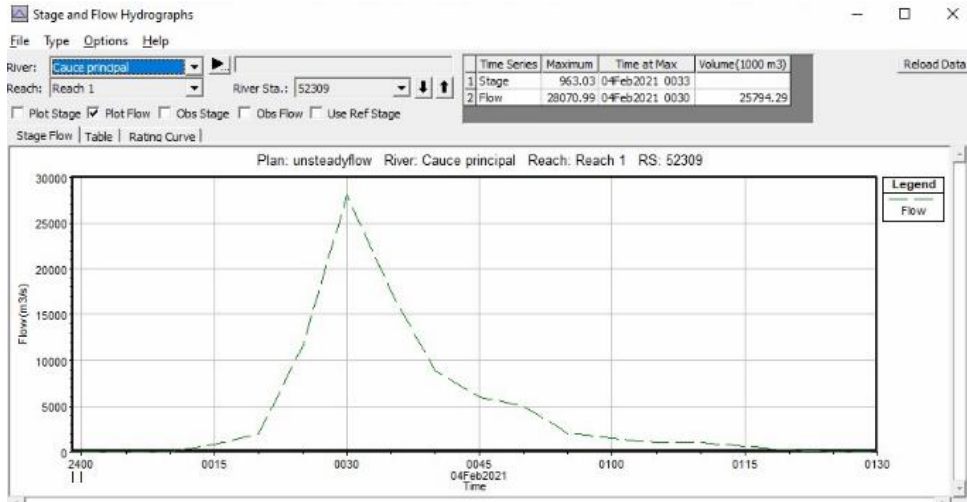
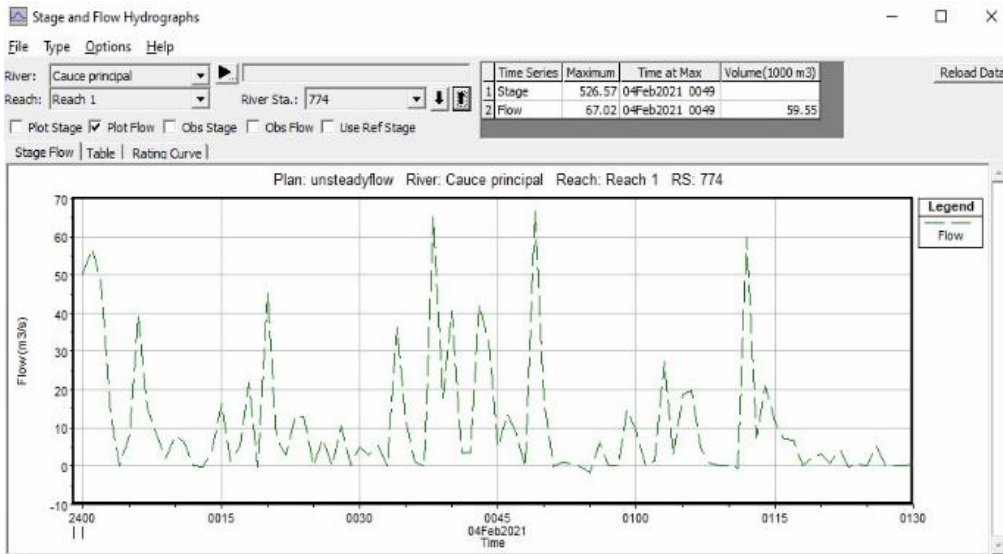
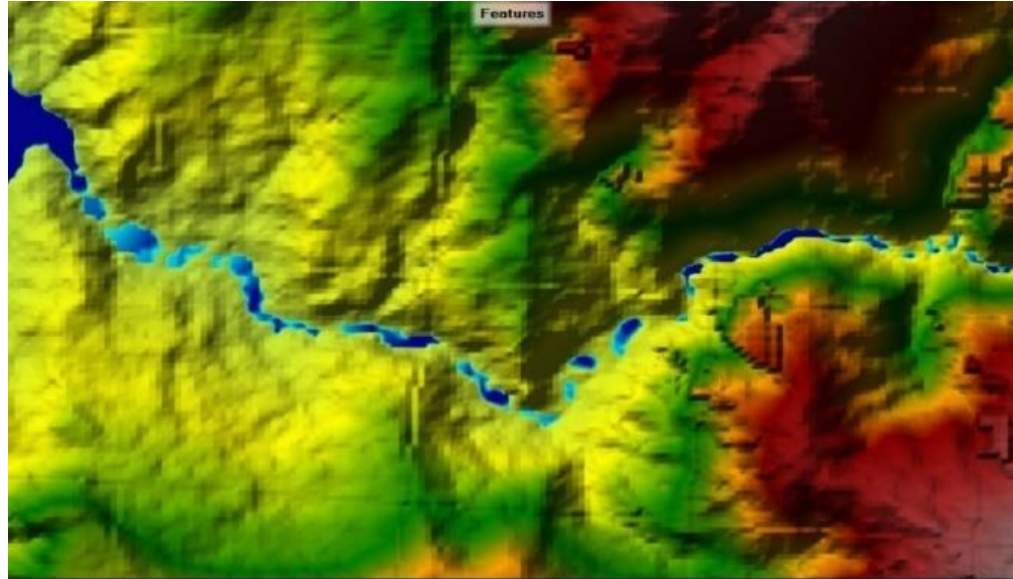


Ilustración B. Hidrograma de salida.



*Ilustración C. Huella de inundación en flujo no permanente. Fuente: Los autores.*



*Ilustración D. Huella de velocidades en flujo no permanente. Fuente: Los autores.*

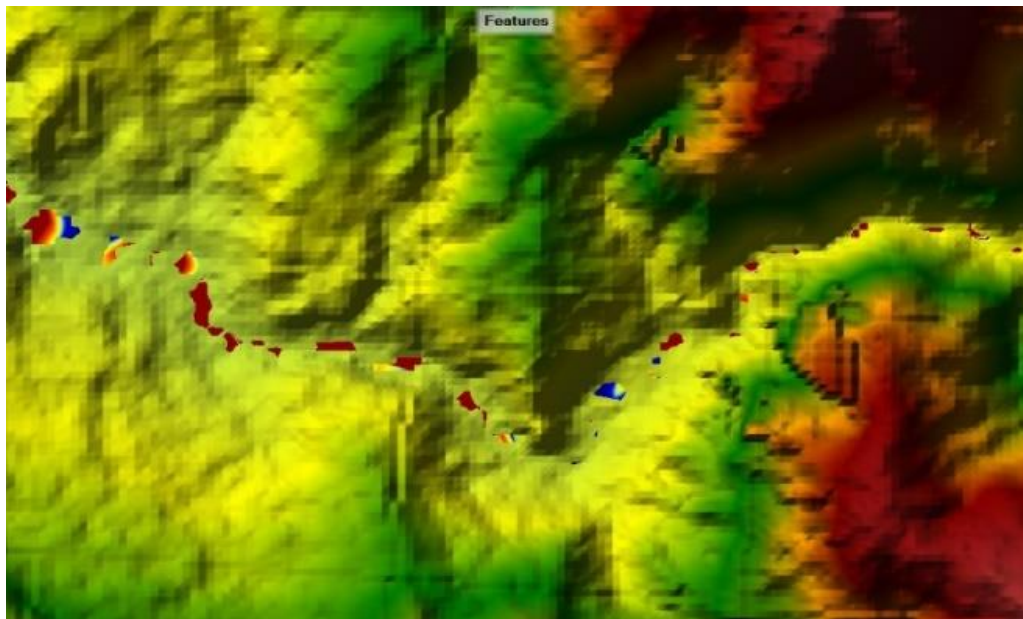


Ilustración E. Representaciones sombreadas de una superficie de primer retorno, o DSM, a la izquierda y un modelo de suelo desnudo, o DEM, a la derecha. Fuente: <https://desktop.arcgis.com/>

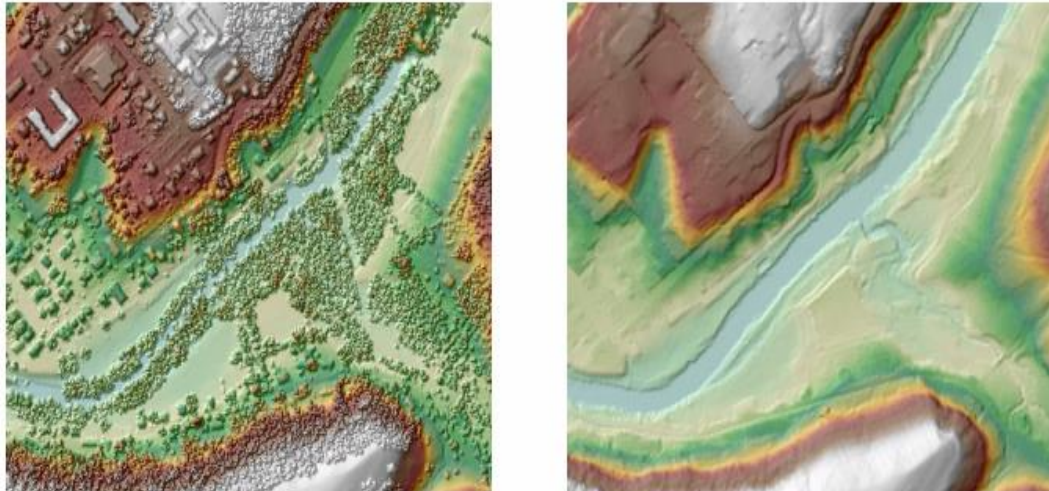


Tabla A. Tiempo de llegada de la avenida para todos los tramos de análisis bajo flujo permanente (TYP5A-24). Fuente: Los autores.

| Lugar                    | Tramo | Distancia (m) | Tiempo (s) | Tiempo (min) | Tiempo llegada (min) | Acumulado Distancia (m) |
|--------------------------|-------|---------------|------------|--------------|----------------------|-------------------------|
|                          | 1     | 506.40        | 22.05      | 0.37         | 0.37                 | 506.40                  |
|                          | 2     | 491.80        | 21.11      | 0.35         | 0.72                 | 998.20                  |
|                          | 3     | 503.10        | 31.27      | 0.52         | 1.24                 | 1501.30                 |
|                          | 4     | 507.80        | 56.29      | 0.94         | 2.18                 | 2009.10                 |
|                          | 5     | 550.00        | 36.30      | 0.61         | 2.78                 | 2559.10                 |
| PTAP Bosconia            | 6     | 513.90        | 23.37      | 0.39         | 3.17                 | 3073.00                 |
| Chitota                  | 7     | 539.70        | 36.67      | 0.61         | 3.78                 | 3612.70                 |
|                          | 8     | 529.20        | 51.42      | 0.86         | 4.64                 | 4141.90                 |
|                          | 9     | 543.80        | 60.45      | 1.01         | 5.65                 | 4141.90                 |
|                          | 10    | 540.10        | 47.55      | 0.79         | 6.44                 | 4682.00                 |
| Villa Helena             | 11    | 524.60        | 33.45      | 0.56         | 7.00                 | 5206.60                 |
|                          | 12    | 527.70        | 57.69      | 0.96         | 7.96                 | 5734.30                 |
| Claveriano               | 13    | 555.70        | 77.11      | 1.29         | 9.25                 | 6290.00                 |
| Café Madrid              | 14    | 503.80        | 72.11      | 1.20         | 10.45                | 6793.80                 |
|                          | 15    | 546.00        | 110.11     | 1.84         | 12.28                | 7339.80                 |
|                          | 16    | 551.30        | 171.45     | 2.86         | 15.14                | 7891.10                 |
|                          | 17    | 550.30        | 192.20     | 3.20         | 18.34                | 8441.40                 |
|                          | 18    | 540.60        | 237.09     | 3.95         | 22.30                | 8982.00                 |
|                          | 19    | 543.70        | 202.23     | 3.37         | 25.67                | 9525.70                 |
|                          | 20    | 506.80        | 108.01     | 1.80         | 27.47                | 10032.50                |
|                          | 21    | 506.80        | 99.30      | 1.65         | 29.12                | 10539.30                |
|                          | 22    | 570.30        | 54.54      | 0.91         | 30.03                | 11109.60                |
|                          | 23    | 565.90        | 89.65      | 1.49         | 31.52                | 11675.50                |
|                          | 24    | 568.10        | 158.62     | 2.64         | 34.17                | 12243.60                |
|                          | 25    | 555.20        | 93.94      | 1.57         | 35.73                | 12798.80                |
|                          | 26    | 514.20        | 65.50      | 1.09         | 36.83                | 13313.00                |
|                          | 27    | 517.20        | 58.93      | 0.98         | 37.81                | 13830.20                |
|                          | 28    | 550.70        | 55.44      | 0.92         | 38.73                | 14380.90                |
|                          | 29    | 514.20        | 76.78      | 1.28         | 40.01                | 14895.10                |
|                          | 30    | 575.80        | 38.80      | 0.65         | 40.66                | 15470.90                |
| Hidroeléctrica las Bocas | 31    | 264.40        | 23.24      | 0.39         | 41.04                | 15735.30                |

Tabla B. Muestra de las distancias entre secciones transversales. Fuente: los Autores.

| FID | Length Channel | FID | Length Channel | FID | Length Channel | FID | Length LOB |
|-----|----------------|-----|----------------|-----|----------------|-----|------------|
| 0   | 30.9           | 30  | 15             | 71  | 33.5           | 112 | 34.8       |
| 1   | 36.6           | 31  | 20.8           | 72  | 22.7           | 113 | 51.4       |
| 2   | 19.1           | 32  | 25.7           | 73  | 48.4           | 114 | 35.7       |
| 3   | 17             | 33  | 28.4           | 74  | 31.9           | 115 | 26.5       |
| 4   | 18.3           | 34  | 18.8           | 75  | 36.1           | 116 | 38.6       |
| 5   | 18.8           | 35  | 19.7           | 76  | 31             | 117 | 37.7       |
| 6   | 17.5           | 36  | 24.7           | 77  | 31.6           | 118 | 34.6       |
| 7   | 21.7           | 37  | 27.9           | 78  | 30.6           | 119 | 34.2       |
| 8   | 16.5           | 38  | 25.1           | 79  | 36.8           | 120 | 43.4       |
| 9   | 15.6           | 39  | 25.2           | 80  | 47.8           | 121 | 38.7       |
| 10  | 19             | 40  | 31.5           | 81  | 45.3           | 122 | 42.9       |
| 11  | 19.3           | 41  | 21.4           | 82  | 25             | 123 | 34.1       |
| 12  | 22             | 42  | 17.2           | 83  | 69.4           | 124 | 39.7       |
| 13  | 28.2           | 43  | 16.8           | 84  | 64.4           | 125 | 42.4       |
| 14  | 13.7           | 44  | 14.4           | 85  | 40.7           | 126 | 41.1       |
| 15  | 19             | 45  | 30.8           | 86  | 91.3           | 127 | 54.6       |
| 16  | 16.4           | 46  | 13.7           | 87  | 50.9           | 128 | 65.3       |
| 17  | 17.6           | 47  | 18.7           | 88  | 33             | 129 | 37         |
| 18  | 16.9           | 48  | 21.8           | 89  | 70.3           | 130 | 56.4       |
| 19  | 21.1           | 49  | 22.4           | 90  | 39.6           | 131 | 72.2       |
| 20  | 17.6           | 50  | 32.6           | 91  | 63.2           | 132 | 51.3       |
| 21  | 18.5           | 51  | 21.7           | 92  | 83.2           | 133 | 67.9       |
| 22  | 18             | 52  | 24             | 93  | 82.4           | 134 | 62         |
| 23  | 12.9           | 53  | 18.3           | 94  | 74.1           | 135 | 39.7       |
| 24  | 18             | 54  | 14.3           | 95  | 78.2           | 136 | 79.4       |
| 25  | 16.2           | 55  | 21.2           | 96  | 66.9           | 137 | 32.6       |
| 26  | 14.3           | 56  | 20.3           | 97  | 58.7           | 138 | 40.1       |
| 27  | 22             | 57  | 26.3           | 98  | 56.8           | 139 | 34.6       |
| 28  | 16.9           | 58  | 30.4           | 99  | 60.1           | 140 | 30.2       |
| 29  | 89.8           | 59  | 25.2           | 100 | 62.5           | 141 | 39.6       |
| 30  | 15             | 60  | 23.8           | 101 | 45             | 142 | 34.4       |
| 31  | 20.8           | 61  | 25.7           | 102 | 65.9           | 143 | 25.5       |
| 32  | 25.7           | 62  | 22.4           | 103 | 49.5           | 144 | 26.3       |
| 33  | 28.4           | 63  | 45.4           | 104 | 57             | 145 | 34.7       |
| 34  | 18.8           | 64  | 29.7           | 105 | 67.5           | 146 | 31.1       |
| 35  | 19.7           | 65  | 42.1           | 106 | 85.2           | 147 | 40.8       |
| 36  | 24.7           | 66  | 57.3           | 107 | 51.6           | 148 | 34         |
| 37  | 27.9           | 67  | 48.5           | 108 | 45             | 149 | 49.7       |
| 38  | 25.1           | 68  | 48.1           | 109 | 58.1           | 150 | 59.5       |
| 39  | 25.2           | 69  | 51             | 110 | 38.6           | 151 | 56.4       |
| 40  | 31.5           | 70  | 58.5           | 111 | 43.1           | 152 | 53         |

*Ilustración F. Asignación coeficientes de rugosidad a las secciones transversales.  
Fuente: Los autores.*

| Seccion T | n1    | n2   | n3    | Seccion T | n1    | n2   | n3    | Seccion T | n1    | n2   | n3    | Seccion T | n1    | n2   | n3    |
|-----------|-------|------|-------|-----------|-------|------|-------|-----------|-------|------|-------|-----------|-------|------|-------|
| 14342     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13462     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12264     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2800      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14311     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13430     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12216     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2728      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14275     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13409     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12170     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2694      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14256     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13391     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12145     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2647      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14239     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13375     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12076     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2596      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14220     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13360     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12012     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2516      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14201     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13329     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11971     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2481      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14184     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13316     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11879     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2453      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14162     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13297     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11829     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2332      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14146     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13275     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11796     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2245      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14130     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13253     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11725     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2193      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14111     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13220     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11686     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 2133      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14092     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13199     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11623     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1996      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14070     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13175     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11539     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1930      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14042     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13156     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11457     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1886      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14028     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13142     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11383     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1820      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 14009     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13121     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11305     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1773      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13992     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13100     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11238     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1727      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13975     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13074     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11179     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1676      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13958     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13044     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11122     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1627      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13937     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 13019     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11062     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1570      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13919     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12995     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 11000     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1511      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13901     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12969     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10955     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1442      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13883     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12947     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10889     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1361      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13870     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12901     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10839     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 1248      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13852     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12872     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10782     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 1176      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13836     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12829     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10715     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 1124      | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13821     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12772     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10629     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 966       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13799     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12724     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10578     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 918       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13782     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12676     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10533     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 821       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13693     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12625     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10475     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 772       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13678     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12566     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10436     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 734       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13657     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12533     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10393     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 582       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13631     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12510     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10360     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 528       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13603     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12462     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10295     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 402       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13584     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12430     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10253     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 351       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13564     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12394     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10223     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 295       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13540     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12363     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10183     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 197       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13512     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12331     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 10139     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 116       | 0.035 | 0.05 | 0.035 |
| 13487     | 0.035 | 0.05 | 0.035 | 12300     | 0.066 | 0.05 | 0.066 | 10103     | 0.066 | 0.05 | 0.035 | 45        | 0.035 | 0.05 | 0.035 |

Ilustración G. Simulación del hidrograma de entrada en intervalos de 5 minutos. Fuente: Los autores.

Flow Hydrograph

River: Cauce principal Reach: Reach 1 RS: 52309

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 5 Minute

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: 04FEB2021 Time: 00:00

Fixed Start Time: Date: 04FEB2021 Time: 00:00

No. Ordinates

| Hydrograph Data |                |                         |             |
|-----------------|----------------|-------------------------|-------------|
|                 | Date           | Simulation Time (hours) | Flow (m3/s) |
| 3               | 04Feb2021 0010 | 00:10                   | 0           |
| 4               | 04Feb2021 0015 | 00:15                   | 800         |
| 5               | 04Feb2021 0020 | 00:20                   | 2000        |
| 6               | 04Feb2021 0025 | 00:25                   | 11500       |
| 7               | 04Feb2021 0030 | 00:30                   | 28071       |
| 8               | 04Feb2021 0035 | 00:35                   | 17500       |
| 9               | 04Feb2021 0040 | 00:40                   | 8800        |
| 10              | 04Feb2021 0045 | 00:45                   | 6000        |
| 11              | 04Feb2021 0050 | 00:50                   | 5000        |
| 12              | 04Feb2021 0055 | 00:55                   | 2000        |
| 13              | 04Feb2021 0100 | 01:00                   | 1500        |
| 14              | 04Feb2021 0105 | 01:05                   | 1000        |
| 15              | 04Feb2021 0110 | 01:10                   | 995         |
| 16              | 04Feb2021 0115 | 01:15                   | 600         |
| 17              | 04Feb2021 0120 | 01:20                   | 200         |

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow:  Multiplier:

Ilustración H. Valores de velocidad de flujo para cada S.T. Fuente:  
Los autores.

| Seccion T | V (m/s) | Seccion T | V (m/s) | Seccion T | V (m/s) | Seccion T | V (m/s) | Seccion T | V (m/s) |
|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|-----------|---------|
| 14342     | 24.6    | 13462     | 20.43   | 13462     | 20.43   | 12264     | 16.31   | 2728      | 17.95   |
| 14311     | 23.89   | 13430     | 20.79   | 13430     | 20.79   | 12216     | 16.52   | 2694      | 19.17   |
| 14275     | 23.27   | 13409     | 22.45   | 13409     | 22.45   | 12170     | 19.06   | 2647      | 21.84   |
| 14256     | 23.33   | 13391     | 22.34   | 13391     | 22.34   | 12145     | 22.61   | 2596      | 22.61   |
| 14239     | 23.54   | 13375     | 22.81   | 13375     | 22.81   | 12076     | 23.94   | 2516      | 24.2    |
| 14220     | 23.9    | 13360     | 22.86   | 13360     | 22.86   | 12012     | 22.31   | 2481      | 6.42    |
| 14201     | 23.92   | 13329     | 22.14   | 13329     | 22.14   | 11971     | 20.14   | 2453      | 5.73    |
| 14184     | 23.03   | 13316     | 23.65   | 13316     | 23.65   | 11879     | 21.9    | 2332      | 6.08    |
| 14162     | 22.7    | 13297     | 23.49   | 13297     | 23.49   | 11829     | 19.88   | 2245      | 6.24    |
| 14146     | 24.35   | 13275     | 22.56   | 13275     | 22.56   | 11796     | 21.46   | 2193      | 5.98    |
| 14130     | 24.9    | 13253     | 22.13   | 13253     | 22.13   | 11725     | 24      | 2133      | 5.28    |
| 14111     | 23.97   | 13220     | 21.08   | 13220     | 21.08   | 11686     | 23.92   | 1996      | 7.86    |
| 14092     | 23.13   | 13199     | 21.11   | 13199     | 21.11   | 11623     | 24.71   | 1962      | 9.04    |
| 14070     | 21.12   | 13175     | 20.79   | 13175     | 20.79   | 11539     | 21.23   | 1930      | 12.77   |
| 14042     | 21.87   | 13156     | 20.75   | 13156     | 20.75   | 11457     | 20.38   | 1886      | 15.43   |
| 14028     | 22.06   | 13142     | 20.93   | 13142     | 20.93   | 11383     | 19.32   | 1820      | 19.85   |
| 14009     | 20.17   | 13121     | 21.56   | 13121     | 21.56   | 11305     | 20.33   | 1773      | 20.56   |
| 13992     | 21.34   | 13100     | 21.71   | 13100     | 21.71   | 11238     | 8.44    | 1727      | 18.96   |
| 13975     | 21.86   | 13074     | 20.42   | 13074     | 20.42   | 11179     | 9.85    | 1676      | 17.88   |
| 13958     | 20.67   | 13044     | 20.2    | 13044     | 20.2    | 11122     | 13.59   | 1627      | 7.76    |
| 13937     | 21.72   | 13019     | 19.14   | 13019     | 19.14   | 11062     | 16.24   | 1570      | 8.29    |
| 13919     | 22.41   | 12995     | 19.36   | 12995     | 19.36   | 11000     | 19.68   | 1511      | 8.75    |
| 13901     | 22.88   | 12969     | 8.82    | 12969     | 8.82    | 10955     | 9.5     | 1442      | 10.49   |
| 13883     | 24.1    | 12947     | 7.85    | 12947     | 7.85    | 10889     | 9.39    | 1361      | 17.22   |
| 13870     | 24.35   | 12901     | 7.5     | 12901     | 7.5     | 10839     | 8.6     | 1248      | 5.38    |
| 13852     | 25.28   | 12872     | 7.65    | 12872     | 7.65    | 10782     | 8.27    | 1176      | 4.92    |
| 13836     | 27.42   | 12829     | 7.88    | 12829     | 7.88    | 10715     | 10.24   | 1124      | 5.49    |
| 13821     | 28.7    | 12772     | 10.33   | 12772     | 10.33   | 10629     | 11.85   | 966       | 6.54    |
| 13799     | 28.91   | 12724     | 12.68   | 12724     | 12.68   | 10578     | 10.62   | 918       | 9.16    |
| 13782     | 27.98   | 12676     | 13.94   | 12676     | 13.94   | 10533     | 8.66    | 821       | 12.85   |
| 13693     | 24.48   | 12625     | 16.7    | 12625     | 16.7    | 10475     | 7.66    | 772       | 16.61   |
| 13678     | 23.9    | 12566     | 8.55    | 12566     | 8.55    | 10436     | 7.49    | 734       | 18.46   |
| 13657     | 23.31   | 12533     | 7.94    | 12533     | 7.94    | 10393     | 7.96    | 582       | 17.77   |
| 13631     | 22.49   | 12510     | 7.68    | 12510     | 7.68    | 10360     | 7.4     | 528       | 9.9     |
| 13603     | 21.3    | 12462     | 5.92    | 12462     | 5.92    | 10295     | 7.08    | 402       | 12.31   |
| 13584     | 20.87   | 12430     | 6.64    | 12430     | 6.64    | 10253     | 7.7     | 351       | 17.41   |
| 13564     | 20.7    | 12394     | 7.25    | 12394     | 7.25    | 10223     | 7.74    | 295       | 19.32   |
| 13540     | 21.22   | 12363     | 8.75    | 12363     | 8.75    | 10183     | 9.42    | 197       | 18.19   |
| 13512     | 21.02   | 12331     | 12.91   | 12331     | 12.91   | 10139     | 11.67   | 116       | 5.86    |
| 13487     | 19.49   | 12300     | 16.31   | 12300     | 16.31   | 10103     | 16.36   | 45        | 9.12    |