

Estudios Básicos de Amenaza por Inundación y Avenida Torrencial para los Centros Poblados de Aguaclara y Tienda Nueva en zona rural del municipio de Palmira



ESTUDIO 14: ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES AGUACLARA ESCALA 1:2000



Adición al Convenio Interadministrativo MP968 de 2021



Alcaldía de Palmira



**Universidad
del Valle**

OBSERVATORIO SIMOLOGICO Y GEOFISICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO (OSSO), UNIVERSIDAD DEL VALLE

ALCALDÍA DE PALMIRA, DIRECCIÓN DE GESTIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES-DGRD



**Estudios Básicos de Amenaza por Inundación y Avenida Torrencial para los Centros Poblados de Aguaclara y Tienda Nueva en zona rural del municipio de Palmira
Adición al Convenio Interadministrativo MP968 de 2021**



Alcaldía de Palmira

ALCALDÍA MUNICIPAL DE PALMIRA

ÓSCAR EDUARDO ESCOBAR GARCÍA

Alcalde

FERNANDO JAVIER LEAL LONDOÑO, Ing.
Director de Gestión del Riesgo de
Desastres

CAMILO A. SAAVEDRA ESCOBAR, Adm.
Director 2021 – 2022 DGRD

ADRIANA TERREROS, Ing. Agrónoma
Profesional de Planta DGRD

OMAR A. CHAVES MONCAYO, Ing. Civil
Contratista DGRD

DIANA AREVALO, Ing. Civil
Contratista Oficina de Planeación

OBSERVATORIO SISMOLOGÍCO Y GEOFÍSICO DEL SUROCCIDENTE COLOMBIANO-OSSO UNIVERSIDAD DEL VALLE

ELKIN DE JESUS SALCEDO HURTADO, Ph.D.

Director de Proyecto Estudios de Amenaza de Palmira - Director OSSO

DIANA M. RIVERA JIMENEZ
Coordinadora Administrativa

JHONATTAN FERNANDEZ C., MSc.
Coordinador Técnico

HISTORICIDAD

KAREN A. SÁNCHEZ E., Geógrafa
Líder Equipo

GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

JUAN CARLOS FLORES, Geól.
Líder Equipo

MARIA ALEJANDRA VELEZ, Geól.
Profesional de Apoyo

ESTEBAN A. NOREÑA, Geól.
Profesional de Apoyo

SIG Y TOPOGRAFÍA

JHON JAIRO BARONA, Ph.D.

Líder Equipo

PAOLA T. GOMEZ, Geóg.

Profesional de SIG

JORGE A. DÍAZ, Geóg.

Profesional de SIG

LINA ESPINAL, Ing.

Profesional de SIG

MIREYA LÓPEZ BOTERO, Ing.

Profesional de Topografía

ALEJANDRO FERNANDEZ, Téc.

Apoyo Topografía

AMENAZA INUNDACIÓN Y AVENIDA TORRENCIAL

RAFAEL CLEMENT, Ing.

Profesional Hidráulica Amenaza por Avenida Torrencial

NOVIEMBRE DE 2022

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	6
2. OBJETIVOS	7
2.1. Objetivos específicos.....	7
3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	8
3.1. Área de estudio	8
4. CONCEPTUALIZACIÓN	10
4.1. Conceptualización de los fenómenos estudiados para el análisis de avenidas torrenciales	10
4.1.1. Avenida torrencial.....	10
4.1.2. Tipos de avenidas torrenciales	10
4.1.3. Amenaza	11
4.1.4. Otras definiciones.....	11
4.1.5. Clasificación de flujos en ríos	12
5. SOLIDOS PROVENIENTES DE LA EROSIÓN DE LADERA	15
5.1. Factor L-S: Relieve	16
5.2. Factor C: Cobertura vegetal.....	20
5.3. Factor K: erosionabilidad del suelo	21
6. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES A ESCALA 1:2.000	24
6.1. Reología y mecánica de lodos.....	24
6.1.1. Características generales de las avenidas torrenciales	24
6.1.2. Comportamiento de la relación esfuerzo cortante – deformación.....	26
6.1.3. Modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988)	27
6.1.4. Metodología del modelo Flo-2D	30
6.2. Generalidades	30
6.2.1. Ecuaciones hidrodinámicas	31
6.2.2. Ecuaciones de flujos hiperconcentrados en modelo Flo-2D.....	33
6.2.3. Hipótesis y limitaciones	37
6.2.4. Metodología de aplicación del modelo Flo-2D para AVT	37
6.3. Elaboración y resultados del modelo Flo-2D.....	38
6.3.1. Geometría del modelo	38

6.3.2.	Condiciones de frontera.....	39
6.3.3.	Componente sólido para el modelo de avenidas torrenciales	41
6.3.4.	Rugosidad n de Manning.....	45
6.3.5.	Resultados modelo Flo-2D	49
6.4.	Mapa de zonificación de la amenaza por AVT a escala 1:2.000	61
6.4.1.	Metodología.....	61
6.4.2.	Resultados Intensidad de flujo (IDF).....	66
6.4.3.	Resultados de Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales (AVT) 68	
7.	CONCLUSIONES.....	70
8.	RECOMENDACIONES.....	72
9.	REFERENCIAS.....	73

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización del municipio de Palmira	8
Figura 2. Localización Centro Poblado Aguaclara	9
Figura 3. Clasificación de flujo en ríos	14
Figura 4. Diagrama de flujo para cálculo de factor LS	17
Figura 5. Mapa de resultado de factor de longitud – Factor L	18
Figura 6. Mapa de resultado de factor de pendiente – Factor S.....	19
Figura 7. Mapa de resultado de factor de relieve – Factor LS.....	20
Figura 8. Mapa de resultado de factor de cobertura – Factor C	21
Figura 9. Factor K para el río Aguaclara	23
Figura 10. Esquema perfil de un frente de detritos	25
Figura 11. Morfología de la huella de los flujos detríticos.....	25
Figura 12. Perfil de un frente de detritos con las respectivas fases	25
Figura 13. Relación esfuerzo – deformación para distintas clases de fluidos	26
Figura 14. Dominio computacional y dominio del modelo Flo-2D para avenidas torrenciales	39
Figura 15. Mapa de condiciones de frontera para modelo Flo-2D.....	40
Figura 16. Hidrograma de entrada para 100 años de periodo de retorno	41
Figura 17. Sedimentograma de sólidos gruesos para Junction RAC2 (Tr075)	42
Figura 18. Sedimentograma de sólidos gruesos para Junction RAC2 (Tr100)	43
Figura 17. Imágenes de referencia de cauces y sus valores de rugosidad n de Manning.....	46
Figura 18. Distribución en planta de las rugosidades n de Manning	49
Figura 19. Resultados profundidades y velocidades (Tr2.33 años).....	50
Figura 20. Resultados profundidades y velocidades (Tr005 años).....	50
Figura 21. Resultados profundidades y velocidades (Tr010 años).....	51
Figura 22. Resultados profundidades y velocidades (Tr025 años).....	52
Figura 23. Resultados profundidades y velocidades (Tr050 años).....	52
Figura 24. Resultados profundidades y velocidades (Tr075 años).....	53
Figura 25. Resultados profundidades y velocidades (Tr100 años).....	54
Figura 26. Resultados profundidades y velocidades (Tr200 años).....	55
Figura 27. Resultados profundidades y velocidades (Tr300 años).....	55
Figura 28. Resultados profundidades y velocidades (Tr400 años).....	56
Figura 29. Resultados profundidades y velocidades (Tr500 años).....	56
Figura 33. Localización de secciones y perfil con profundidades de flujo para 100 años de periodo de retorno (AVT).....	57
Figura 32. Perfil longitudinal del río Aguaclara	58
Figura 34. Sección transversal (ST-01) para 100 años de periodo de retorno.....	59
Figura 35. Sección transversal (ST-02) para 100 años de periodo de retorno.....	59
Figura 36. Sección transversal (ST-03) para 100 años de periodo de retorno.....	60
Figura 37. Sección transversal (ST-04) para 100 años de periodo de retorno.....	60
Figura 38. Sección transversal (ST-05) para 100 años de periodo de retorno.....	61
Figura 30. Curva de amenaza que relaciona la magnitud del evento representada mediante el índice de intensidad de flujo con la probabilidad de excedencia (periodo de retorno	62
Figura 31. Gráfica de la probabilidad de excedencia (o falla) en función del índice de confiabilidad (Beta) para diferentes distribuciones de probabilidad.....	64
Figura 32. Resultados intensidad de flujo IDF para diferentes periodos de retorno.....	67

Figura 33. Zonificación de la amenaza final por avenidas torrenciales centro poblado de Aguaclara
..... 69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Comunas de la zona rural de Palmira	9
Tabla 2. Parámetro de resistencia K para flujo laminar y diferentes superficies	34
Tabla 3. Diámetros característicos y contenido de arcillas de las matrices de flujos de lodos	35
Tabla 4. Coeficientes para la determinación de esfuerzos cortantes y viscosidad de las matrices de flujos de lodos.....	36
Tabla 5. Caudales máximos (m ³ /s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico	41
Tabla 6. Coeficientes de concentración volumétrica ingresados al modelo Flo-2D	43
Tabla 5. Cálculo de la rugosidad n de Manning en el cauce principal.....	47
Tabla 6. Valores de Manning adoptados	48
Tabla 7. Probabilidades de excedencia anual relacionada con el índice de confiabilidad para diferentes distribuciones de probabilidad.....	64

1. INTRODUCCIÓN

Según la Ley 1523 de 2012 y el decreto 1807 de 2014 (compilado en el decreto 1077 de 2015) especifican que uno de los insumos para la gestión de riesgo de desastres son las zonificaciones por avenidas torrenciales, con el objetivo de contribuir al bienestar, seguridad, calidad de vida y desarrollo sostenible.

El Servicio geológico Colombiano (SGC) presenta la Guía metodológica para la zonificación de avenidas torrenciales, en el cual define los conceptos y las metodologías relacionadas con las zonificaciones de eventos de avenidas torrenciales. En la guía, el concepto de avenidas torrenciales se define, a manera general tal que: “flujo que rápido transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas que puede ser generado por efecto de lluvias intensas. Involucra el transporte de una mezcla de agua y un contenido significativo de sólidos en diferentes proporciones”. Una avenida torrencial, está conformada por un frente, el cuerpo y la cola, donde se presentan simultáneamente fenómenos de sedimentación y erosión.

Existente diferentes procesos o tipos de eventos, relacionados con las avenidas torrenciales, los procesos de impacto, procesos de presiones, socavación lateral y acumulación; la definición de estos procesos se desarrolla en la conceptualización de los conceptos de avenidas torrenciales en el apartado 4 del presente documento.

En primer lugar, es importante definir el aporte de sedimentos por erosión en laderas, lo cual es posible determinar aplicando las ecuaciones generales de pérdidas de suelo. La importancia de cuantificar este aporte de sedimentos, es porque el modelo para análisis de avenidas torrenciales, debe considerar todos los aportes que puedan llegar al cauce durante un evento crítico.

Para la zonificación de la amenaza a escala 1:2,000, en el centro poblado de Aguaclara, se desarrolla el estudio hidráulico para la zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales, un modelo hidrodinámico con capacidad de simular variables reológicas para diferentes periodos de retorno, el programa empleado para la modelación es Flo-2D, el cual resuelve el modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988). En la construcción de los modelos se emplean los resultados del estudio hidrológico para el componente líquido, el cual presenta hidrogramas asociados a 2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años de periodo de retorno. A partir de los resultados que se obtienen de dicha modelación, se realiza la zonificación de la amenaza siguiendo las metodologías de la Guía metodológica para la zonificación de avenidas torrenciales (SGC y PUJ, 2021), para escala 1:2.000.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos específicos

- Recopilar la información necesaria para la construcción del modelo hidráulico.
- Realizar la modelación hidráulica para el análisis de avenidas torrenciales en el centro poblado de Aguaclara, en zona rural del municipio de Palmira.
- Delimitar las zonas de amenaza, en niveles alto, medio y bajo para el centro poblado de Aguaclara, en zona rural del municipio de Palmira.

3. LOCALIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.1. Área de estudio

El municipio de Palmira se encuentra ubicado en la región Suroriente del departamento del Valle del Cauca (Figura 1) y se localiza alrededor de los 03°31'39" de latitud Norte y 76°18'01" de longitud Oeste del meridiano de Greenwich. Limita al Norte con el municipio de El Cerrito, al Sur con los municipios de Pradera y Candelaria, al Este con el departamento del Tolima y al Oeste con los municipios de Cali, Yumbo y Vijes.

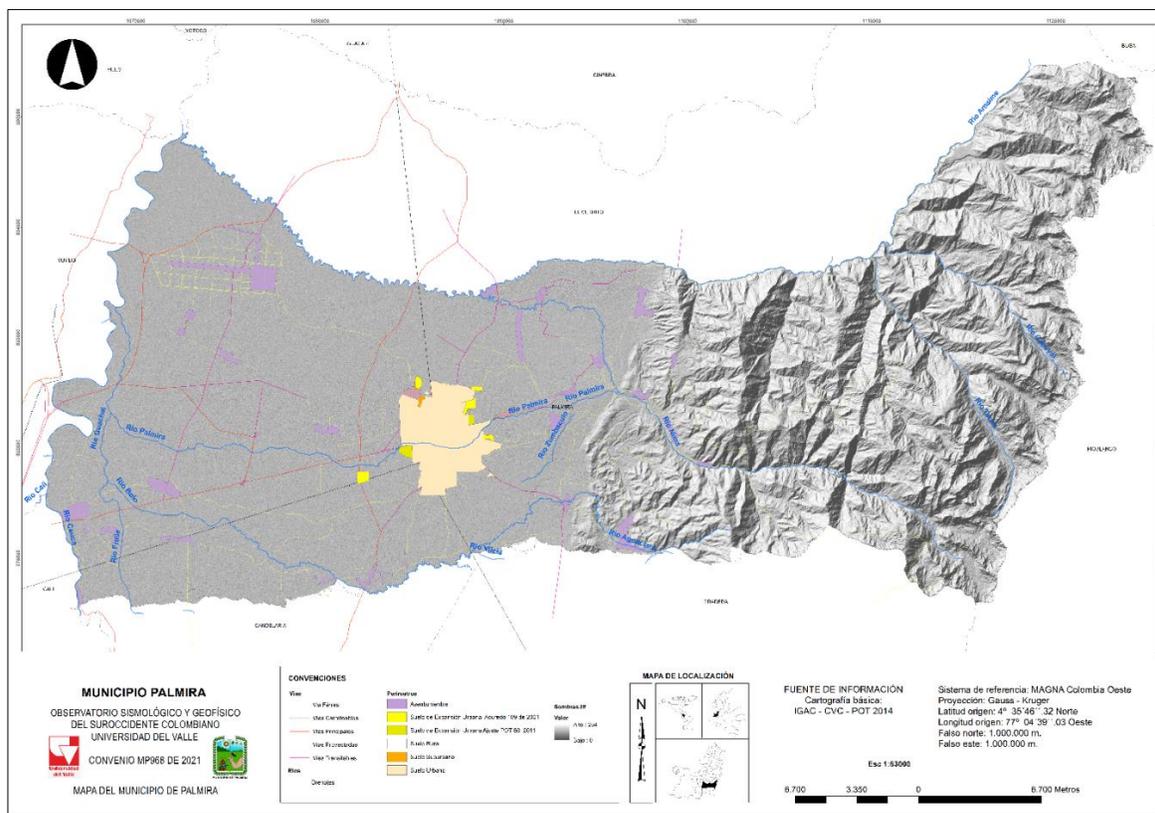


Figura 1. Localización del municipio de Palmira
Fuente: elaboración propia.

El municipio cuenta con un área aproximada de 100.000 Ha y se divide en dos grandes zonas fisiográficas de Este a Oeste: la zona montañosa y de piedemonte, y la zona plana asociada al valle geográfico del río Cauca sobre la cual se encuentra ubicada la cabecera urbana del municipio. Cuenta con una cantidad aproximada de población, según proyecciones DANE a 2021, de 356.000 habitantes; la gran mayoría concentrados en la cabecera urbana con un aproximado de 281.000 habitantes y unos 74.000 habitantes en los demás centros poblados y rural disperso.

El centro poblado de Aguaclara hace parte del sistema de asentamientos rurales del municipio y corresponde a uno de los centros poblados principales del corregimiento que lleva su nombre (Tabla 1).

Tabla 1. Comunas de la zona rural de Palmira

Comuna	Corregimiento	No. Corregimientos
8	Roza, La Torre, La Acequia.	3
9	Matapalo, Obando, La Herradura, Palmaseca, Coronado (rural), Zamorano (rural).	6
10	La Dolores, Guanabanal, Caucaseco, Juanchito.	4
11	Bolo San Isidro, Bolo Italia, Bolo Alizal.	3
12	Amaime, Boyacá, La Pampa.	3
13	Tienda Nueva, Tablones, Guayabal, Barrancas.	4
14	La Zapata, Aguaclara , Ayacucho.	3
15	Combia, Toche.	2
16	Potrerillo, Caluce, Tenjo.	3

Fuente: Alcaldía de Palmira, 2021.

Este centro poblado se encuentra ubicado sobre la parte plana proximal al piedemonte del flanco occidental de la Cordillera Central en las coordenadas 3°30'13"N - 76°14'12.0"W. La Figura 2 muestra la localización del centro poblado.

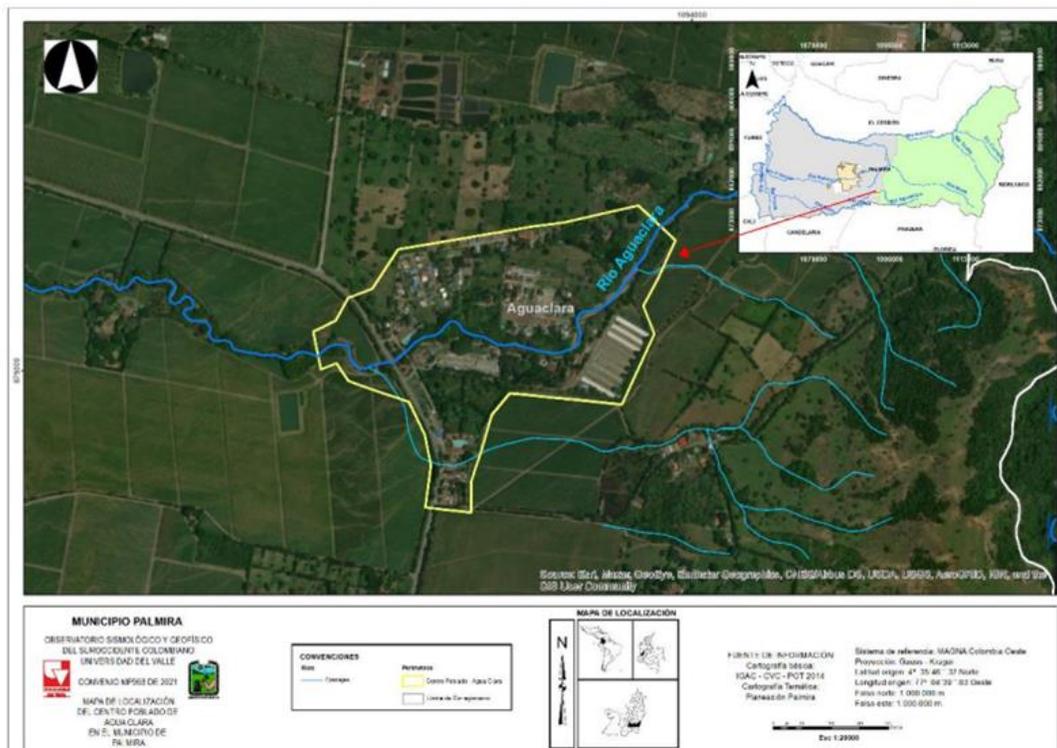


Figura 2. Localización Centro Poblado Aguaclara

Fuente: elaboración propia.

4. CONCEPTUALIZACIÓN

4.1. **Conceptualización de los fenómenos estudiados para el análisis de avenidas torrenciales**

4.1.1. Avenida torrencial

La Guía Metodológica para la Zonificación por Avenidas Torrenciales (Servicio Geológico Colombiano (SGC), 2021) define una avenida torrencial como un “*un grupo particular de flujos, comúnmente denominados avenidas torrenciales o flujos de detritos*”, se caracterizan por ser un “*flujo que rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas que puede ser generado por efecto de lluvias intensas. Involucra el transporte de una mezcla de agua y un contenido significativo de sólidos en diferentes proporciones. El aporte de sólidos al flujo puede provenir de las laderas adyacentes o del lecho de los cauces. Finalmente, cuando el flujo alcanza zonas de bajas pendientes se genera depósito del material a lo largo de su trayectoria.*”

4.1.2. Tipos de avenidas torrenciales

Los procesos que generan daños en las avenidas torrenciales se relacionan con el de “solicitaciones”, el cual pretende de una manera objetiva, la interacción entre las características del fenómeno y diferentes elementos expuestos, facilitando el análisis de la intensidad del evento y sus posibles daños (INGEOMINAS – CVC, 2001). En el caso de las avenidas torrenciales, se consideran, de manera simple pero representativa, los siguientes procesos de daño o “solicitaciones”: impactos, presiones, socavación lateral y acumulaciones.

- **Impactos:** sollicitación generada por elementos de gran tamaño, altas velocidades, produciendo fuerzas puntuales, que generan daños severos a las estructuras.
- **Presiones:** sollicitación generada por flujo de gravas y arenas desplazándose a con una alta velocidad, ejerciendo fuerzas uniformes sobre las superficies de contacto, lo que permite a su vez una mejor respuesta de los elementos en contacto.
- **Socavación lateral:** sollicitación generada por la erosión hídrica de algunas márgenes del cauce, que afectan los taludes y pueden resultar en la desestabilización de áreas superficiales, el nivel de afectación es variable en función de la magnitud del flujo y los elementos expuestos en el área de influencia.

- **Acumulaciones:** se relacionan con los procesos de deposición de materiales, generalmente finos, y pueden considerar una afectación por obstrucción y taponamiento de ciertas estructuras, más que una sollicitación física.

4.1.3. Amenaza

Según la ley 1523 del 2012 la Amenaza se define como “*el peligro latente de que un evento natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdidas de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales*”.

4.1.4. Otras definiciones

- a) **Fuente:** Lugar o sitio donde se puede generar un evento.
- b) **Inundación:** según el Diccionario de la Real Academia Española (RAE), corresponde a la acción y efecto de inundar, es decir, cubrir con agua los terrenos y a veces las poblaciones. La Directriz Básica de Planificación de Protección Civil ante el Riesgo de Inundaciones en España (MIJ, 1995 tomado de IDEAM, 2017), define inundación como la sumersión temporal de terrenos normalmente secos, como consecuencia de la aportación inusual y más o menos repentina de una cantidad de agua superior a la que es habitual en una zona determinada (IDEAM, 2017). En esencia, es un evento natural que se produce en las corrientes de agua y/o lluvias intensas que, al sobrepasar la capacidad de retención del suelo y la capacidad hidráulica de la red de drenaje, las aguas se desbordan e inundan las llanuras de inundación, generalmente, terrenos aledaños a los cursos de agua.
- c) **Inundación aluvial:** se produce cuando hay lluvias persistentes y generalizadas dentro de una gran cuenca, generando un incremento paulatino de los caudales de los grandes ríos hasta superar la capacidad máxima de almacenamiento; se produce entonces el desbordamiento y la inundación de las áreas bajas y planas aledañas al cauce principal. Este tipo de crecientes son inicialmente lentas y tienen una gran duración (CVC-Universidad del Valle, 2010).
- d) **Susceptibilidad:** “es el grado de predisposición que tiene una fuente a que en ella se genere un evento (Escobar, 2007). La susceptibilidad en los estudios de análisis y evaluación de amenazas constituye la base inicial y el primer paso para el análisis y zonificación de amenazas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2014).” (Grupo técnico CORCUENCA - IDEAM, 2019).

- e) **Sedimentación:** Deposición de material sólido producido por movimientos de masa en laderas por erosión superficial, en cauces de ríos, por inundaciones, avenidas torrenciales, aludes, marejadas o tsunamis (OSSO, 2009).

4.1.5. Clasificación de flujos en ríos

El tipo de flujo en un cauce natural puede ser clasificación según la concentración o volumen relativo de sedimentos que transporta. Dicho esto, es posible clasificar los flujos en tres clases descritas a continuación:

- **Flujos de baja concentración:** corresponden a flujos que se comportan como fluidos newtonianos, cuyas cantidades de sedimentos son pequeñas y no alcanzan a alterar las propiedades hidrodinámicas del agua. Según Costa (1984), los flujos de baja concentración son aquellos con un valor de C_s (Relación entre volumen sólido y volumen líquido), es inferior al 25% y cuya concentración volumétrica C_v (Relación entre volumen sólido y volumen total de aguas más sedimentos), es inferior al 20%, con una densidad de mezcla (ρ), inferior o igual a $1,3 \text{ g/cm}^3$. Meunier (1991) define los flujos de baja concentración como aquellos cuya concentración volumétrica (C_v), no supera el 5,0 % y cuya densidad es menor o igual a $1,3 \text{ g/cm}^3$.
- **Flujos hiperconcentrados (o superconcentrados):** en esta clase se incluyen las avenidas torrenciales o flujos de lodos, donde la principal característica de esta clase es que la concentración de sedimentos es tal que modifica el comportamiento hidrodinámico del agua, específicamente las características reológicas (viscosidad y esfuerzo cortante) del flujo. Se garantizan por ser monofásicos u homogéneos. Los flujos hiperconcentrados, según Costa (1984), son aquellos que cuentan con una concentración volumétrica (C_v) entre el 20% y el 100%, con una densidad superior a $1,3 \text{ g/cm}^3$. Por otra parte, Meunier (1991) propone el rango de 5% a 60% de concentración de sedimentos (C_s), para considerarse un flujo como hiperconcentrado.
- **Lavas torrenciales o corrientes de derrubios:** se caracteriza por ser un flujo visco-plástico y tener altas concentraciones de material sólido, según Costa (1994), las lavas torrenciales son aquellas cuya concentración de sedimentos (C_s), es superior al 100% y la densidad de mezcla superior a 1.8 g/cm^3 . Por su parte Meunier (1991), clasifica las lavas torrenciales como aquellos flujos con concentraciones de sedimentos (C_s) entre el 60% y 230%.

La concentración de sedimentos (C_s) y la concentración volumétrica (C_v) y se calculan con las siguientes expresiones.

$$C_s = \frac{V_s}{V_l} \text{ (Ecuación 1)}$$

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_l}$$

$$C_v = \frac{C_s}{C_s + 1} \text{ (Ecuación 2)}$$

Donde:

V_s : Volumen sólido

V_l : Volumen líquido

Ahora bien, la concentración por peso C_w (relación entre el peso de los sedimentos y volumen líquido), se calcula en función de la concentración volumétrica de sedimentos y la concentración de sedimentos C_s , tal que:

$$C_w = \gamma_s C_s \text{ (Ecuación 3)}$$

$$C_w = \frac{\gamma_s C_v}{1 - C_v} \text{ (Ecuación 4)}$$

Donde:

γ : Peso específico de los sedimentos (en general se asume 2.650 kg/m^3)

Ahora bien, se calcula la concentración de sedimentos por peso, para un valor de $C_s = 5,0$ %:

$$C_w = 2.650 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 0,05 = 132,4 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \text{ (Ecuación 5)}$$

Según lo anterior, para el criterio de Meunier, donde se considera un $C_s = 5$ % como límite inferior para clasificar un flujo, como hiperconcentrado, se obtiene una concentración de sedimentos de $132,4 \text{ kg/m}^3$, lo cual se considera lo suficientemente alto, para un río; luego, en el marco del presente estudio, se decide adoptar el criterio de Meunier (1991) para la clasificación de avenidas fluviales.

Meunier (1991), define los flujos con baja concentración como “fluviales”, los cuales se comportan como fluidos newtonianos y tienen validez dentro de la hidráulica clásica y los flujos hiperconcentrados como “flujos torrenciales”, porque en estos no es posible tratar independientemente la fase sólida y la fase líquida para efectos de cálculo. De acuerdo con lo anterior, los flujos hiperconcentrados (“avenidas torrenciales”, según lo mencionado previamente), son flujos que afectan las propiedades reológicas del fluido (entendiéndose flujo como mezcla líquido y sólido). En la Figura 3 se presenta la clasificación de los flujos según Meunier (1991).

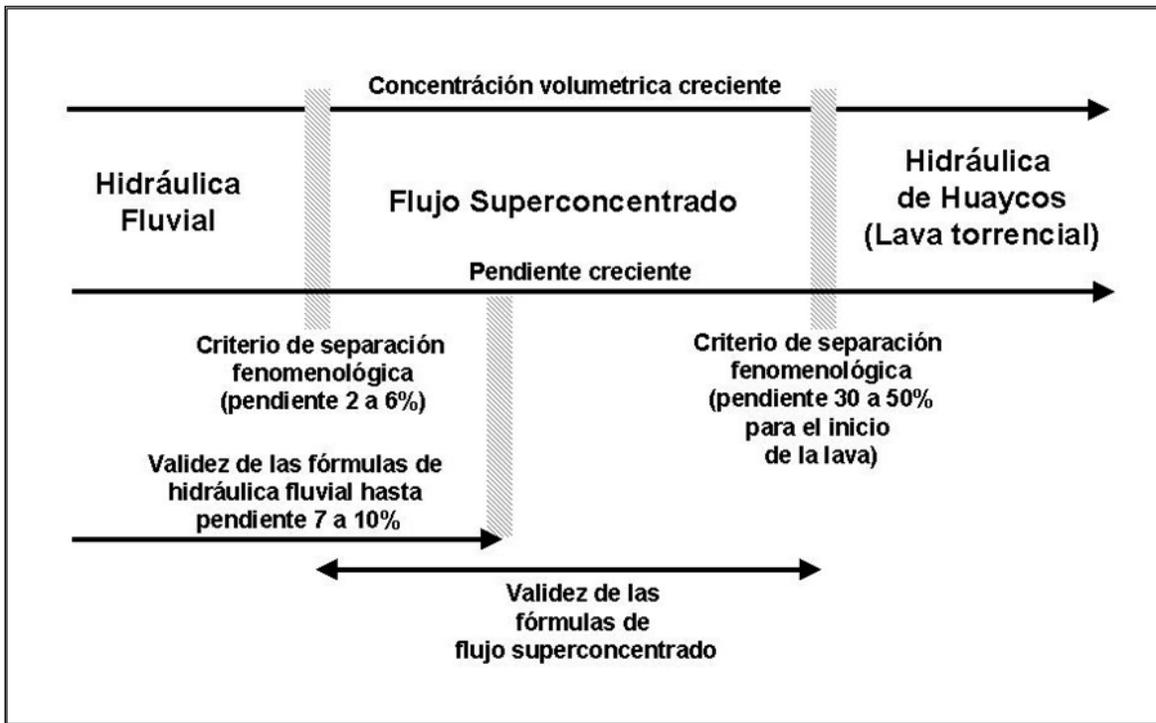


Figura 3. Clasificación de flujo en ríos
Fuente: (Meunier, 1991)

5. SOLIDOS PROVENIENTES DE LA EROSIÓN DE LADERA

En el proceso de avenida torrencial la forma recurrente de aporte de sólidos sucede por la erosión en ladera, a través del transporte de suelo por medio del agua, el cual resulta de la producción de sedimentos generados durante la ocurrencia de la escorrentía en la ladera; este proceso es más conocido como erosión laminar, el cual corresponde al sedimento generado por la lluvia que impacta en las unidades de análisis o las cuencas. La erosión pluvial o laminar se conoce como el desprendimiento de suelo debido a la energía que genera la caída de la lluvia; para que se produzca erosión las partículas sueltas deben ser transportadas desde el sitio de desprendimiento. Dicho transporte de partículas de suelo desprendido por salpicadura se produce debido a las gotas de lluvia, así como por el flujo superficial (Haan & Barfield, 1994).

La erosión laminar se ha convertido en una de las formas más peligrosas de degradación del suelo, lo que ha conducido a una reducción significativa de la fertilidad del suelo y la herramienta más utilizada para estimar las pérdidas de suelo ocasionadas por la erosión hídrica de tipo laminar corresponde a la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo (USLE por sus siglas en inglés), se desarrolló en EE. UU. a hacia 1930 por el Servicio de Conservación de Suelos del Departamento de Agricultura de EE. UU. (USDA por sus siglas en inglés)

La USLE expresa el promedio de las pérdidas anuales de suelo a largo plazo (en toneladas métricas por hectárea y año, t/ha/año) y por tanto no es válida para un año concreto ni para un evento particular. La ecuación es la siguiente:

$$A = R \times K \times L \times S \times C \times P \text{ (Ecuación 6)}$$

Fuente: (Wischmeier, 1978)

Donde:

- **A:** es la pérdida de suelo por unidad de superficie, medida en toneladas métricas por unidad de superficie (t/ha).
- **R:** es el factor erosividad de la lluvia; es el producto acumulado para el período de interés (normalmente un año), con cierta probabilidad de ocurrencia (normalmente 50% o promedio), de la energía cinética por la máxima intensidad en 30 minutos de las lluvias. Sus unidades son (MJ/ha/año) (mm/h) 10, pero suelen simplificarse a energía cinética por unidad de superficie (J/ha).
- **K:** es el factor erosionabilidad del suelo; es la cantidad promedio de suelo perdido por unidad del factor erosividad de la lluvia (Mg/J), cuando el suelo en cuestión es

mantenido permanentemente desnudo, con laboreo secundario a favor de una pendiente del 9% de gradiente y 22,1 m de longitud.

- **L:** (adimensional) es el factor longitud de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con una longitud de pendiente dada y la que ocurre en 22,1 m de longitud, a igualdad de los demás factores.
- **S:** (adimensional) es el factor gradiente de la pendiente; la relación entre la pérdida de suelo con un determinado gradiente y el estándar de 9 %, a igualdad de los demás factores.
- **C:** (adimensional) es el uso y gestión de suelos; es la relación de pérdidas por erosión entre un suelo con un determinado sistema de uso y gestión (rotación de cultivos, uso de estos, laboreo, productividad, gestión de residuos, etc.) y el mismo suelo puesto en las condiciones en que se definió K, a igualdad de los demás factores.
- **P:** (adimensional) es el factor relacionado con la práctica mecánica de apoyo; la relación entre la pérdida de suelo con determinada mecánica (laboreo en contorno, en fajas, terrazas, etc.) y la que ocurre con laboreo a favor de la pendiente, a igualdad de los demás factores.

La erosión laminar está estrechamente relacionada con la tasa de precipitación o la intensidad de precipitación, derivada de la determinación de las intensidades de precipitación para cada periodo de retorno analizado en el estudio (2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años); el modelo HEC-HMS permite realizar la estimación de la pérdida de suelo a partir de la implementación del módulo sedimentos, en el cual se cuenta con la aplicación de la ecuación USLE, de esta forma se parte del mismo modelo utilizado para la estimación de caudales líquidos en cada una de las unidades de análisis.

A continuación, se presentan los factores que se tuvieron en cuenta en la modelación hidrológica de erosión laminar para obtener los sedimentogramas de las subcuencas de estudio.

5.1. Factor L-S: Relieve

La longitud y ángulo de la pendiente del terreno influye en los fenómenos erosivos de ladera, lo cual se representa a través del factor L-S, que se define como la distancia desde el punto de origen de escorrentía hasta el punto en que la pendiente decreta lo suficiente para que puedan formarse depósitos o hasta que aquella encuentre un canal definido de desagüe.

El cálculo de los factores Longitud (L) y pendiente (S por su inicial en inglés de “Slope”), se calculan mediante por separado, para en primer lugar, para posteriormente determinar el factor LS, que es el producto de los 2 primeros factores mencionados. Así, se logra representar la relación entre la pérdida del suelo en un área con una longitud y pendiente determinadas. El procedimiento de cálculo para determinar el este factor es el que se describe en el diagrama de flujo siguiente, el cual está basado en las expresiones de McCool et Al (1989) usado para la ecuación universal USLE y Desmet & Goovers (1996), según (Ghosal1 & Bhattacharya1, 2020).

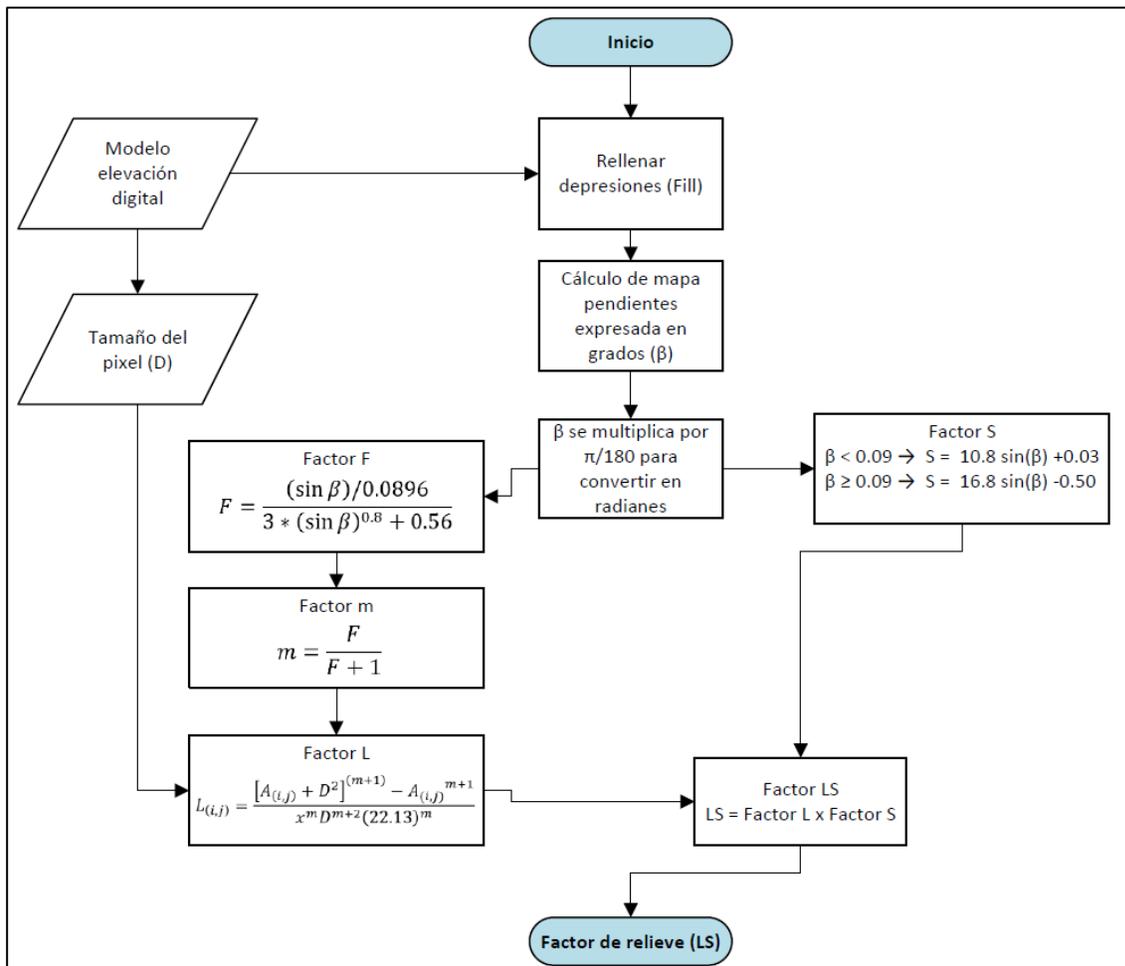


Figura 4. Diagrama de flujo para cálculo de factor LS
Fuente: Elaboración propia a partir de autores referenciados

Como es posible observar en la figura anterior, el insumo base para el cálculo del factor LS, es el modelo de elevación digital (DEM), que para el caso se emplea el modelo de elevación digital ALOS PALSAR (también empleado para el estudio de zonificación de AVT para la zona rural del municipio de Palmira), el cual cuenta con una resolución de 12,5 m por píxel. A continuación, se muestran los resultados de los factores de longitud (L) y pendiente (S), seguido del resultado final del factor de relieve LS.

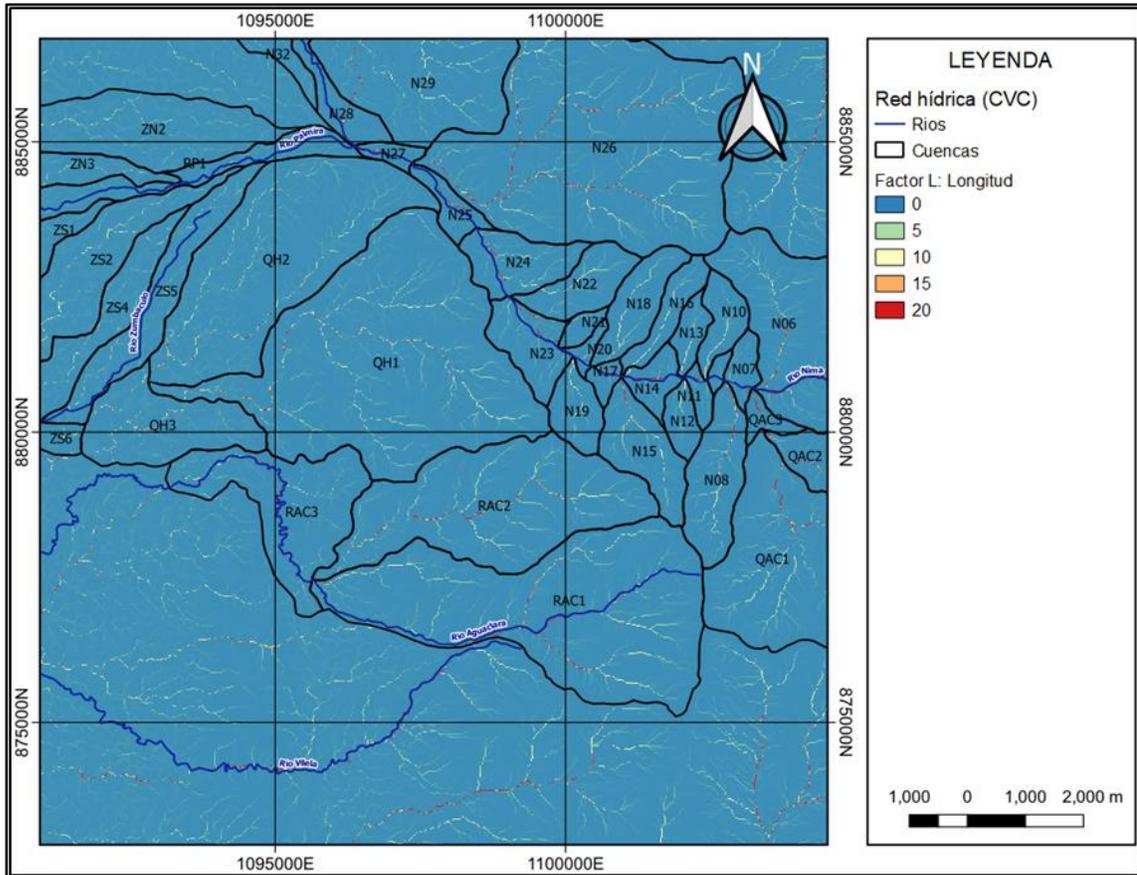


Figura 5. Mapa de resultado de factor de longitud – Factor L
Fuente. Elaboración propia

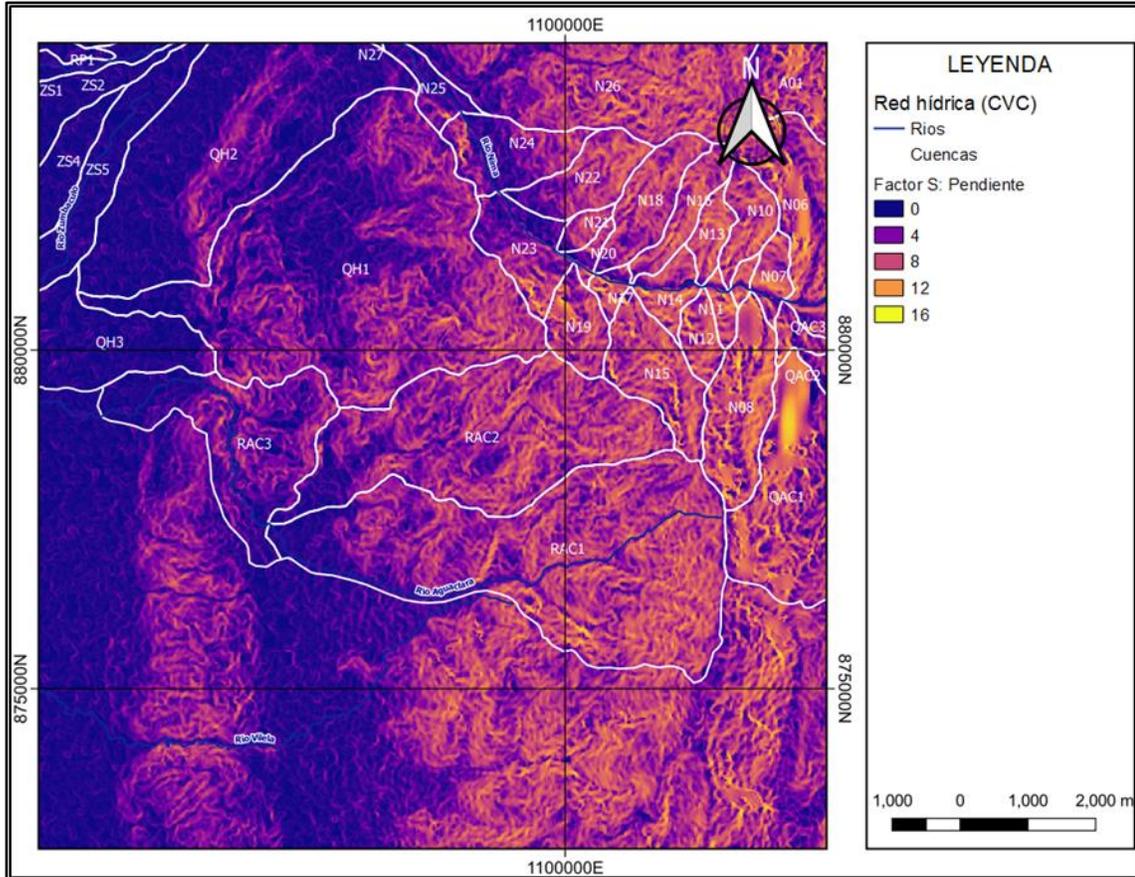


Figura 6. Mapa de resultado de factor de pendiente – Factor S

 Fuente. Elaboración propia

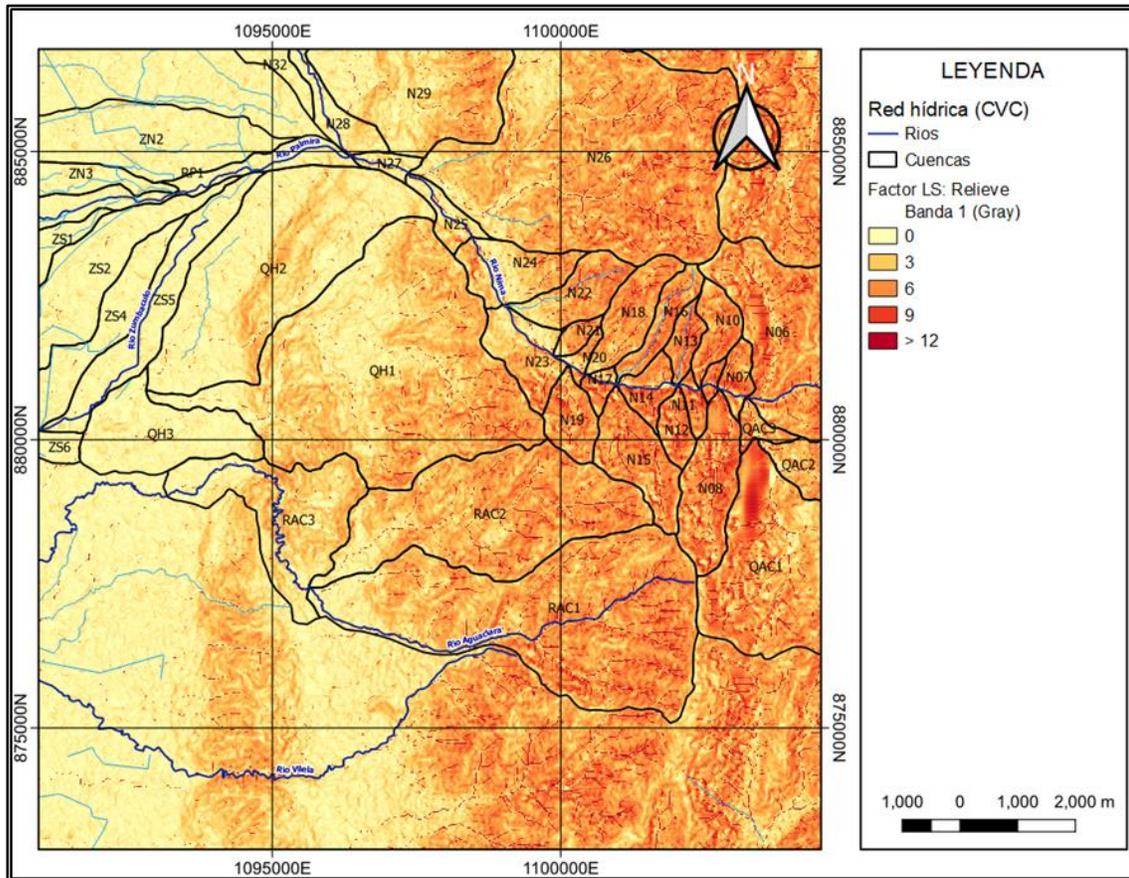


Figura 7. Mapa de resultado de factor de relieve – Factor LS
Fuente. Elaboración propia

5.2. Factor C: Cobertura vegetal

En el modelo original del USLE, el factor C se define como un factor de “Manejo de cultivos”. En la mayoría de los casos se trata del factor de más cuidado, pues repercute directamente en la tasa total de sedimentos, de donde surge su importancia.

Este factor relaciona la pérdida de suelo con área con y sin capa de vegetación, lo que hace necesario poder evaluar la vegetación con un parámetro normalizado, y en efecto, el factor C se depende del Índice de Diferencia Vegetativo Normalizado (NDVI por sus siglas en inglés). La relación entre el factor C y el NDVI está dada por la ecuación propuesta por (Lin, Lin, & Chou, 2002), que es la fórmula que mejor se representa las cuencas en Latinoamérica:

$$C = \left(\frac{1-NDVI}{2} \right)^{1+NDVI} \quad (\text{Ecuación 7})$$

Fuente: (Lin, Lin, & Chou, 2002)

El mapa de NDVI que se emplea como base es de la Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca (CVC). A partir de este mapa se genera el respectivo cálculo del factor de cobertura y se presenta el mapa del factor C a continuación.

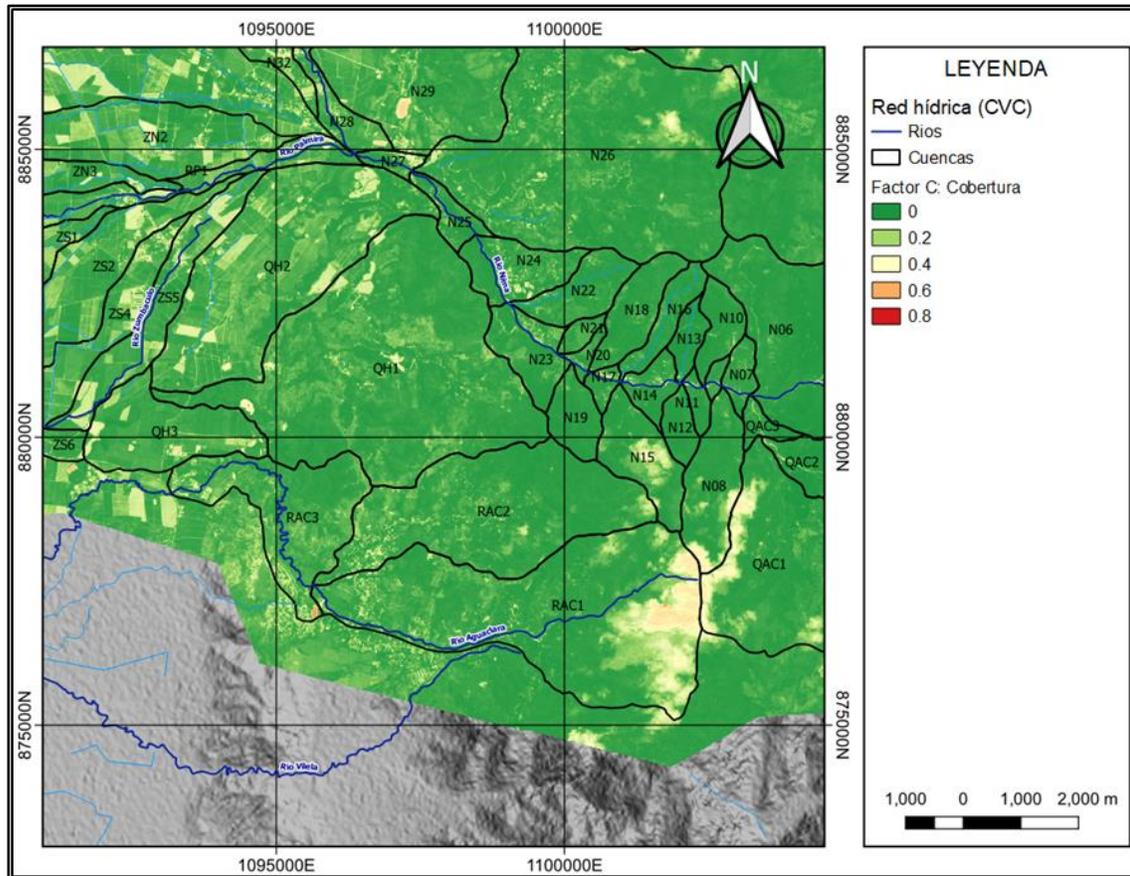


Figura 8. Mapa de resultado de factor de cobertura – Factor C
Fuente. Elaboración propia con información de CVC

5.3. Factor K: erosionabilidad del suelo

El factor erosionabilidad del suelo K representa el grado de erosión del suelo o pérdida de suelo por unidad de índice de erosión pluvial, cuando todos los demás factores toman valor de 1 e indica la susceptibilidad del suelo a la erosión.

El factor K se tomó de información disponible de CVC contenida en la cartografía de suelos, en la cual se cuenta con la caracterización textural de suelos y la estimación del factor de erosión mayor en los suelos de la parte alta y un valor bajo en la zona en donde comienza el piedemonte de la zona del valle geográfico como se observa en la Figura 9.

Para el cálculo del factor K del suelo la CVC ha empleado la ecuación de regresión, en función de las variables representativas de sus propiedades físicas. La regresión establecida viene expresada por la ecuación siguiente:

$$100K = 10^{-4} * 2.71 * M^{1.14} * (12 - a) + 4.20(b - 2) + 3.23(c - 3) \text{ (Ecuación 8)}$$

Donde:

- M:** (100 - %arcilla) (%limo + arena fina)
- a:** % materia orgánica
- b:** Número correspondiente a la estructura del suelo según:
- 1: Gránulo muy fino y grumo muy fino (< 1 mm)
 - 2: Gránulo fino y grumo fino (1 - 2 mm)
 - 3: Gránulo y grumo medio (2 -5 mm) y gránulo grueso (5 - 10 mm)
 - 4: Gránulo liso, prismático, columnar y muy grueso (> 10 mm)
- c:** Clase de permeabilidad del perfil, según la siguiente codificación del USDA Soil Survey Manual:
- 1: Rápida a muy rápida
 - 2: Medianamente rápida
 - 3: Moderada
 - 4: Moderadamente lenta
 - 5: Lenta
 - 6: Muy lenta

Los valores de textura, materia orgánica y estructura se refieren a los 15 - 20 cm. superiores del suelo, y los de permeabilidad a todo su perfil.

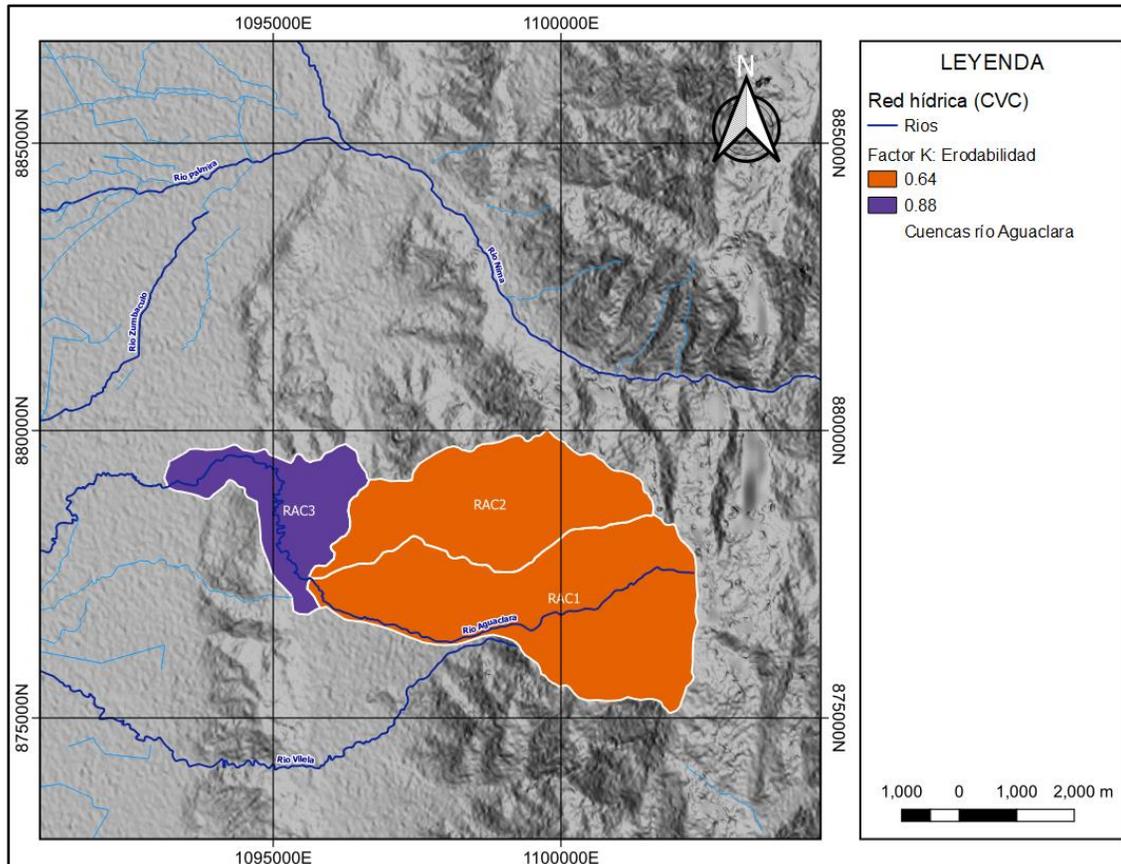


Figura 9. Factor K para el río Aguaclara
Fuente. Elaboración propia

Finalmente, la información es ingresada de forma agregada para cada una de las cuencas esquematizadas en el modelo HEC-HMS, teniendo como factores de entrada el valor más representativo en las unidades, con base en la mayoría de píxeles presentes en cada área. Al correr el modelo se genera el sedimentograma en la salida de las cuencas de análisis producto de la erosión laminar o carga de sedimentos por erosión de la lluvia disponible, después de estimarla a partir de la ecuación USLE. Los resultados de la implementación del modelo se presentan en el respectivo anexo correspondiente a la modelación HEC-HMS para el cálculo de la erosión laminar.

6. ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES A ESCALA 1:2.000

6.1. Reología y mecánica de lodos

6.1.1. Características generales de las avenidas torrenciales

Los flujos detríticos, que hacen parte de los flujos hiperconcentrados, se caracterizan por una granulometría extendida, es decir se componen de diversos tamaños de material sólido. En las avenidas torrenciales, el material más grueso se encuentra al frente, mientras que el resto de agua y la mezcla agua y sedimentos finos, se distribuyen en el cuerpo y cola de la avenida.

Luego, existen tres zonas, donde inicia, se transporta y finaliza; y corresponden a las siguientes:

- Zona de iniciación (embudo).
- Zona de transición o tránsito del flujo.
- Zona de depósito.

En la Figura 10 y Figura 11 se presenta el perfil de un frente de detritos. Los flujos de detritos presentan altas concentraciones de energía, ocasionando erosión del lecho del cauce, lo que incorpora aún más material al flujo propio. En ese orden de ideas, el flujo hiperconcentrado tiende a retroalimentarse y depositarse dinámicamente a largo de la creciente y su tránsito. En la Figura 12 se presenta la morfología de la huella de los flujos detríticos.

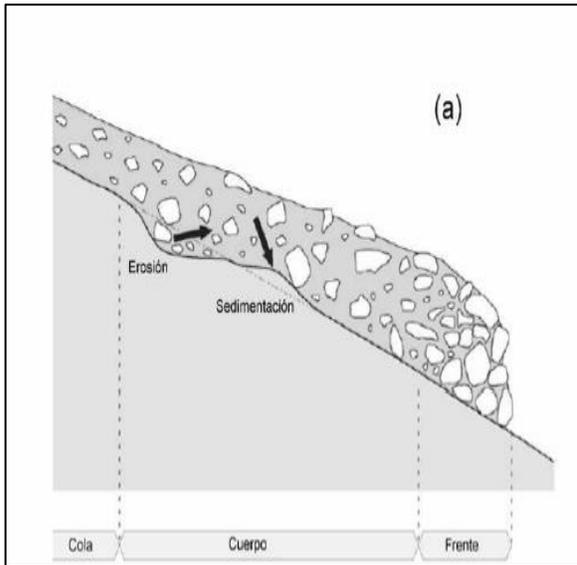


Figura 10. Esquema perfil de un frente de detritos

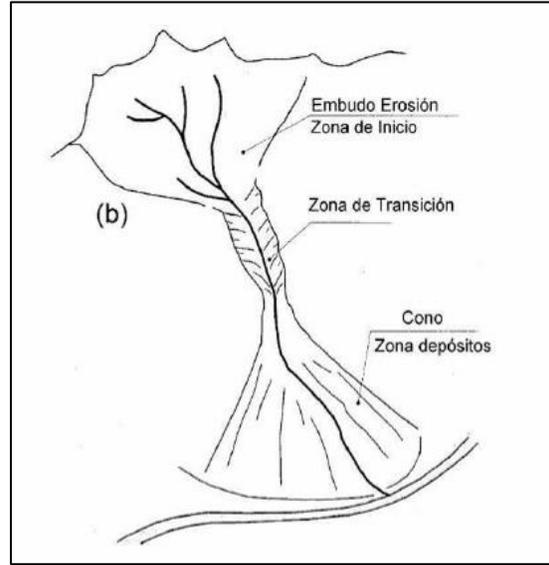


Figura 11. Morfología de la huella de los flujos detriticos

Fuente: Schatzman, 2005; Véosla, 2005

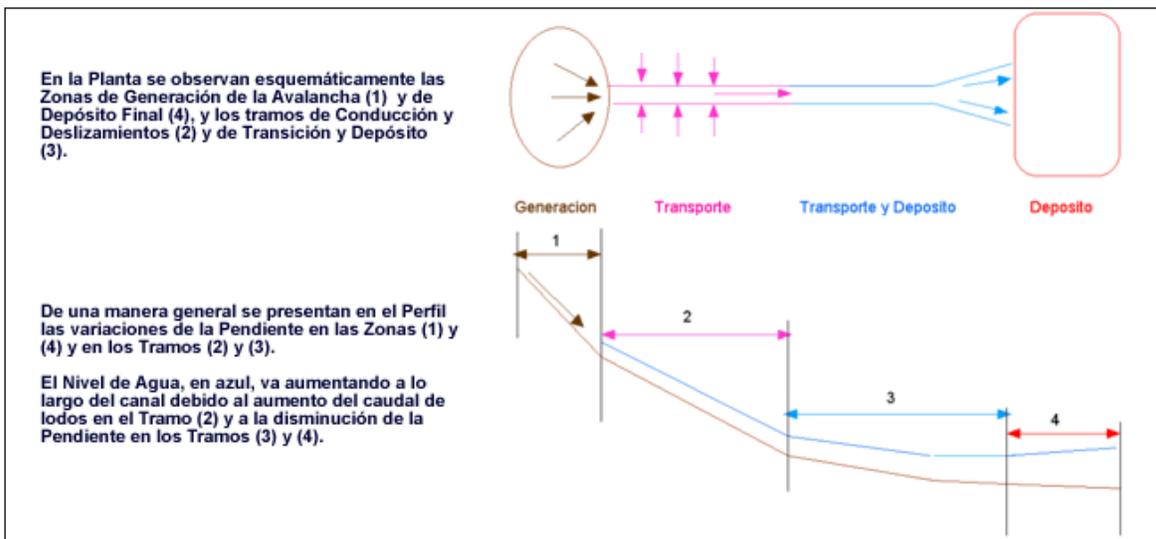


Figura 12. Perfil de un frente de detritos con las respectivas fases

Fuente: (Veósla, 2005)

Los flujos de detritos se caracterizan, además, por poseer una alta concentración de energía que causa erosión del lecho, lo que incorpora incluso más material al propio flujo. Esto quiere decir que es un flujo que se retroalimenta, así que se conoce como dinámicamente creciente.

6.1.2. Comportamiento de la relación esfuerzo cortante – deformación

En los flujos hiperconcentrados, no es posible desde el punto de vista matemático, realizar la separación de la fase sólida y la fase líquida, dado que el material sólido altera las propiedades reológicas de la fase líquida y por ende la totalidad de la mezcla.

Existen diversas propuestas, desarrolladas por investigadores, para describir el comportamiento de este tipo de flujos, a través de modelos reológicos con el objetivo de estimar los esfuerzos que se presentan para finalmente determinar las variaciones de profundidades de flujo y velocidad, temporal y espacialmente. Entre los modelos reológicos, se destacan entre los más conocidos el modelo de Voellmy, modelo cuadrático, Herschel Bulkley y Birgham. En la Figura 13 se presenta la gráfica, para ilustrar a través de la gráfica de esfuerzo cortante (τ) y deformación (du/dy) para diferentes modelos para fluidos.

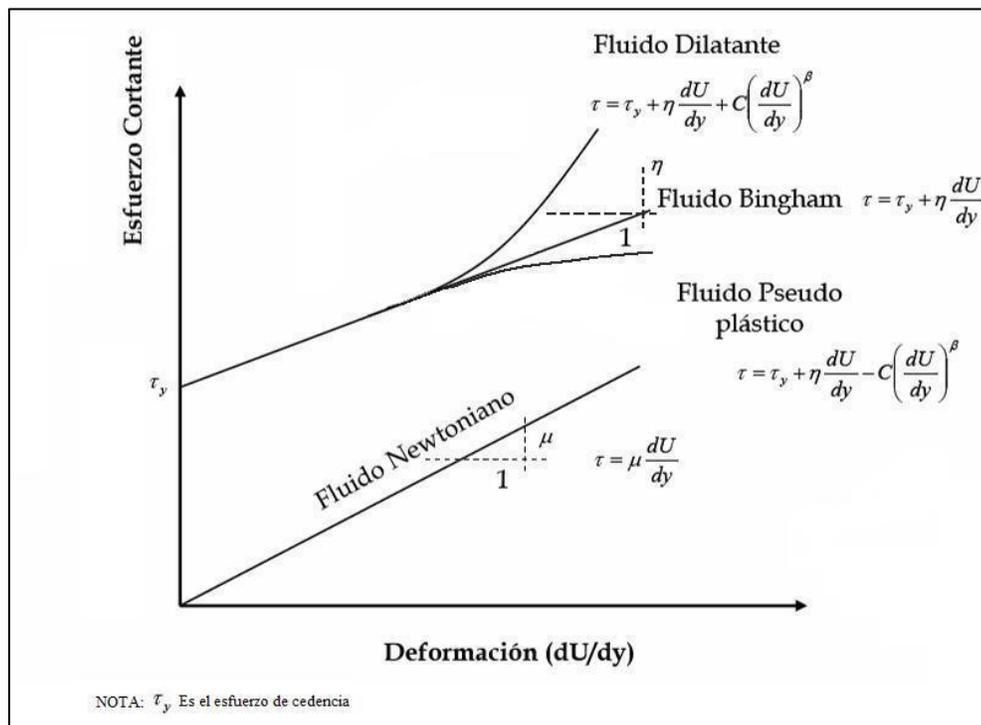


Figura 13. Relación esfuerzo – deformación para distintas clases de fluidos
Fuente: CVC-Universidad del Valle, 2010

El comportamiento no-newtoniano de la matriz del fluido está controlado en parte por la cohesión entre las partículas de sedimento fino. Esta cohesión causa que haya un esfuerzo de cedencia, τ_y , que debe ser excedido por un esfuerzo aplicado para iniciar el movimiento. Combinando el esfuerzo de cedencia y los componentes del esfuerzo viscoso, se tiene el modelo plástico de Bingham:

$$\tau = \tau_y + \eta \left(\frac{dU}{dy} \right) \text{ (Ecuación 9)}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \eta &= \text{Viscosidad dinámica} \\ \tau_y &= \text{Esfuerzo de cedencia} \\ \left(\frac{dU}{dy} \right) &= \text{Tasa de deformación} \end{aligned}$$

El modelo Bingham ha sido uno de los más utilizados a nivel mundial para la descripción del comportamiento de un flujo hiperconcentrado. Pese a ello, el modelo reológico cuadrático propuesto por O'Brien y Julien (1988) es más apropiado para describir el comportamiento de los regímenes de flujo de viscoso a turbulento-dispersivo.

6.1.3. Modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988)

O'Brien y Julien (1988) mostraron en investigaciones reológicas que las matrices de lodo se comportan como flujos Bingham para altas concentraciones de sedimentos finos y tasas de deformación bajas. Encontraron además que, para concentraciones bajas de sedimentos, los esfuerzos dominantes son los turbulentos (como suele ocurrir en abanicos aluviales de alta pendiente). Igualmente, notaron que al presentarse concentraciones altas de material grueso en combinación con concentraciones bajas de material fino se generan esfuerzos dispersivos (el modelo reológico de Bingham no incluye los esfuerzos turbulentos ni los esfuerzos dispersivos).

Un modelo reológico que incorpora sólo los esfuerzos de cedencia y viscosos e ignora los esfuerzos inerciales asume que el flujo de lodo es viscoso, como ya se mencionó anteriormente. Esta suposición no siempre es aplicable ya que algunos flujos hiperconcentrados son turbulentos. Dependiendo de las propiedades de la matriz del fluido, los esfuerzos viscosos y de cedencia para concentraciones mayores al 40% pueden ser relativamente pequeños en comparación con los esfuerzos turbulentos a altas velocidades.

Por lo tanto, el esfuerzo cortante total, τ , en flujos hiperconcentrados (incluyendo flujos detríticos, de lodos e inundaciones de lodos), según el modelo reológico cuadrático, se puede obtener sumando las cinco componentes de los esfuerzos cortantes:

$$\tau = \tau_y + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d \text{ (Ecuación 10)}$$

Donde:

$$\begin{aligned} \tau_c &= \text{Esfuerzo cortante cohesivo} \\ \tau_{mc} &= \text{Esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb} \end{aligned}$$

- τ_v = Esfuerzo cortante viscoso
 τ_t = Esfuerzo cortante turbulento
 τ_d = Esfuerzo cortante dispersivo

El esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb (τ_{mc}) depende de la presión intergranular (p_s), y el ángulo de reposo del material (φ), y se calcula como se muestra a continuación.

$$\tau_{mc} = p_s \tan \varphi \text{ (Ecuación 11)}$$

La ecuación anterior del modelo reológico cuadrático, puede ser expresada en términos de la tasa de deformación así:

$$\tau = \tau_y + \mu \left(\frac{dU}{dy} \right) + C \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \text{ (Ecuación 12)}$$

Donde:

$$\tau_c + \tau_{mc} = \tau_y \text{ (Ecuación 13)}$$

$$\tau_v = \mu \left(\frac{dU}{dy} \right) \text{ (Ecuación 14)}$$

$$\tau_t + \tau_d = C \left(\frac{dU}{dy} \right)^2 \text{ (Ecuación 15)}$$

La suma del esfuerzo cortante cohesivo, τ_c , y el esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb, τ_{mc} , se conoce como el esfuerzo de cedencia, τ_y ; $\eta \left(\frac{dU}{dy} \right)$ el segundo término del lado derecho de la ecuación, en función de la tasa de deformación, representa el esfuerzo cortante viscoso, τ_v . La suma del esfuerzo de cedencia y el esfuerzo cortante viscoso constituyen el esfuerzo cortante de un fluido cohesivo, hiperconcentrado en un régimen de flujo viscoso (modelo reológico de Bingham). El último término de la ecuación representa la suma del esfuerzo cortante turbulento y el esfuerzo cortante dispersivo. La sumatoria de los tres términos de la ecuación es lo que se conoce como el modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988).

El esfuerzo cortante depende de parámetros como la viscosidad absoluta o dinámica, μ , y el coeficiente inercial de esfuerzo cortante C , el cual se define de la siguiente forma:

$$C = \rho_m l^2 + f(\rho_m, C_v) d_s^2 \text{ (Ecuación 16)}$$

donde C depende a su vez de la densidad de la mezcla, ρ_m , la longitud de la mezcla de Prandtl, l , el tamaño del sedimento, d_s , y una función de la concentración volumétrica, C_v , definida de la siguiente manera:

$$f(\rho_m, C_v) = a_i \rho_m \left[\left(\frac{C_*}{C_v} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (\text{Ecuación 17})$$

Donde:

- C_v = Concentración volumétrica
 a_i = Coeficiente empírico igual a 0,01
 C_* = Concentración volumétrica máxima estática de las partículas

La ecuación, de la función anterior, también puede ser expresada como sigue:

$$f(\rho_s, C_v) = \frac{\pi}{12} \left(\frac{6}{\pi} \right)^{\frac{1}{3}} \text{sen}^2 \alpha_i \rho_s (1 - e_n^2) C_v^{\frac{1}{3}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Donde:

- e_n = Coeficiente de restitución de energía (varía entre 0,70 y 0,85 para arenas)
 α_i = Ángulo promedio del impacto de partícula
 ρ_s = Densidad de las partículas de sedimento

Para definir los términos de la ecuación que resuelve el modelo matemático FLO-2D para calcular las pérdidas de energía en un flujo hiperconcentrado, la ecuación del modelo reológico cuadrático, puede ser reescrita en términos de la pendiente de fricción o pendiente de la línea de energía, S_f , tomando la siguiente forma:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td} \quad (\text{Ecuación 19})$$

Donde:

Pendiente de cedencia: $S_y = \frac{\tau_y}{\gamma_m H} \quad (\text{Ecuación 20})$

Pendiente viscosa: $S_v = \frac{K \mu V}{8 \gamma_m H^2} \quad (\text{Ecuación 21})$

Pendiente turbulenta dispersa: $S_{td} = \frac{n^2 V^2}{H^3} \quad (\text{Ecuación 22})$

Donde:

V	= Velocidad promedio en la dirección vertical
K	= Parámetro de resistencia, varían en función de la rugosidad
N	= Rugosidad de Manning
h	= Profundidad de flujo
γ_m	= Densidad de la mezcla
τ_y	= Esfuerzo de cedencia
μ	= Viscosidad dinámica

El término S_y es la pendiente de cedencia, S_v es la pendiente viscosa y S_{td} es la pendiente turbulenta-dispersiva. De acuerdo a esto, la ecuación anterior es igual a la siguiente expresión:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m H} + \frac{K\mu V}{8\gamma_m H^2} + \frac{n^2 V^2}{H^3} \text{ (Ecuación 23)}$$

Esta última ecuación, es la que el modelo FLO-2D resuelve para calcular las pérdidas de energía en la simulación de flujos hiperconcentrados.

6.1.4. Metodología del modelo Flo-2D

6.2. Generalidades

Los modelos matemáticos bidimensionales son los más usados para simular y estudiar los diferentes procesos hidrodinámicos, de oleaje, sedimentológicos, reológicos y de calidad del agua (transporte y dispersión de contaminantes) en zonas costeras, lagos, puertos, estuarios, embalses, ríos y planicies aluviales, canales, etc. Existe una gran variedad de este tipo de modelos, los cuales deben ser utilizados especialmente cuando parte de la llanura de inundación de la zona de estudio posee una topografía relativamente plana.

El modelo bidimensional de diferencias finitas FLO-2D (O'Brien, 1988) empleado en este estudio permite simular fluidos newtonianos y no-newtonianos (flujos hiperconcentrados con altas concentraciones de sedimentos) como avenidas torrenciales o flujos de lodos. El modelo es apto para trabajar en topografías complejas, tales como planicies de inundación, conos de deyección y áreas urbanizadas; adicionalmente permite el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación.

El modelo FLO-2D combina un modelo hidrológico con un modelo hidráulico, por lo cual permite simular el proceso lluvia – escorrentía, incluyendo los procesos de evaporación e infiltración y simular los procesos hidrodinámicos en los diferentes cauces y canales definidos en el modelo. El transporte de flujo en canales, cuyas secciones pueden ser rectangulares, trapezoidales o naturales, es simulado unidimensionalmente, así como el flujo a través de calles. Por otra parte, el flujo no confinado en las planicies de inundación

es modelado de forma bidimensional en ocho direcciones. Con el modelo matemático FLO-2D es posible además modelar el transporte de sedimentos, brindando al usuario la posibilidad de escoger entre nueve diferentes ecuaciones de transporte formuladas por distintos autores. Finalmente se pueden simular diversas estructuras, como diques, vertederos y puentes, además de construcciones, las cuales son esquematizadas como obstrucciones al paso del flujo.

Otra de las funciones del programa FLO-2D es delimitar las zonas de amenaza y establecer para ellas distintas categorías (alta, media y baja) de acuerdo con la recurrencia de los eventos de caudales extremos o de lluvias en la zona de estudio. Para ello el usuario puede definir la metodología para determinar los mapas de amenaza, ingresando al modelo los rangos de profundidad de flujo y el producto de la velocidad por la profundidad del flujo para cada una de las categorías.

6.2.1. Ecuaciones hidrodinámicas

El modelo matemático Flo-2D se basa en la conservación de volumen, es decir que el volumen de entrada debe ser igual al volumen de salida y almacenamiento del sistema (incluyendo pérdidas por infiltración y abstracción). El modelo transporta un volumen fluido para simular inundaciones, avenidas torrenciales y canales a través de una malla bidimensional estructurada y uniforme, lo cual compone la malla computacional. Se define esta malla, a partir del área de estudio y un tamaño de celda asignado, según las condiciones específica del proyecto.

La progresión de la onda de la creciente de flujo, sobre la zona a modelar, está controlada por los parámetros de resistencia al flujo (rugosidad) y la topografía de dominio. La modelación bidimensional se desarrolla a través de la integración numérica de las ecuaciones de movimiento y continuidad o conservación de volumen para flujos de baja concentración e hiperconcentrados. Las ecuaciones generales para la solución bidimensional, son las siguientes:

Ecuación de Continuidad:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial HV_x}{\partial x} + \frac{\partial HV_y}{\partial y} = i \text{ (Ecuación 24)}$$

Ecuación de cantidad de movimiento en dirección x:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial H}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{V_y}{g} \frac{\partial V_x}{\partial y} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \text{ (Ecuación 25)}$$

Ecuación de cantidad de movimiento en dirección y:

$$S_{fy} = S_{oy} - \frac{\partial H}{\partial y} - \frac{V_y \partial V_y}{g \partial y} - \frac{V_x \partial V_y}{g \partial x} - \frac{1 \partial V_y}{g \partial t} \text{ (Ecuación 26)}$$

Donde:

- V_x : Componente en la dirección x de la velocidad promedio en la horizontal
 V_y : Componente en la dirección y de la velocidad promedio en la vertical
 S_{fx} : Componente en la dirección x de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción
 S_{fy} : Componente en la dirección y de la pendiente de la línea de energía o pendiente de fricción
 S_{ox} : Componente en la dirección x de la pendiente del lecho
 S_{oy} : Componente en la dirección y de la pendiente del lecho
 H : Profundidad del flujo
 g : Aceleración de la gravedad
 i : Intensidad de lluvia de exceso, en términos de agua por unidad de tiempo
 t : Tiempo
 $\frac{\partial H}{\partial x}$: Gradiente de presiones en la dirección x
 $\frac{\partial H}{\partial y}$: Gradiente de presiones en la dirección y
 $\frac{V_x \partial V_x}{g \partial x} + \frac{V_y \partial V_x}{g \partial y}$: Aceleración convectiva en la dirección x
 $\frac{V_y \partial V_y}{g \partial y} + \frac{V_x \partial V_y}{g \partial x}$: Aceleración convectiva en la dirección y
 $\frac{1 \partial V_x}{g \partial t}$: Aceleración local en la dirección x
 $\frac{1 \partial V_y}{g \partial t}$: Aceleración local en la dirección y

La ecuación de momentum o de cantidad de movimiento está expresada en términos de las componentes en x e y de la pendiente de fricción (S_{fy} y S_{fx} , respectivamente), la cual está basada en la ecuación de Manning; además, contiene los términos de aceleración local y convectiva, conformando así la ecuación completa de la onda dinámica.

Para las planicies de inundación las ecuaciones de cantidad de movimiento en el modelo Flo-2D son aplicadas calculando la velocidad promedio del flujo a través de la frontera de un elemento o celda de la malla computacional en una dirección a la vez. Hay ocho direcciones potenciales de flujo: las cuatro direcciones principales (norte, sur, este y oeste) y las cuatro direcciones diagonales (noreste, noroeste, sureste y suroeste).

La estabilidad numérica del modelo se garantiza a través del esquema explícito de Courant-Friedrich-Lewy (CFL o número de Courant). El cual relaciona el movimiento de la onda, y la

discretización del modelo en espacio y tiempo. Matemáticamente deberá cumplirse entonces la siguiente ecuación, para un valor de $C \leq 1$.

$$V + c = C \frac{\Delta x}{\Delta t} \text{ (Ecuación 27)}$$

Donde:

- C Número de Courant
- Δx Tamaño de celda del modelo
- V Velocidad promedio
- c Celeridad de la onda = $(gd)^{0.5}$

6.2.2. Ecuaciones de flujos hiperconcentrados en modelo Flo-2D

El comportamiento de los flujos hiperconcentrados implica una interacción compleja entre el fluido y los sedimentos, involucrando distintas clases de esfuerzos a causa del intercambio de momentum por la colisión entre las partículas de sedimentos y el agua. Para describir este comportamiento existen varios modelos reológicos como el modelo de Bingham, entre otros. El modelo matemático FLO-2D emplea el modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988), el cual, además del esfuerzo de cedencia y los esfuerzos cortantes viscosos, considera los esfuerzos cortantes turbulentos y dispersivos en el flujo.

Los flujos hiperconcentrados se caracterizan por ser homogéneos (una sola fase); por ello, el modelo matemático FLO-2D considera los flujos hiperconcentrados monofásicos, de concentración volumétrica variable. Asimismo, internamente no se hace distinción de los tamaños de los sedimentos. Como se explicó en el apartado 4.3.1.3 Modelo reológico cuadrático (O'Brien y Julien, 1988), el modelo FLO-2D resuelve la ecuación presenta a continuación, para simular las pérdidas por fricción en un flujo hiperconcentrado (avenida torrencial), calculando la velocidad a través de cada frontera entre los elementos de la malla, usando la profundidad promedio entre dos elementos adyacentes en las ocho direcciones posibles del flujo:

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m H} + \frac{K\mu V}{8\gamma_m H^2} + \frac{n^2 V^2}{H^3} \text{ (Ecuación 28)}$$

Donde:

- K: Parámetro de resistencia para flujo laminar
- γ_m : Peso específico de la mezcla de agua y sedimento
- n: Coeficiente de rugosidad de Manning

- μ : Viscosidad absoluta o dinámica
 τ_y : Esfuerzo de cedencia
 H : Profundidad del flujo
 V : Velocidad promedio en la vertical

Como dato de entrada al modelo FLO-2D para efectuar la simulación de flujos hiperconcentrados se requiere el valor del parámetro de resistencia para flujo laminar, K , el cual varía entre 24 y 50000. Este parámetro adquiere mayor importancia para flujos laminares o de transición, en los cuales, como es de esperarse, los esfuerzos turbulentos no tienen mayor incidencia en el comportamiento del fluido. En la Tabla 2 se presentan los valores recomendados del parámetro K para diferentes tipos de superficies. Cuando se ha ingresado una capa de rugosidad al modelo, este calcula automáticamente el valor de K como en función de la rugosidad n de Manning. El parámetro de resistencia para flujo laminar pues hace parte de las variables que permiten el funcionamiento del programa de manera correcta. Es cierto que para avenidas torrenciales predomina un comportamiento de flujo turbulento, sin embargo, la conceptualización de las ecuaciones abarca todos los procesos de cálculo del modelo, en ese sentido, esto es un parámetro que el programa emplea en caso de presentarse flujo laminar en alguna celda de la malla computacional.

Tabla 2. Parámetro de resistencia K para flujo laminar y diferentes superficies

Superficie	Rango del valor de k
Concreto o asfalto	24 – 108
Arenas	30 – 120
Superficie gradada	90 – 400
Suelo arcilloso	100 – 500
Vegetación escasa	1000 – 4000
Pastos cortos de pradera	3000 – 10000

Fuente: manual del modelo matemático FLO-2D

El peso específico de la mezcla de agua y sedimento, γ_m , es una función de la concentración volumétrica, C_v , y se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma_m = \gamma + C_v(\gamma_s - \gamma) \text{ (Ecuación 29)}$$

Donde γ_s es el peso específico de los sedimentos y γ el peso específico del agua en condiciones normales (1 ton/m³). Ambos parámetros están relacionados mediante la gravedad específica de los sedimentos, G , o densidad relativa de la siguiente forma:

$$G = \frac{\gamma_s}{\gamma} \text{ (Ecuación 30)}$$

Despejando el peso específico de los sedimentos, γ_s , se tiene:

$$\gamma_s = G\gamma \text{ (Ecuación 31)}$$

A partir de las ecuaciones anteriores, se obtiene la siguiente expresión para estimar el peso específico de la mezcla, γ_m , en función de la gravedad específica de los sedimentos, G , la concentración volumétrica, C_v , y el peso específico del agua, γ (en condiciones normales):

$$\gamma_m = \gamma[1 + C_v(G - 1)] \text{ (Ecuación 32)}$$

El peso específico de la mezcla, γ_m , es un parámetro que se incrementa con la concentración de sedimentos y es calculado por el modelo. Para el cálculo de dicho parámetro se debe ingresar al modelo el valor adimensional de la gravedad específica de los sedimentos, G , cuyo rango de valores está entre 2.50 y 2.80, con un valor típico de 2.65.

Asimismo, los valores del coeficiente de rugosidad de Manning se estiman tanto para los lechos de los cauces como para las llanuras de inundación de la zona de estudio y son ingresados al modelo.

Otros datos de entrada al modelo, requeridos para la simulación de flujos hiperconcentrados, son las propiedades reológicas de los sedimentos finos que transportan los cauces en las avenidas torrenciales. Estas propiedades reológicas están relacionadas con el esfuerzo de cedencia, τ_y , y la viscosidad absoluta o dinámica, μ , los cuales varían principalmente con la concentración de sedimentos y son calculadas por el modelo a partir de los valores de las propiedades reológicas definidas por el usuario. Las siguientes relaciones empíricas pueden ser usadas, a menos que haya disponible un análisis reológico del material (O'Brien y Julien, 1988):

$$\mu = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v} \text{ (Ecuación 33)}$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v} \text{ (Ecuación 34)}$$

Donde C_v es la concentración volumétrica de sedimentos y las variables α_1 , β_1 , α_2 y β_2 son coeficientes determinados experimentalmente (O'Brien y Julien, 1988).

Una variedad de muestras de flujos de lodos se obtuvo de los depósitos naturales provenientes de las montañas rocosas de Colorado (EE.UU.) cerca de las ciudades de Aspen y Glenwood Springs. Las propiedades de las muestras de flujo de lodos en términos de la distribución del tamaño de los sedimentos (granulometría) y el porcentaje de contenido de arcilla se presentan en la Tabla 3 (O'Brien y Julien, 1988).

Tabla 3. Diámetros característicos y contenido de arcillas de las matrices de flujos de lodos

Muestras	Porcentaje de arcilla (%)	D ₁₆ (MM)	D ₅₀ (MM)	D ₈₄ (MM)	LL	IP
Glenwood original	4,8	0,01	0,034	0,062	-	-
Glenwood 1	6,8	0,009	0,023	0,05	-	-
Glenwood 2	3	0,016	0,035	0,061	-	-
Glenwood 3	4,8	0,011	0,025	0,053	-	-
Glenwood 4	7,6	0,001	0,018	0,032	-	-
Aspen apique 1	31,3	0,001	0,011	0,032	0,32	0,11
Aspen suelo natural	27	0,001	0,012	0,028	0,25	0,06
Aspen relleno de mina	27,8	0,001	0,013	0,03	0,24	0,06
Aspen fuente de suelo natural	31,6	0,001	0,016	0,039	-	-
Aspen fuente de relleno de mina	25,2	0,001	0,018	0,061	-	-

Fuente: O'Brien y Julien, 1988

Los valores de los cuatro coeficientes empíricos α_1 , β_1 , α_2 , y β_2 obtenidos en el análisis de regresión para cada muestra se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4. Coeficientes para la determinación de esfuerzos cortantes y viscosidad de las matrices de flujos de lodos

Muestras	α_2 (Dinas/cm ²)	β_2	α_1 (Poises)	β_1
Glenwood 1	$3,45 \times 10^{-2}$	20,1	$2,83 \times 10^{-3}$	23
Glenwood 2	$7,65 \times 10^{-2}$	16,9	$6,48 \times 10^{-1}$	6,2
Glenwood 3	$7,07 \times 10^{-4}$	29,8	$6,32 \times 10^{-3}$	19,9
Glenwood 4	$1,72 \times 10^{-3}$	29,5	$6,02 \times 10^{-4}$	33,1
Aspen apique 1	$1,81 \times 10^{-1}$	25,7	$3,60 \times 10^{-2}$	22,1
Aspen suelo natural	$1,52 \times 10^{-1}$	18,7	$1,36 \times 10^{-3}$	28,4
Aspen relleno de mina	$4,73 \times 10^{-2}$	21,1	$1,28 \times 10^{-1}$	12
Aspen fuente de suelo natural	$3,83 \times 10^{-2}$	19,6	$4,95 \times 10^{-4}$	27,1
Aspen fuente de relleno de mina	$2,91 \times 10^{-1}$	14,3	$2,01 \times 10^{-4}$	33,1

Fuente: O'Brien y Julien, 1988

Para establecer los valores más apropiados de los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 y β_2 se deben realizar análisis de laboratorio de muestras de sedimentos de la zona de estudio, tales como hidrometrías para determinar el contenido de limos y arcillas (i.e., porcentaje de materiales finos), así como ensayos de granulometría (d_{16} , d_{50} , y d_{84}). Posteriormente, y con base en la información consignada en la Tabla 3 y Tabla 4, se establecen los valores de los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 y β_2 ; estos coeficientes son ingresados posteriormente al modelo matemático.

Finalmente, se ingresa el hidrograma líquido calculado por procedimientos hidrológicos normales y por su parte, se ingresa la concentración volumétrica del componente sólido al modelo.

6.2.3. Hipótesis y limitaciones

Las principales hipótesis y limitaciones del modelo FLO-2D involucran la resolución temporal y espacial de la malla computacional y son las siguientes:

- ✓ Cada elemento o celda de la malla está representado por un único valor de elevación, rugosidad y profundidad de flujo;
- ✓ Durante un intervalo de tiempo, Δt , el flujo se considera uniforme;
- ✓ La distribución de presiones en la profundidad es hidrostática;
- ✓ La rugosidad hidráulica se basa en la resistencia al flujo estacionario, uniforme, turbulento;
- ✓ Un elemento de canal está representado por una sola geometría de canal (sólo una sección transversal) y un valor de rugosidad, y se encuentra ubicado en una sola celda de la malla computacional. Esto en caso de modelar elementos tipo canal, lo cual no es necesario para todas las modelaciones.

6.2.4. Metodología de aplicación del modelo Flo-2D para AVT

Para la aplicación del modelo numérico Flo-2D se requiere en primer lugar un modelo de elevación digital (MDE o DEM por sus siglas en inglés) del terreno, la resolución debe ser tal que permita proveer los resultados precisos para la escala de estudio. Adicionalmente, se requiere una capa vectorial, que contenga las rugosidades n de Manning, a través de un archivo SIG que representa la distribución espacial de las mismas.

El siguiente paso, es la construcción de la geometría, donde en principio debe de definirse zona de cómputo o área computacional, lo que corresponde a indicarle al modelo qué área es la que deberá modelar. El área computacional, debe de ser lo suficientemente grande para abarcar todas las posibles zonas que puedan ser afectadas por el evento de inundación o avenida torrencial simulado, pero a su vez lo suficientemente pequeño para permitir que con un tamaño de celda aceptable (según escala del escenario de modelación) se pueda obtener una cantidad total de celdas inferior a 30.000 con el fin de minimizar los tiempos de cálculo (según recomendación del Manual del programa). Con el área computacional es posible determinar a partir de un tamaño de celda definido por el usuario una malla estructurada, para la cual posteriormente se realiza el muestreo de los valores de elevación y rugosidad n de Manning.

Una vez definida la malla computacional, como mínimo debe de definirse los procesos de ingreso de agua bien área por área o por celdas, y en el caso de modelos reológicos debe ingresarse el coeficiente de concentración volumétrico (C_v), con la respectiva distribución temporal. Otros elementos podrán ser incorporados en el modelo, acorde a las necesidades específicas. Para correr el modelo, debe de definirse las propiedades reológicas del componente sólido, a través del programa *Grid Developer System Pro* (GDS Pro).

6.3. Elaboración y resultados del modelo Flo-2D

6.3.1. Geometría del modelo

A partir del modelo de elevación digital con resolución de 0,20 x 0,20 m de resolución para el área de estudio en el Centro Poblado de Aguaclara, a lo largo del río Aguaclara, realiza la delimitación del área computacional para el modelo y se construye la respectiva grilla del modelo. Para ello, se empleó el complemento de Flo-2D para QGIS para el preprocesamiento de la geometría de entrada del modelo. En la Figura 14 presenta el dominio computacional, con el respectivo modelo de elevación digital y la localización de los drenajes correspondientes. El objetivo de la modelación para escala 1:2.000 es estudiar la amenaza de las avenidas torrenciales en este centro poblado para posteriormente delimitar las zonas en condición de amenaza por avenidas torrenciales.

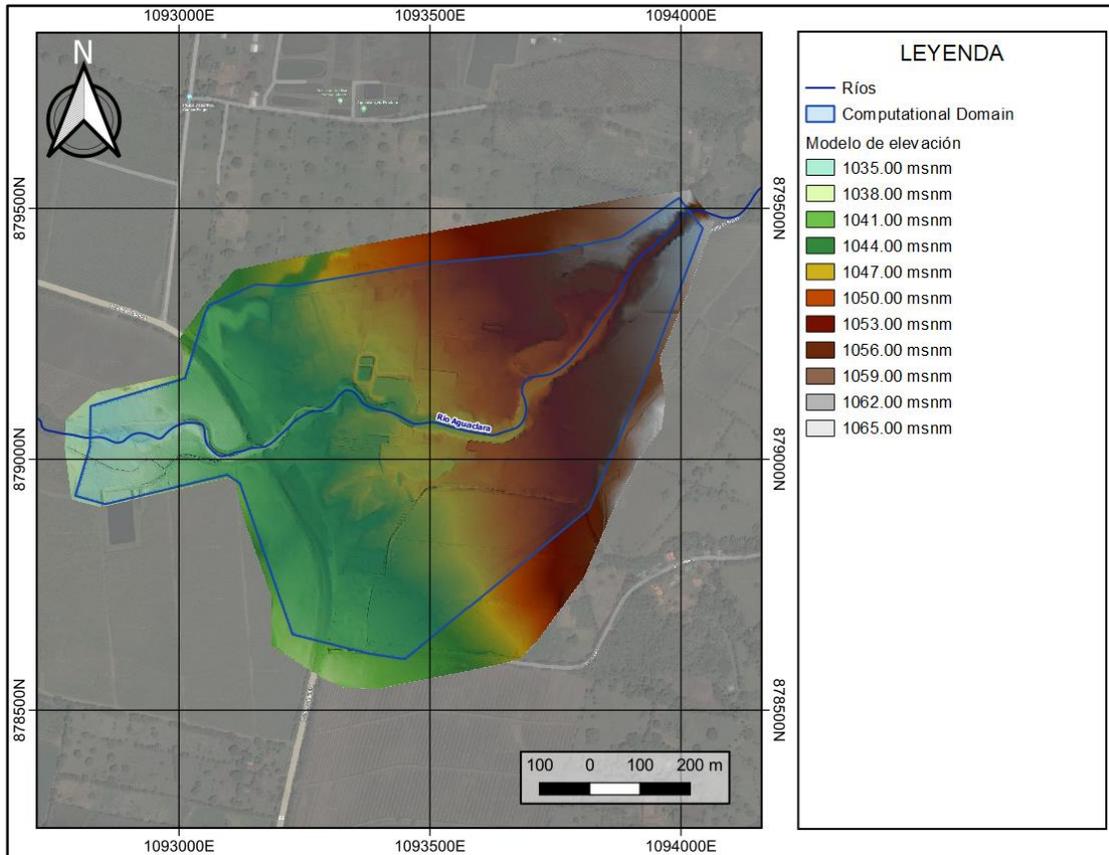


Figura 14. Dominio computacional y dominio del modelo Flo-2D para avenidas torrenciales
Fuente. Elaboración propia

Dentro del dominio computacional genera una malla estructurada a través del plugin de Flo-2D, considerando una resolución de 3,0 m x 3,0 m por celda, con lo que se obtiene un total de 67.253 celdas. Aunque si bien, el manual del software Flo-2D, sugiere emplear cantidades de celdas inferiores a 30.000, esto está dispuesto específicamente evitar tiempos computacionales excesivamente altos, sin embargo, en aras de proveer un resultado óptimo y preciso, se decide emplear un tamaño de celda que resulta en un total de celdas superior a este valor propuesto por el manual, dedicando un mayor tiempo computacional.

6.3.2. Condiciones de frontera

Al modelo se ingresan las condiciones de frontera de entrada y salida, la condición de frontera de salida es única y corresponde a la línea aguas abajo del río Aguaclara en el Centro Poblado de Aguaclara. Respecto a los ingresos de flujo al modelo, se consideran 1 entrada al modelo; las condiciones de frontera mencionadas se presentan en la Figura 15.

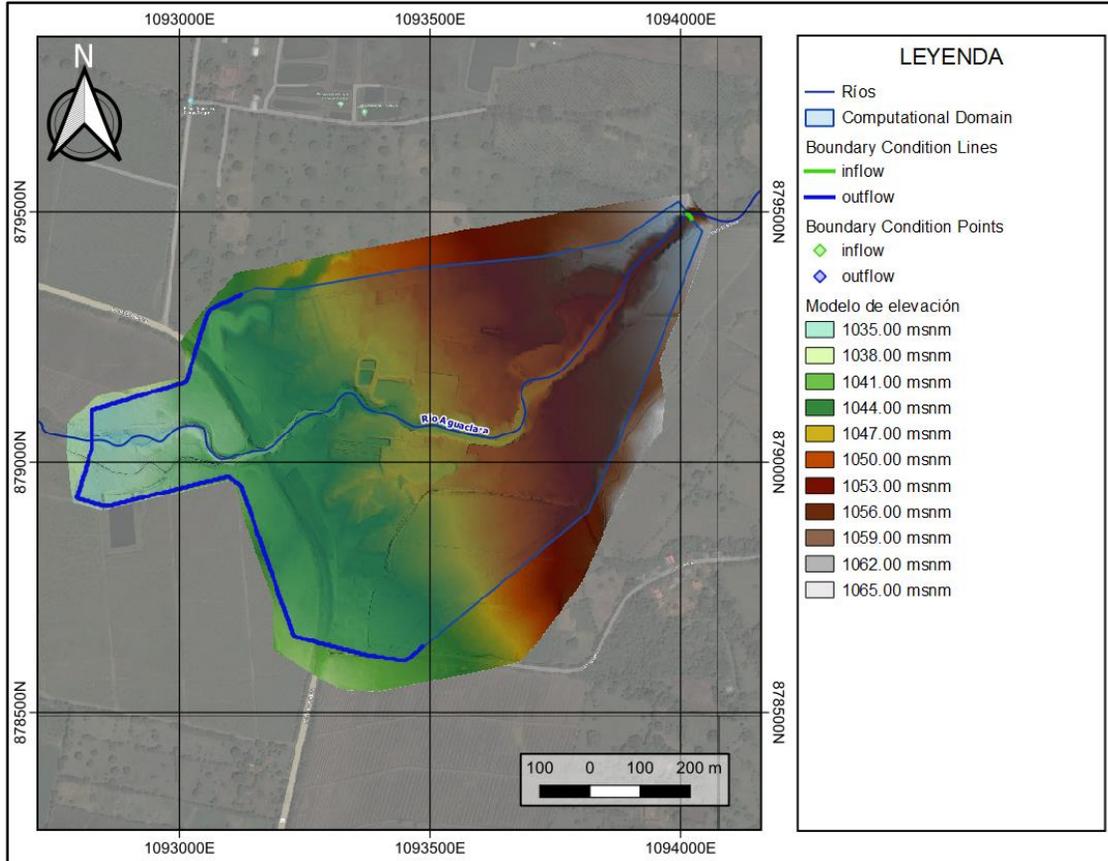


Figura 15. Mapa de condiciones de frontera para modelo Flo-2D
Fuente. Elaboración propia

El ingreso de los caudales de entrada al modelo, para cada uno de los puntos, parte de los resultados del estudio hidrológico, para el cual se tiene información específica de los puntos presentados. Los hidrogramas de crecientes empleados para la construcción del modelo, son los se reportan en el estudio de hidrología. Cada una de las series temporales de datos considera un dato cada 10 min o cada 0,1667 horas. A continuación, se presenta el hidrograma, para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años, ingresado en el modelo, al inicio del tramo de modelación, identificado en el modelo de Flo-2D con el código "J_RAC2", este punto de entrada se divide en 4 nodos para minimizar el tiempo de modelación y posibles inestabilidades numéricas (Figura 16).

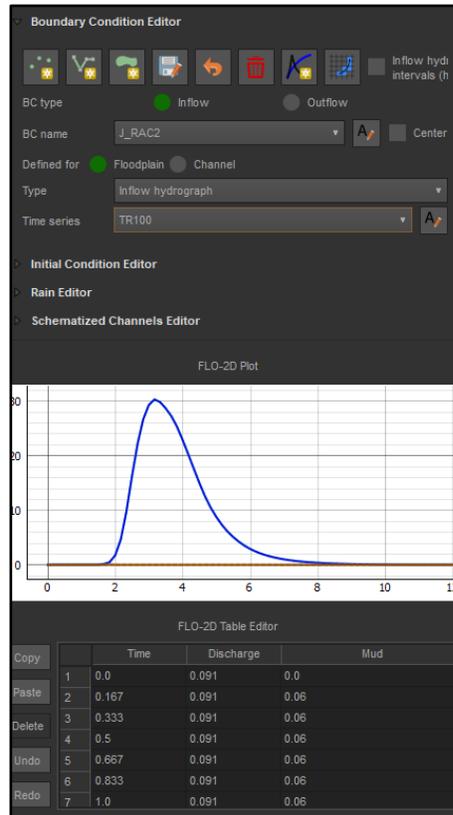


Figura 16. Hidrograma de entrada para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

Los hidrogramas de caudal líquido ingresados en el modelo corresponden con los hidrogramas generados del estudio hidrológico, del cual se tiene que los caudales máximos para los diferentes periodos de retorno son los que se presentan en la tabla a continuación, para el río Aguaclara en el tramo de interés (que corresponde a un área total de drenaje de 25,77 km²).

Tabla 5. Caudales máximos (m³/s) para diferentes periodos de retorno, generados con el modelo hidrológico

Hydrologic Element	Área de drenaje (km ²)	Caudal máximo (m ³ /s)										
		2.33 años	5 años	10 años	25 años	50 años	75 años	100 años	200 años	300 años	400 años	500 años
Junction-RAC2	25,77	16,7	27,2	40,4	64,5	89,7	107,1	121,3	160,3	187,4	208,6	225,8

Fuente: elaboración propia

6.3.3. Componente sólido para el modelo de avenidas torrenciales

Respectivamente con cada hidrograma de caudal líquido se ingresa el respectivo Cv asociado a cada instante, los valores que se ingresan corresponden a los resultados recibidos, y posteriormente consolidados y organizados para su ingreso al modelo. Los valores de Cv varían entre 0.00 y 0.09 en general, lo que corresponde al presentar valores

superiores al 5 % ($C_v = 0.05$) flujos hiperconcentrados según el criterio de Meunier ($C_v > 5\%$).

Los sedimentogramas generados consideran tanto los sólidos provenientes de laderas (calculados en el capítulo 5) como los que provienen de deslizamientos según los estudios geotécnicos. A manera de ejemplo se presentan a continuación los sedimentogramas del componente de sólidos gruesos, calculados para los elementos del modelo hidrológico RAC2 para 75 y 100 años de periodo de retorno (ver Figura 17 y Figura 18). Este mismo procedimiento fue aplicado para las demás cuencas aferentes con aporte de sólidos gruesos, esta información se toma de los estudios del componente de geología del proyecto.

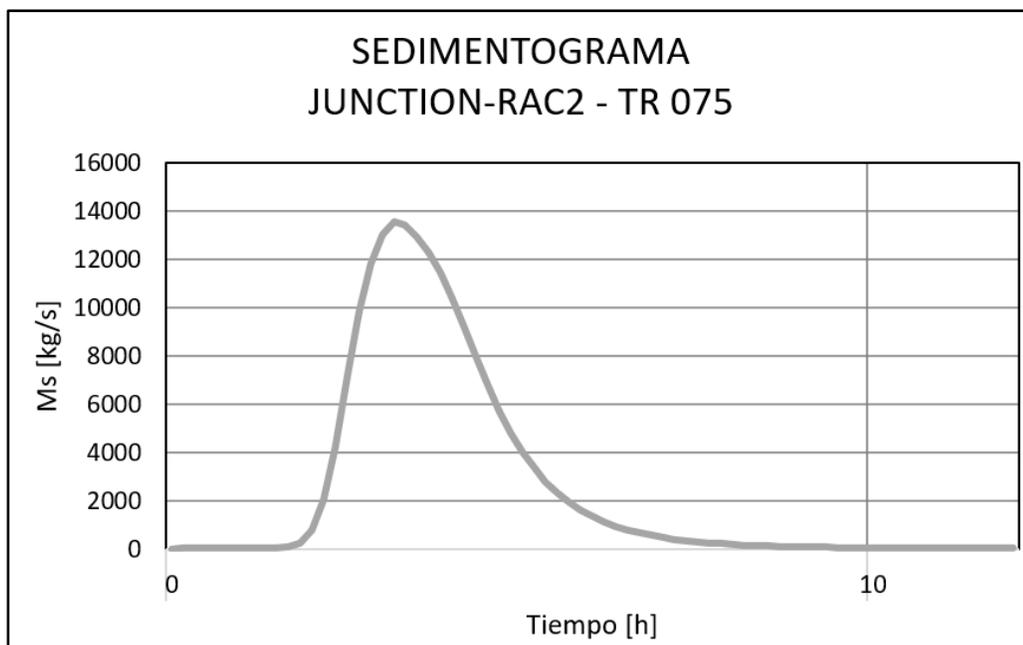


Figura 17. Sedimentograma de sólidos gruesos para Junction RAC2 (Tr075)
Fuente: Estudio de geología del proyecto

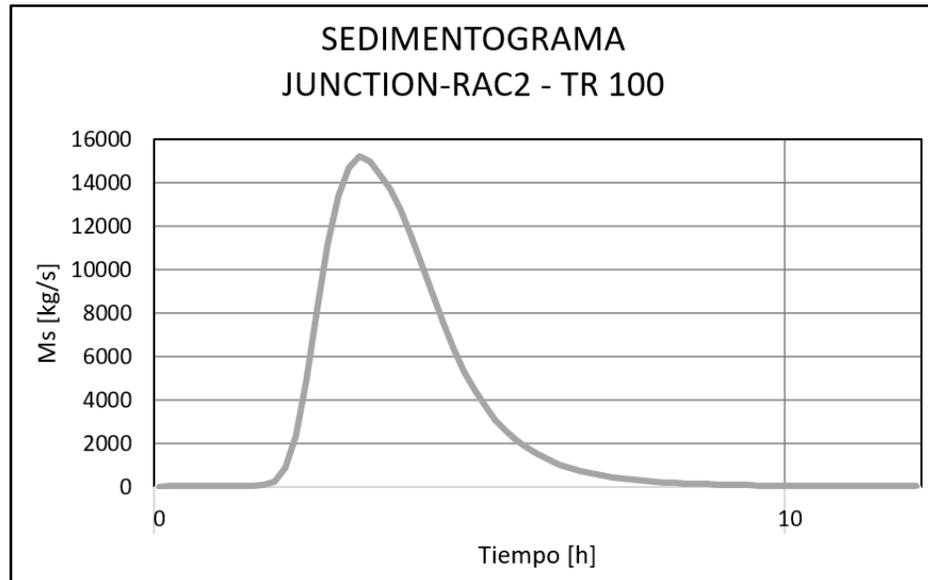


Figura 18. Sedimentograma de sólidos gruesos para Junction RAC2 (Tr100)
Fuente: Estudio de geología del proyecto

Específicamente la distribución temporal de los sedimentogramas ingresada al modelo se expresa en términos del coeficiente de concentración volumétrica (C_v); este que es un coeficiente adimensional, y se presentan los valores ingresados para cada uno de los periodos de retorno en la tabla siguiente.

Tabla 6. Coeficientes de concentración volumétrica ingresados al modelo Flo-2D

T (min)	Sólidos (C_v)										
	Tr0.233	Tr005	Tr010	Tr025	Tr050	Tr075	Tr100	Tr200	Tr300	Tr400	Tr500
0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
20	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
30	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
40	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
50	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
60	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
70	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
80	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
90	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
100	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.085	0.084	0.084
110	0.000	0.000	0.052	0.059	0.083	0.083	0.083	0.082	0.081	0.080	0.079
120	0.000	0.000	0.052	0.073	0.075	0.075	0.074	0.073	0.072	0.071	0.070
130	0.000	0.000	0.062	0.069	0.070	0.070	0.069	0.068	0.067	0.066	0.066
140	0.000	0.000	0.059	0.066	0.067	0.067	0.067	0.066	0.065	0.064	0.063
150	0.007	0.007	0.058	0.065	0.066	0.066	0.066	0.064	0.063	0.062	0.062

T (min)	Sólidos (Cv)										
	Tr0.233	Tr005	Tr010	Tr025	Tr050	Tr075	Tr100	Tr200	Tr300	Tr400	Tr500
160	0.006	0.006	0.058	0.065	0.065	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061
170	0.006	0.006	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.062	0.062	0.061
180	0.006	0.006	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.062	0.062	0.061
190	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.062	0.062	0.061
200	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061
210	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061
220	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.064	0.062	0.062	0.061
230	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.065	0.063	0.062	0.061	0.061
240	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061	0.061
250	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061	0.061
260	0.005	0.005	0.057	0.064	0.065	0.065	0.064	0.063	0.062	0.061	0.061
270	0.005	0.005	0.056	0.064	0.064	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060
280	0.004	0.004	0.056	0.063	0.064	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060
290	0.004	0.004	0.056	0.063	0.064	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060
300	0.004	0.004	0.056	0.063	0.064	0.064	0.064	0.063	0.061	0.061	0.060
310	0.000	0.000	0.056	0.063	0.064	0.064	0.064	0.062	0.061	0.060	0.060
320	0.000	0.000	0.056	0.063	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.060
330	0.000	0.000	0.056	0.063	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.060
340	0.000	0.000	0.056	0.063	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.060
350	0.000	0.000	0.052	0.063	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.060
360	0.000	0.000	0.052	0.063	0.064	0.064	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059
370	0.000	0.000	0.052	0.059	0.064	0.063	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059
380	0.000	0.000	0.052	0.059	0.063	0.063	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059
390	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.063	0.062	0.061	0.060	0.059
400	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.062	0.060	0.060	0.059
410	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.060	0.060	0.059
420	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.059	0.059
430	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
440	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
450	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
460	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
470	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
480	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
490	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
500	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
510	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
520	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
530	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
540	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056

T (min)	Sólidos (Cv)										
	Tr0.233	Tr005	Tr010	Tr025	Tr050	Tr075	Tr100	Tr200	Tr300	Tr400	Tr500
550	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
560	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
570	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
580	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
590	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
600	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
610	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
620	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
630	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
640	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
650	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
660	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
670	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
680	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
690	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
700	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
710	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056
720	0.000	0.000	0.052	0.059	0.060	0.060	0.060	0.058	0.057	0.056	0.056

Fuente. Elaboración propia

Para el modelo de avenidas torrenciales, es importante incluir los parámetros relacionados con el comportamiento reológico de la muestra. Según geotecnia, la muestra de referencia que más se asemeja al componente sólido que se espera en la mezcla de agua – sólido, es Glenwood 3, según las características de los suelos en el área de estudio, tomado del estudio de suelos, y los valores de referencia de granulometría y límites de Atterberg de la Tabla 3; luego, siendo los valores de referencia los que se presentan en la Tabla 4, según la propuesta de O'Brien y Julien. Se ingresan los datos al modelo de Flo-2D tal como se indican en las ecuaciones siguientes:

Viscosidad

$$\mu = 0.00062e^{19.9 \cdot C_v} \text{ (Ecuación 35)}$$

Esfuerzo cortante

$$\tau_y = 0.00707e^{29.8 \cdot C_v} \text{ (Ecuación 36)}$$

6.3.4. Rugosidad n de Manning

La resistencia al flujo en un río o rugosidad se debe principalmente a dos factores:

- La rugosidad del grano, que se genera por las fuerzas de fricción que actúan sobre las superficies de las partículas.
- La rugosidad de forma, que se genera por las fuerzas de presión que actúan sobre las formas del fondo.

Para el cálculo de los coeficientes de rugosidad de Manning existen diversas metodologías desarrolladas. Debido a que la determinación de este coeficiente de rugosidad n tiene una gran dificultad, existen diferentes metodologías para determinar este valor.

Según Ven Te Chow (2004), para lechos con vegetación, se recomienda usar coeficientes de Manning entre 0.020 y 0.035 como se muestra en las siguientes dos imágenes, de la Figura 19.

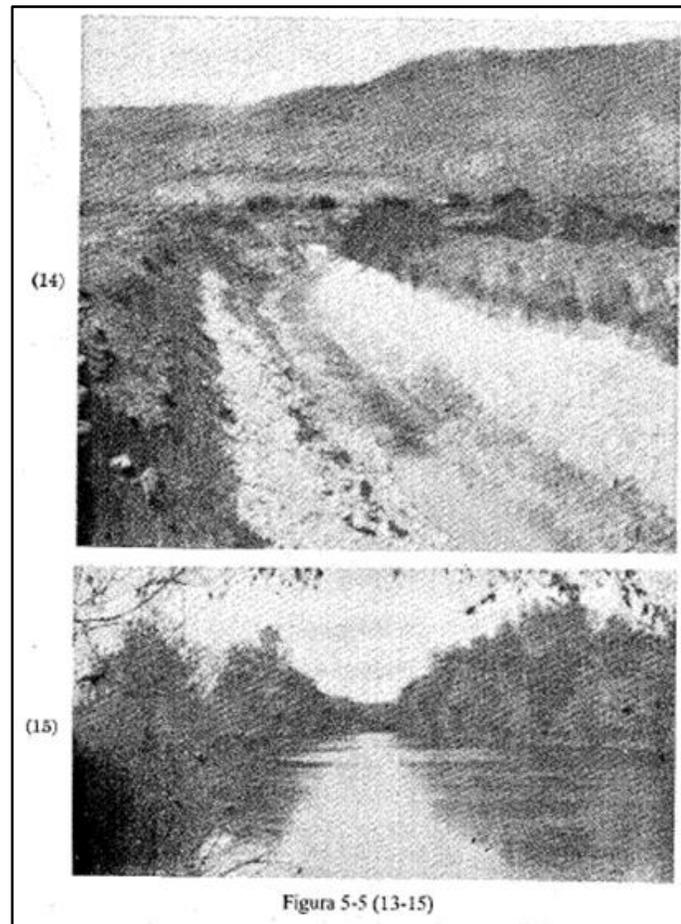


Figura 19. Imágenes de referencia de cauces y sus valores de rugosidad n de Manning
Fuente: Hidráulica de canales abiertos (Chow, Hidráulica de canales abiertos, 2004)

Para la determinación del coeficiente de Manning se adoptó el método de Cowan en el cual el coeficiente de Manning se calcula bajo la sumatoria de diferentes factores que inciden en la rugosidad, los cuales se muestran en Tabla 7. La ecuación de Cowan está determinada por la expresión a continuación, cuyas variables se encuentran descritas y con los valores asignados, en la tabla antes mencionada:

$$\text{Ecuación de Cowan: } n = (n_1 + n_2 + n_3 + n_4)m_5 \text{ (Ecuación 37)}$$

Tabla 7. Cálculo de la rugosidad n de Manning en el cauce principal

Condiciones del canal		Valores	Manning en cauce
	Tierra	0,020	
Material involucrado	Corte en roca	0,025	0,024
	Grava fina	0,024	
	Grava gruesa	0,028	
	Suave	0,000	
Grado de irregularidad	Menor	0,005	0,005
	Moderado	0,010	
	Severo	0,020	
	Gradual	0,000	
Variaciones de la sección transversal	Ocasionalmente alternante	0,005	0,004
	Frecuentemente alternante	0,010 - 0,015	
	Insignificante	0,000	
Efecto relativo de las obstrucciones	Menor	0,010 - 0,015	0,010
	Apreciable	0,020 - 0,030	
	Severo	0,040 - 0,060	
	Baja	0,005 - 0,010	
Vegetación	Media	0,010 - 0,025	0,002
	Alta	0,025 - 0,050	
	Muy alta	0,050 - 0,100	
Grado de los efectos por meandros	Menor	1,000	1,000
	Apreciable	1,150	

Condiciones del canal	Valores	Manning en cauce
Severo	1,300	
	n=	0,045

Fuente. Elaboración propia

Con base a los valores propuestos por en hidráulica de canales (Chow, Hidráulica de canales abiertos, 2004), se adoptan los siguientes valores de rugosidad de Manning para cada clase:

Tabla 8. Valores de Manning adoptados

Clase	Descripción	n de Manning
1	Llanura	0,080
2	Río	0,045
3	Vías	0,016
4	Urbano	0,015

Fuente. Elaboración propia

Se ingresan las capas que contienen la clasificación y se determinan los respectivos valores de rugosidad para cada clase, mediante una capa vectorial. En la Figura 20 se presenta la distribución espacial de las rugosidades, que se ingresan en a la parametrización del modelo desde QGIS, para el estudio de avenidas torrenciales, con la respectiva asignación de los valores de la tabla anterior. Los valores de rugosidad n de Manning son los mismos que se emplearon en el estudio de inundaciones.

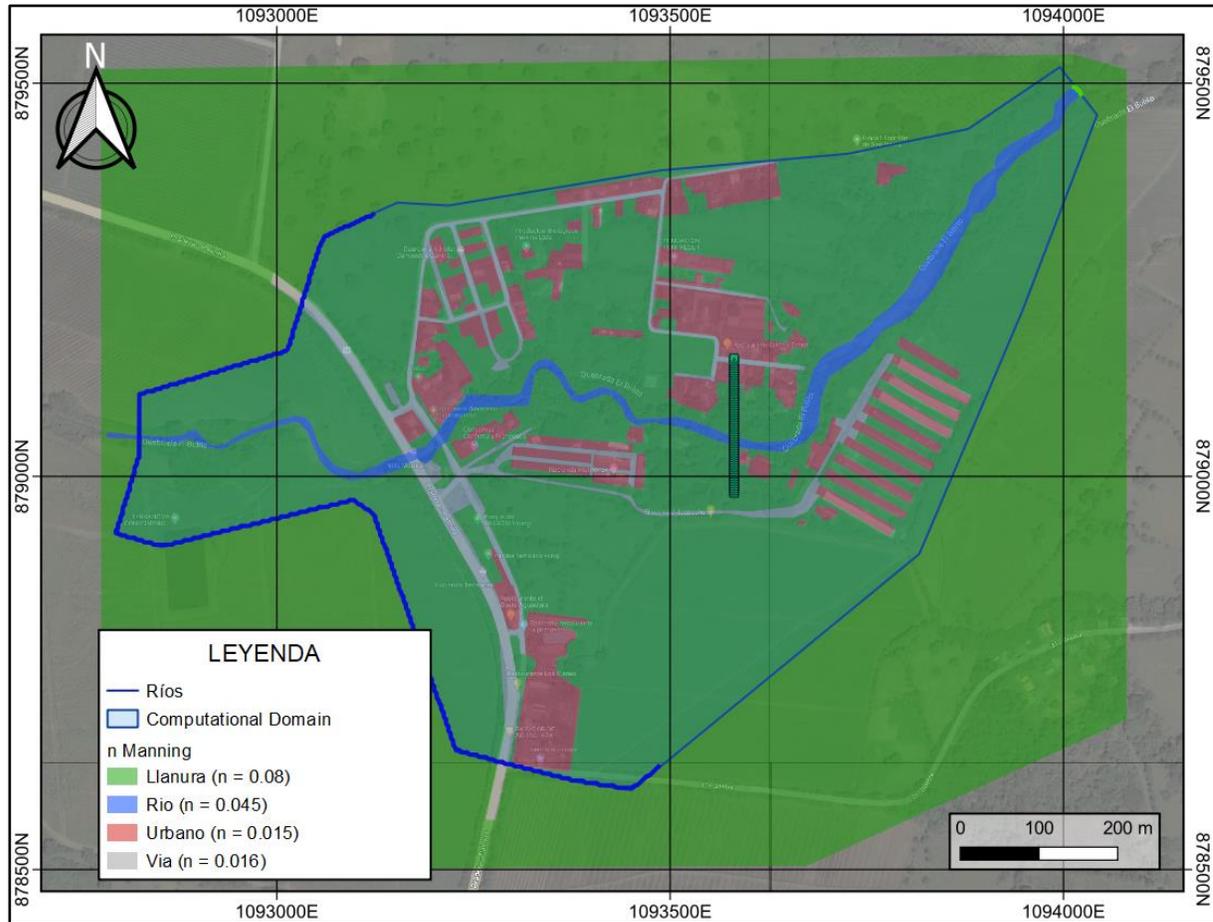


Figura 20. Distribución en planta de las rugosidades n de Manning
Fuente. Elaboración propia

6.3.5. Resultados modelo Flo-2D

Una vez se corren los modelos Flo-2D para el análisis de avenidas torrenciales, para los diferentes periodos de retorno, se obtienen los resultados de las condiciones máximas asociadas a este fenómeno, los cuales se procesan posteriormente para su respectiva representación gráfica y manejo. A continuación, se presentan los resultados correspondientes a cada periodo de retorno, para la modelación a escala 1:2.000, donde se ilustra y de analiza el resultado de profundidades de flujo y velocidades de flujo para cada periodo de retorno. Los resultados corresponden a los valores máximos de cada celda, correspondiente a un resultado final generado por el modelo al finalizar la modelación y posteriormente procesado para su representación gráfica.

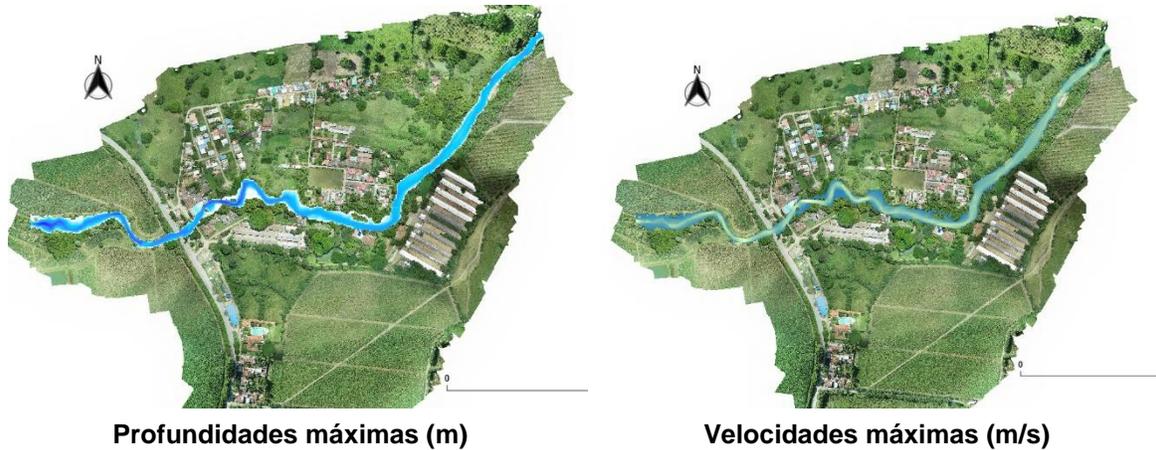


Figura 21. Resultados profundidades y velocidades (Tr2.33 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 2,33 años (ver Figura 21), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 0.70 m y 2.00 m en términos generales, con profundidades en promedio de 1.00 m, lo cual es esperable en un evento con relativa recurrencia. Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 1.00 m/s a 2.00 m/s en la totalidad del tramo, en especial, se observa que aguas abajo del centro poblado las velocidades tienden a concentrarse en el cauce, mientras que, hacia aguas arriba la distribución de la velocidad es más homogénea en el ancho del río. No se presentan desbordamientos, el río tiene la capacidad hidráulica para transporte el flujo asociado a una avenida torrenciales, correspondiente a un periodo de retorno de 1 vez en 2.33 años.

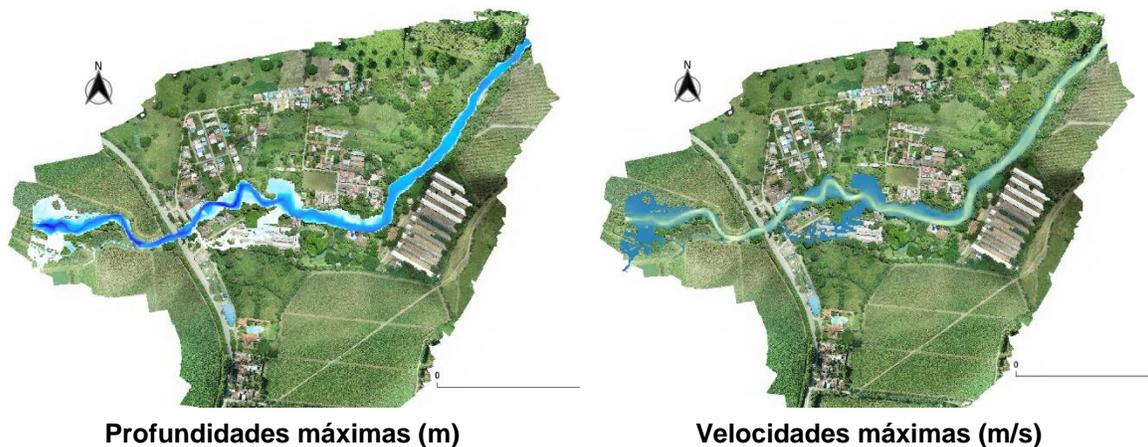


Figura 22. Resultados profundidades y velocidades (Tr005 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 5 años (ver Figura 22), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 0.80 m y 2.30 m en términos generales, con profundidades máximas de 2.40 m, aguas arriba del primer puente (en sentido del flujo).

Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 1.40 m/s a 2.40 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran en las curvas aguas arriba y aguas abajo de los puentes. Se presentan desbordamientos del cauce, en ambas márgenes de río Aguaclara, sobre la margen izquierda se observa que algunas construcciones se ven afectadas por este desbordamiento, así como una vía, mientras que, sobre la margen derecha el desbordamiento afecta únicamente zonas verdes.

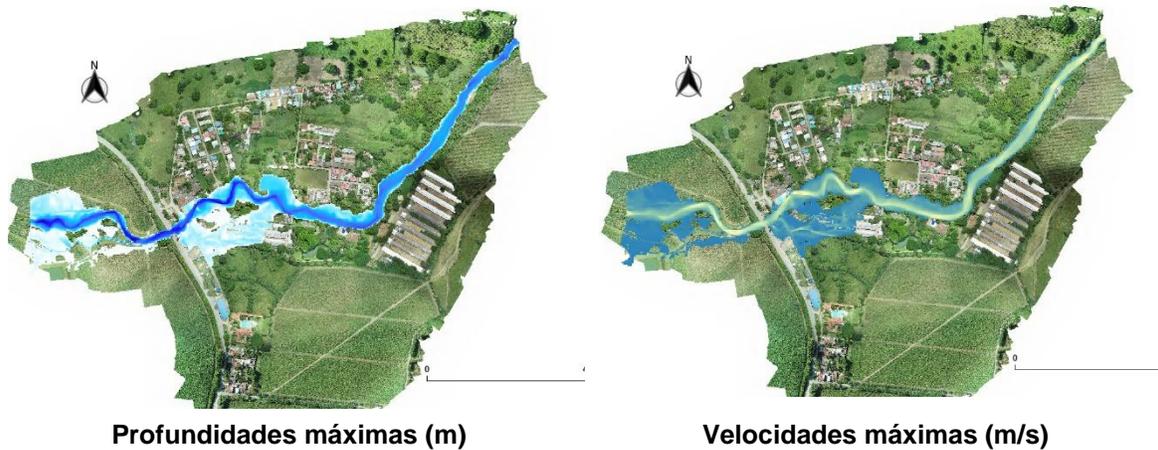


Figura 23. Resultados profundidades y velocidades (Tr010 años)
Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 10 años (ver Figura 23), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 1.00 m y 2.30 m en términos generales, con profundidades máximas de 2.70 m, aguas arriba del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 1.50 m/s a 2.60 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran en las curvas aguas arriba y aguas abajo de los puentes, donde se alcanzan velocidades máximas del orden de 3.60 m/s. Se presentan desbordamientos del cauce, en ambas márgenes de río Aguaclara, sobre la margen izquierda se observa que varias construcciones se ven afectadas por este desbordamiento, así como una vía, mientras que, sobre la margen derecha el desbordamiento afecta únicamente zonas verdes, este último siendo el mismo comportamiento observado para 5 años de periodo de retorno, pero en este caso, con profundidades de flujo superiores.

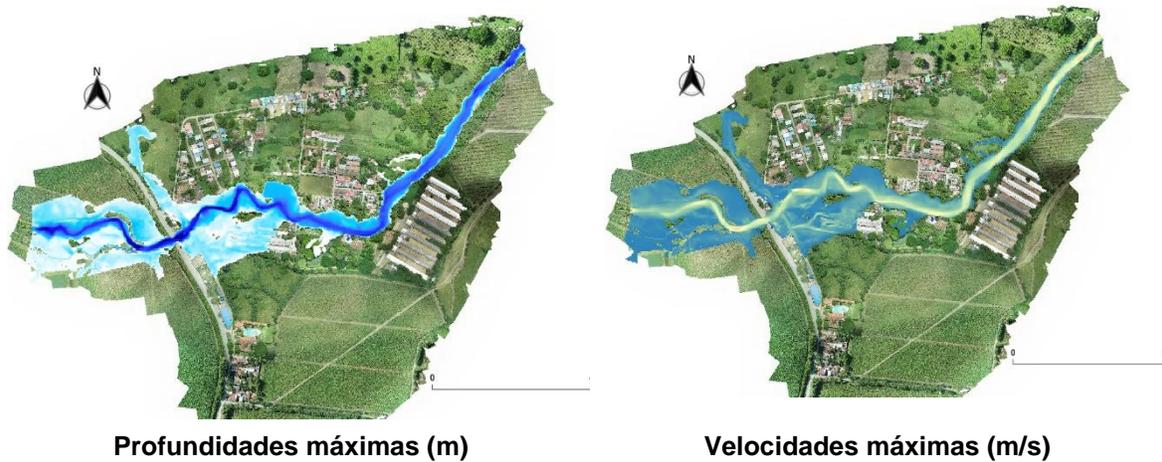


Figura 24. Resultados profundidades y velocidades (Tr025 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 25 años (ver Figura 24), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 1.50 m y 2.40 m en términos generales, con profundidades máximas de 2.95 m, aguas arriba del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 1.80 m/s a 3.00 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran en las curvas aguas arriba y aguas abajo de los puentes, donde se alcanzan velocidades máximas del orden de 3.65 m/s. Se presentan desbordamientos del cauce, en ambas márgenes de río Aguaclara, los desbordamientos se presentan tanto aguas arriba como aguas abajo de los puentes, se observan construcciones y vías afectadas, la vía genera una barrera que direcciona las aguas desbordadas de la margen derecha, hacia el norte. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.30 m en promedio.

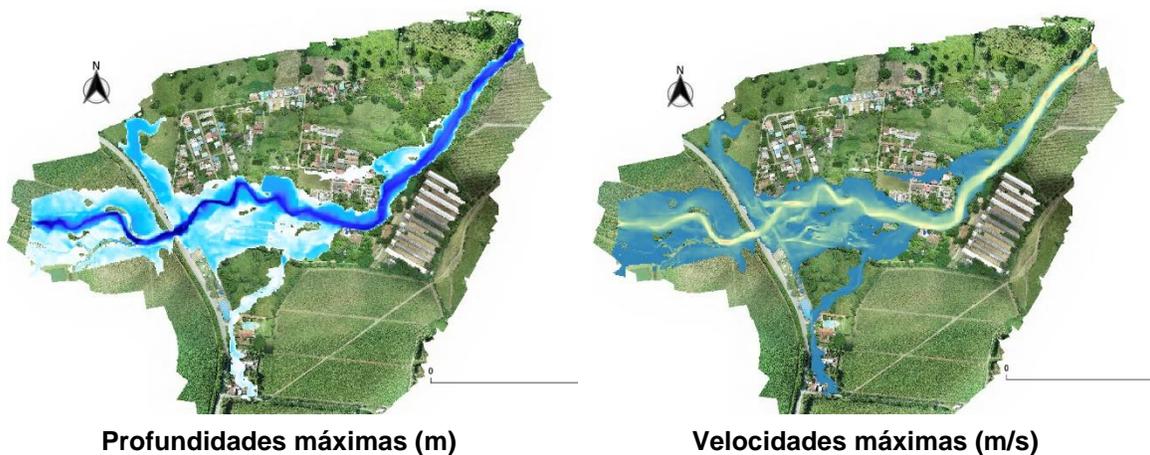


Figura 25. Resultados profundidades y velocidades (Tr050 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 50 años (ver Figura 25), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 1.80 m y 2.50 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.20 m, aguas arriba del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.00 m/s a 3.30 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran en las curvas aguas arriba y aguas abajo de los puentes, donde se alcanzan velocidades máximas del orden de 3.70 m/s. Se presentan desbordamientos del cauce, en ambas márgenes de río Aguaclara, los desbordamientos se presentan tanto aguas arriba como aguas abajo de los puentes, se observan construcciones y vías afectadas, la vía genera una barrera que direcciona las aguas desbordadas de la margen derecha, hacia el norte. Sobre la margen derecha se observa que la mayoría de las construcciones se ven cubiertas por la mancha de inundación. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.55 m en promedio.

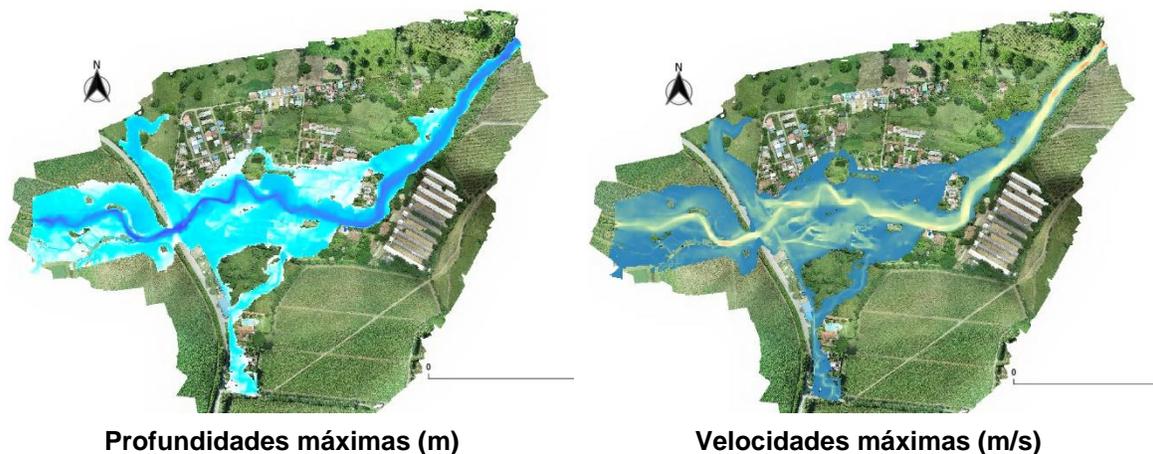


Figura 26. Resultados profundidades y velocidades (Tr075 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 75 años (ver Figura 26), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 2.20 m y 2.80 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.35 m, aguas arriba del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.00 m/s a 3.80 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 4.78 m/s. Se presentan desbordamientos del cauce, en ambas márgenes de río Aguaclara, los desbordamientos se presentan tanto aguas arriba como aguas abajo de los puentes, se observan construcciones y vías afectadas, la vía genera una barrera que direcciona las aguas desbordadas de la margen derecha, hacia el norte (misma situación sucede hacia el sur). Sobre la margen derecha se observa que la mayoría de las construcciones se ven cubiertas por la mancha de inundación. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.55 m en promedio.

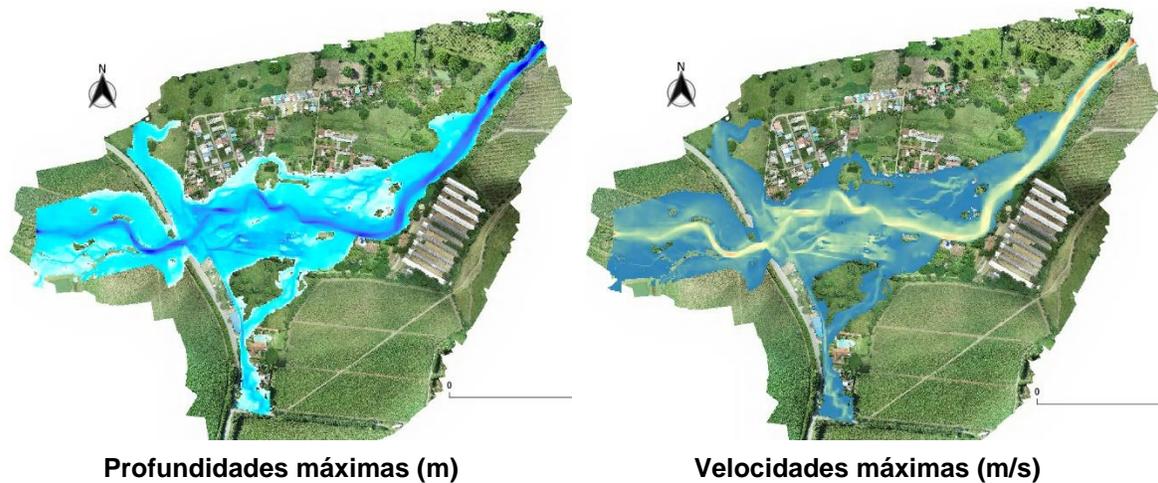
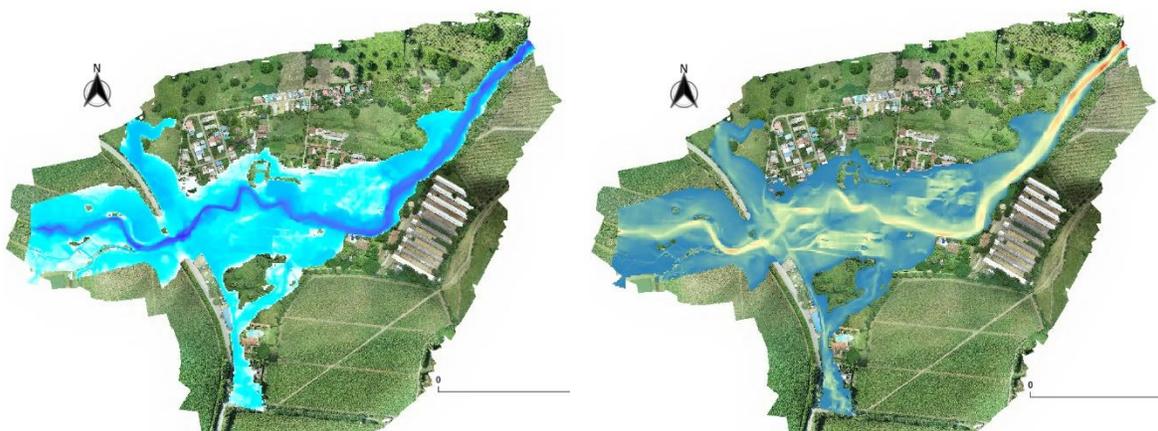


Figura 27. Resultados profundidades y velocidades (Tr100 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 100 años (ver Figura 27), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 2.30 m y 3.20 m en términos generales, con profundidades máximas de 4.00 m, aguas abajo del segundo puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.10 m/s a 3.80 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 6.22 m/s. La mancha de inundación presenta un resultado similar a la asociada a 75 años de periodo de retorno, con una extensión un poco más grande, donde se observa que una gran cantidad de construcciones se ven afectadas por esta mancha de inundación, con desbordamientos sobre ambas márgenes. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.65 m en promedio. En algunas curvas del río se observa que las velocidades tienden a aumentar, lo que es importante destacar, pues con las profundidades que se presentan y las velocidades de flujo, es probable que se generen fenómenos de erosión como la socavación del lecho del río; esto último se trata de una situación que se presenta también para periodos de retorno superiores.



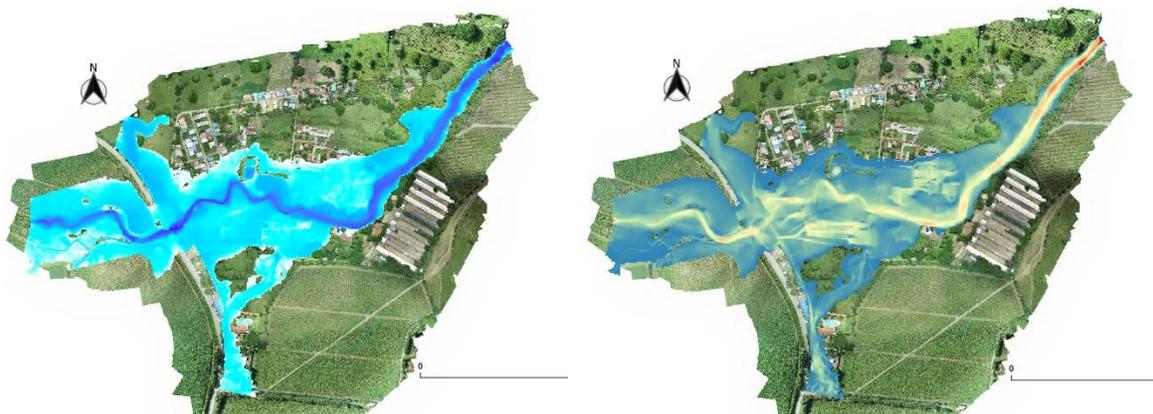
Profundidades máximas (m)

Velocidades máximas (m/s)

Figura 28. Resultados profundidades y velocidades (Tr200 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 200 años (ver Figura 28), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 2.50 m y 3.30 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.65 m, aguas abajo del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.30 m/s a 3.80 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 7.45 m/s. Según la mancha de inundación, se observa que una gran cantidad de construcciones se ven afectadas por esta mancha de inundación, con desbordamientos sobre ambas márgenes. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.70 m en promedio.



Profundidades máximas (m)

Velocidades máximas (m/s)

Figura 29. Resultados profundidades y velocidades (Tr300 años)

Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 300 años (ver Figura 29), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 2.70 m y 3.40 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.75 m, aguas abajo del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.50 m/s a 4.00 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 8.00 m/s. Según la mancha de inundación, se observa que una gran cantidad de construcciones se ven afectadas por esta mancha de inundación, con desbordamientos sobre ambas márgenes. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.80 m en promedio, mientras que las velocidades en las zonas desbordadas logran alcanzar valores de 2.0 m/s y superiores, valores que probablemente tengan una capacidad impacto y arrastre importante.

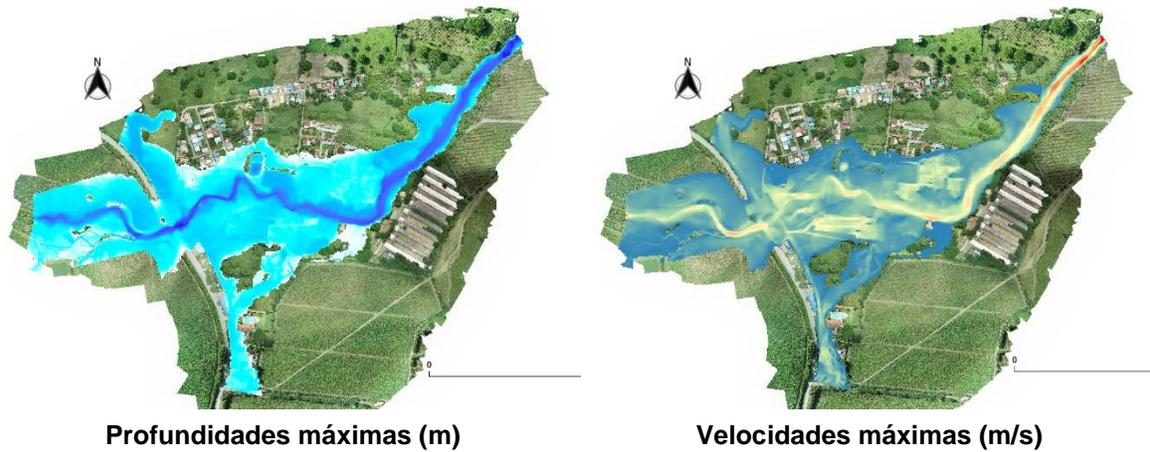


Figura 30. Resultados profundidades y velocidades (Tr400 años)
Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 400 años (ver Figura 30), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 2.70 m y 3.40 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.83 m, aguas abajo del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.50 m/s a 4.30 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 8.50 m/s. Según la mancha de inundación, se observa que una gran cantidad de construcciones se ven afectadas por esta mancha de inundación, con desbordamientos sobre ambas márgenes. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.80 m en promedio, mientras que las velocidades en las zonas desbordadas logran alcanzar valores de 2.00 m/s y superiores, valores que probablemente tengan una capacidad impacto y arrastre importante.

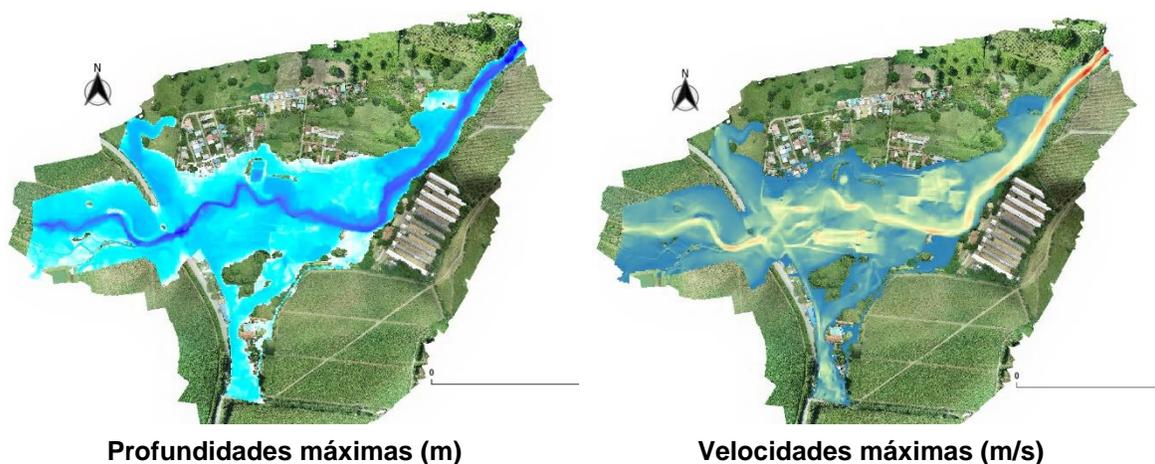


Figura 31. Resultados profundidades y velocidades (Tr500 años)
Fuente. Elaboración propia

Para un periodo de retorno de 1 vez en 500 años (ver Figura 31), se observa que las profundidades de lámina de agua oscilan entre 3.00 m y 3.50 m en términos generales, con profundidades máximas de 3.90 m, aguas abajo del primer puente (en sentido del flujo). Con respecto a las velocidades, éstas tienden a encontrarse en el rango de 2.50 m/s a 4.30 m/s en la totalidad del tramo; las velocidades más altas se encuentran al inicio del tramo de modelación con valores de hasta 8.50 m/s. Según la mancha de inundación, se observa que una gran cantidad de construcciones se ven afectadas por esta mancha de inundación, con desbordamientos sobre ambas márgenes. Las profundidades de flujo en las zonas de desbordamiento son del orden de 0.80 m en promedio, mientras que las velocidades en las zonas desbordadas logran alcanzar valores de 2.00 m/s y superiores, valores que probablemente tengan una capacidad impacto y arrastre importante.

Adicional a los resultados en planta para cada periodo de retorno se generan secciones transversales y un perfil longitudinal del río, para proceder con un análisis de mayor detalle y contrastarlo con el resultado obtenido en el estudio de inundaciones. Así en la Figura 32 siguiente se encuentra la localización en planta de las secciones transversales y el perfil longitudinal.

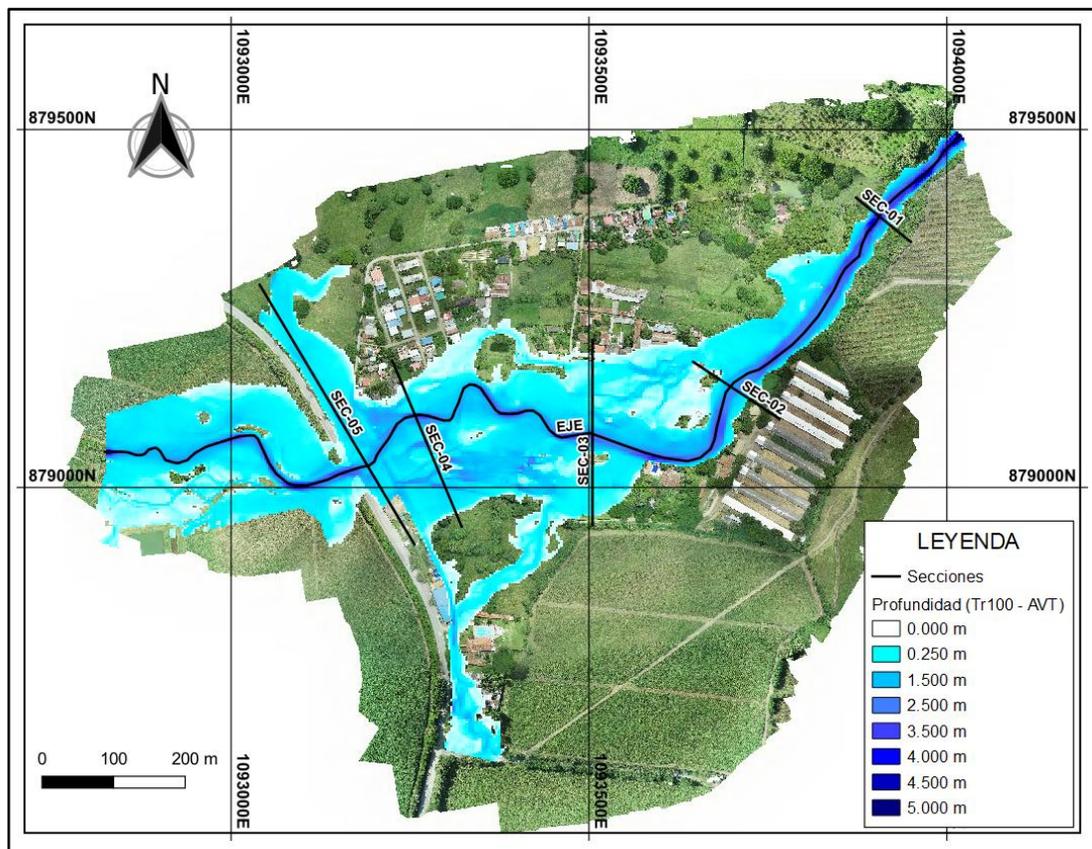


Figura 32. Localización de secciones y perfil con profundidades de flujo para 100 años de periodo de retorno (AVT)

Fuente. Elaboración propia

En la Figura 33 se presenta el perfil longitudinal del tramo modelado del río Aguaclara para el análisis del centro poblado de Aguaclara. Aquí se observa que predomina una altura de lámina superior en el resultado de avenidas torrenciales frente a la lámina para el escenario de inundaciones, en esta ocasión ambos para 100 años de periodo de retorno. Al nivel del puente se presentan niveles es lámina de 1043.38 msnm para el resultado de avenidas torrenciales en el primer puente, el cual tiene actualmente un nivel de gálibo en la cota 1042.23 msnm, es decir que se sobre pasa el nivel de gálibo del puente pues no hay capacidad hidráulica para que pase la totalidad del flujo bajo este mismo. Así mismo ocurre con el segundo puente con un nivel de lámina en la 1043.25 msnm y su respectivo gálibo en la 1042.23 msnm.

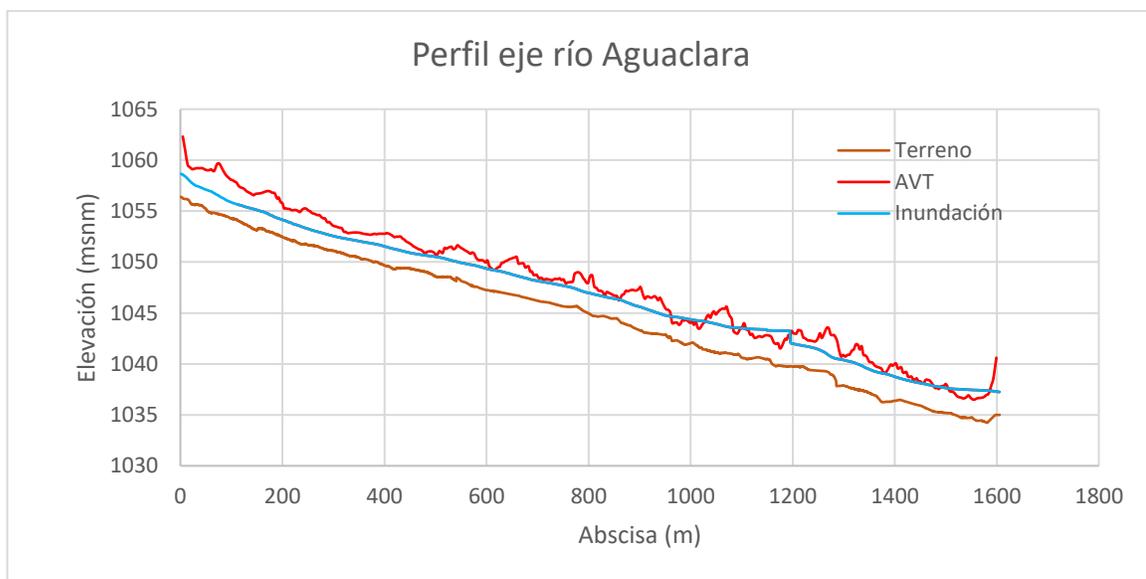


Figura 33. Perfil longitudinal del río Aguaclara
Fuente. Elaboración propia

Las secciones transversales se presentan en la Figura 34 a Figura 38, todas para 100 años de periodo de retorno con sus respectivos niveles de lámina máxima obtenida para el análisis de inundaciones y avenidas torrenciales. En estas secciones es posible observar que mientras que para el escenario de inundaciones se presentan en las secciones ST-01 a ST-03 niveles de lámina que se mantienen dentro del cauce, para los resultados máximos de avenidas torrenciales la lámina de agua se desborda en todo momento y mantiene en promedio niveles del orden de 1.0 m sobre el nivel de lámina del modelo de inundaciones. Los desbordamientos como se logra ver en planta se extienden hacia la zona plana en las secciones ST-04 y ST-05 donde se encuentra el centro poblado.

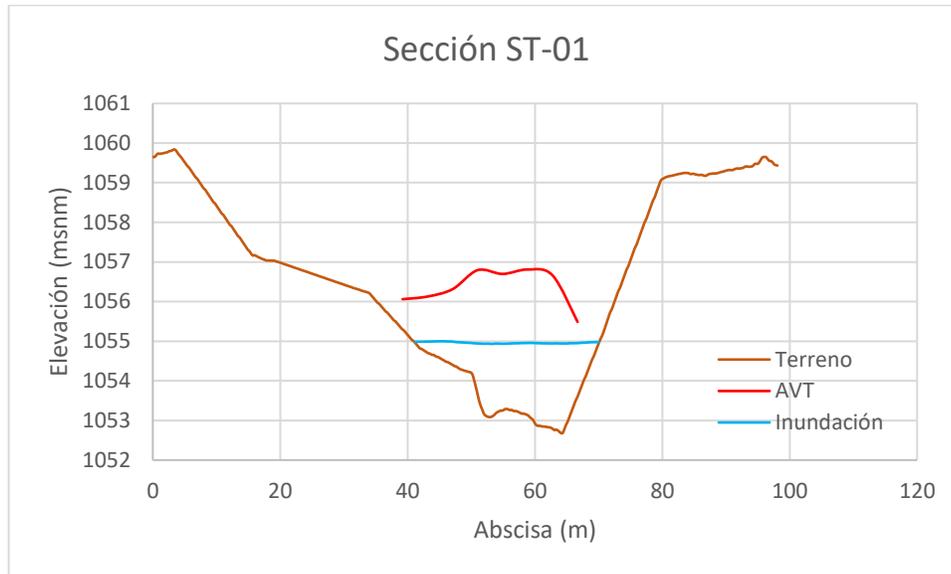


Figura 34. Sección transversal (ST-01) para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

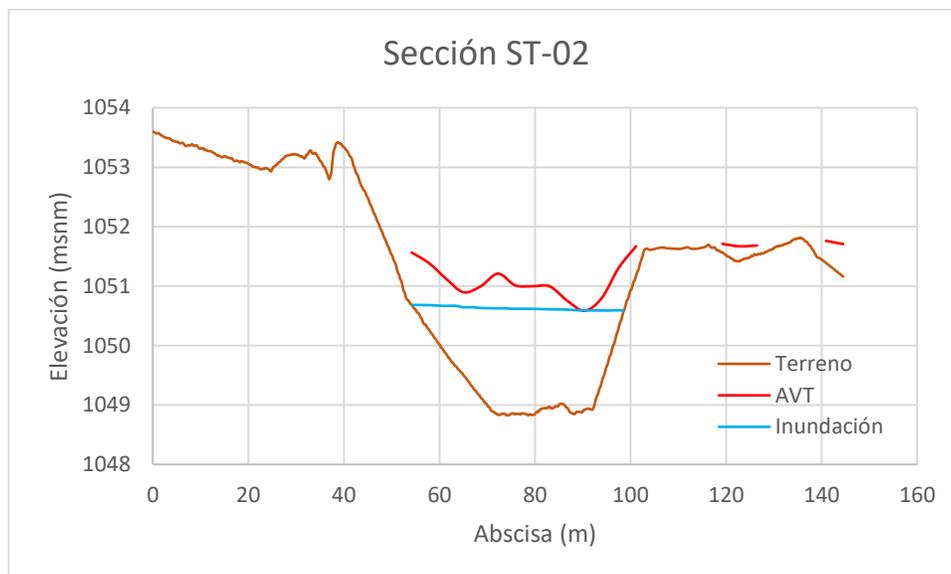


Figura 35. Sección transversal (ST-02) para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

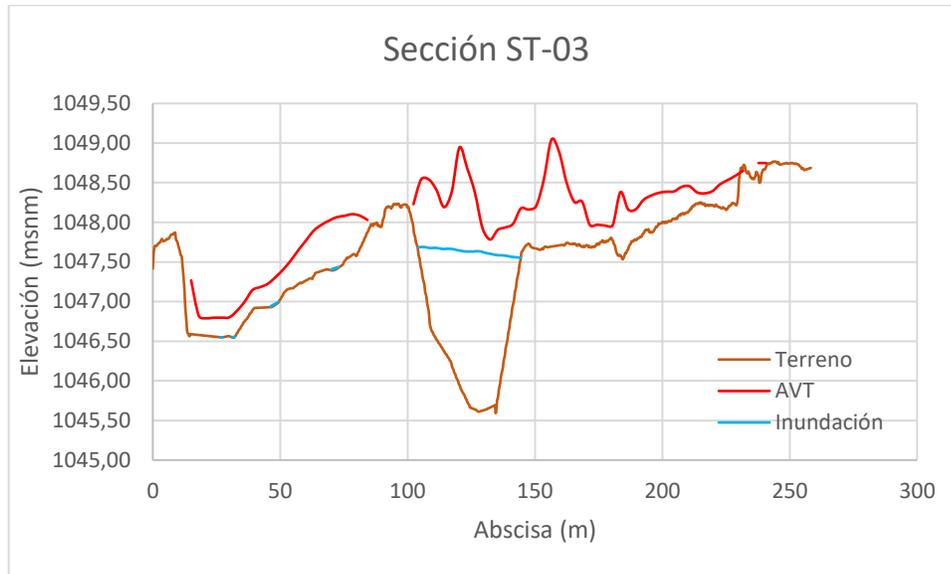


Figura 36. Sección transversal (ST-03) para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

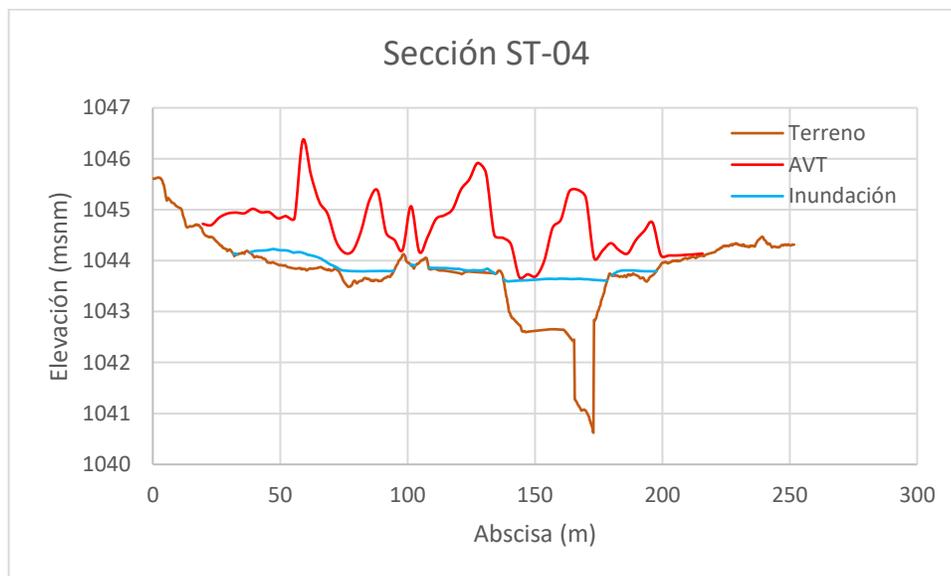


Figura 37. Sección transversal (ST-04) para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

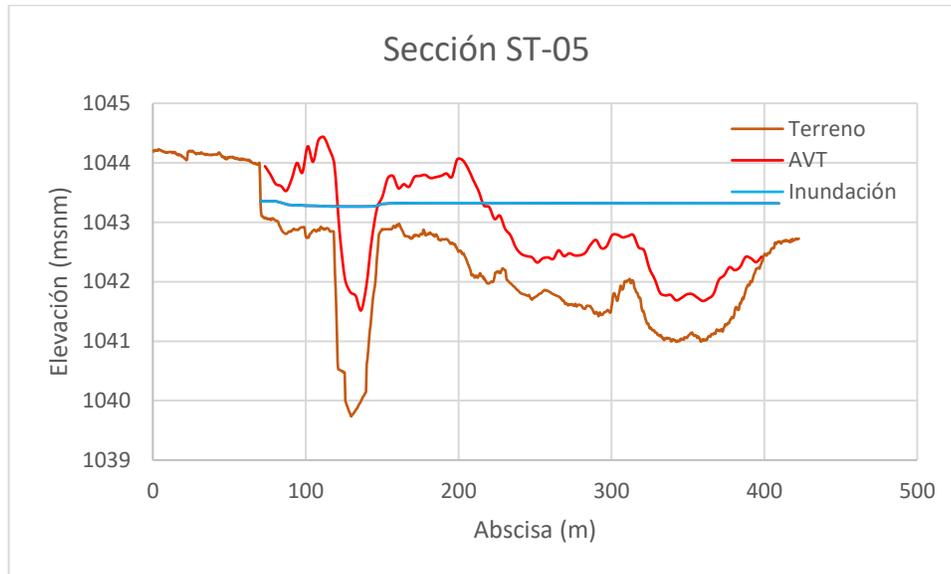


Figura 38. Sección transversal (ST-05) para 100 años de periodo de retorno
Fuente. Elaboración propia

6.4. Mapa de zonificación de la amenaza por AVT a escala 1:2.000

6.4.1. Metodología

El Servicio Geológico Colombiano (SGC), propone una metodología basada en el análisis de 11 periodos de retorno (2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 400, 300 y 500 años), es decir 11 escenarios de modelación hidráulica de avenidas torrenciales, a partir de los cuales se obtienen como resultados los mapas de profundidad máxima ($h_{m\acute{a}x}$) y la magnitud de la velocidad máxima del flujo ($\|u\|_{m\acute{a}x}^2$). Los resultados de estas variables se obtienen como salida del modelo, como datos por celdas, a partir de los cuales es posible generar una capa ráster de cada variable para cada periodo de retorno, en ese orden de ideas, se obtienen 11 capas ráster de profundidades máximas de flujo y 11 capas ráster de velocidades máximas de flujo.

A partir de dichas variables se realiza el cálculo del índice de intensidad de flujo (I_{DF}), asociado a cada periodo de retorno, el cual está expresado como el producto de la profundidad máxima por la magnitud de la velocidad máxima al cuadrado, tal como se indica en la ecuación siguiente:

$$I_{DF} = h_{m\acute{a}x} \|\vec{u}\|_{max}^2 \text{ (Ecuación 38)}$$

Donde:

$h_{\text{máx}}$ = Profundidad máxima de flujo
 $\|u\|_{\text{máx}}^2$ = Velocidad máxima del flujo

La metodología propuesta por el SGC, y adoptada para el presente estudio se encuentra en el apartado "6.3.2. Procedimiento para la cuantificación de la amenaza escala 1:2000" de la guía.

A partir de los resultados de la modelación hidráulica y las capas ráster determinadas con los respectivos valores del índice I_{DF} asociados a cada periodo de retorno, se tendrá suficiente información para determinar las curvas de amenaza para la mayoría de las celdas (píxeles). Las curvas de amenaza relacionan la magnitud del índice de intensidad de flujo (I_{DF}) en función de la probabilidad de excedencia de un evento con determinada magnitud, en ese orden de ideas, esto se construye con base a los resultados obtenidos, para cada celda, donde los resultados permiten crear una dispersión de puntos, que resulta en dicha curva de amenaza. Como las curvas de amenaza son propias a cada celda, esto significa que para cada celda en el espacio se presentará una curva de amenaza distinta, incluso la cantidad de puntos que la conforman podrán variar espacialmente, (por ejemplo, puede que para una celda determinada puede que para un evento de 100 años la celda se vea afectada, mientras que para un evento de 5 años no sea afectada y por ende no contenga ningún valor). En la Figura 39, a continuación, se presenta un ejemplo de la curva de amenaza.

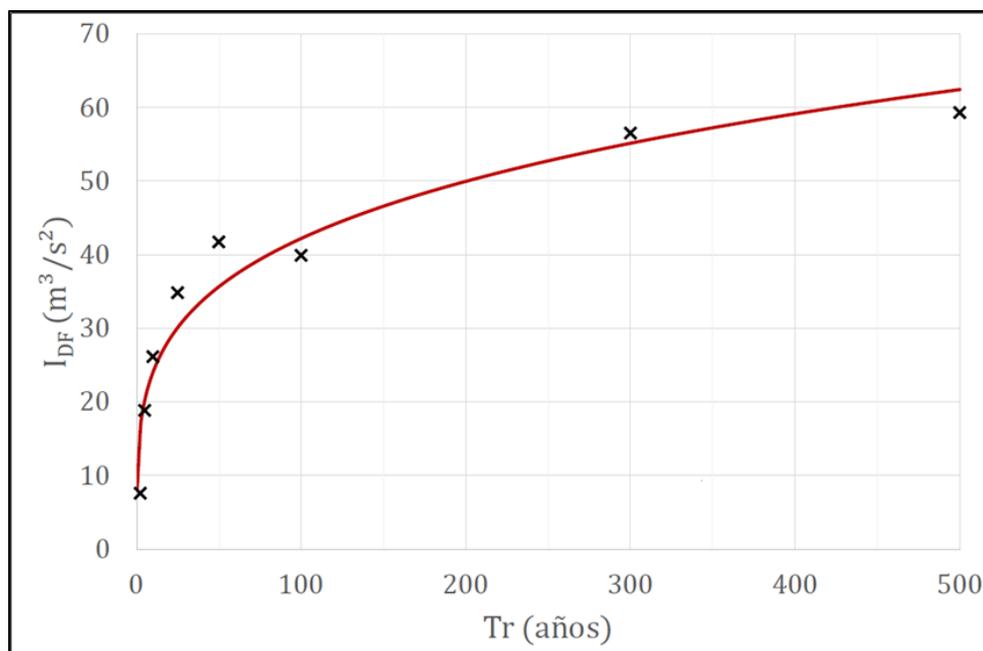


Figura 39. Curva de amenaza que relaciona la magnitud del evento representada mediante el índice de intensidad de flujo con la probabilidad de excedencia (periodo de retorno)

Fuente: Servicio Geológico Colombiano – Pontificia Universidad Javeriana (2021).

La posterior clasificación de la amenaza puede desarrollarse siguiendo dos métodos, donde el primero considera la lectura del valor de índice de flujo (I_{DF}), a partir de un valor de probabilidad adoptado, el segundo método considera una lectura de la probabilidad para un valor dado de índice de flujo (I_{DF}). Cada uno de estos métodos, considera las lecturas de las gráficas en cada celda y se describen más adelante, con detalle.

6.4.1.1. Cálculo de curvas de amenaza

El cálculo de las curvas de amenaza consiste en generar una ecuación de ajuste con los resultados de IDF, donde se genera una expresión del valor de la intensidad de flujo (I_{DF}) respecto al periodo de retorno expresado en años. Por tratarse de un resultado relacionado con periodos de retorno y el comportamiento genérico que se conoce de este tipo de curvas, es apropiado empleado una función logarítmica para su ajuste, tal como se indica en la ecuación siguiente:

$$Y = A + B \times \ln(X) \text{ (Ecuación 39)}$$

Donde para el caso específico:

Y = Intensidad de flujo (I_{DF}) expresado en m^3/s^2

X = Periodo de retorno (Tr) expresado en años

A, B = Parámetros de ajuste

El ajuste se realiza empleando la metodología de mínimos cuadrados, y se realiza posteriormente el cálculo del coeficiente de determinación, para la validación del ajuste. El coeficiente de determinación (R^2) se calcula tal como se indica en la siguiente:

$$R^2 = \frac{\sum(Y_1 - Y_2)^2}{\sum(Y_1 - \bar{Y}_1)^2} \text{ (Ecuación 40)}$$

Donde:

Y_1 = Valor observado (IDF calculada como $||h||v^2$)

Y_2 = Valor pronosticado (IDF calculado con la función de ajuste)

\bar{Y}_1 = Promedio de los valores observados

6.4.1.2. Zonificación empleando un valor de probabilidad o periodo de retorno

El uso de esta metodología considera la toma de decisiones referentes al periodo de exposición y el índice de confiabilidad deseado. Para un coeficiente de confiabilidad β determinado, es posible obtener las probabilidades de excedencia anual para todas las

distribuciones de probabilidad, lo cual se presenta en la Figura 40 y los respectivos valores tabulares en la Tabla 9. Al interpretar la figura y tabla antes mencionadas, se detona el coeficiente de variación $COV = \Omega$.

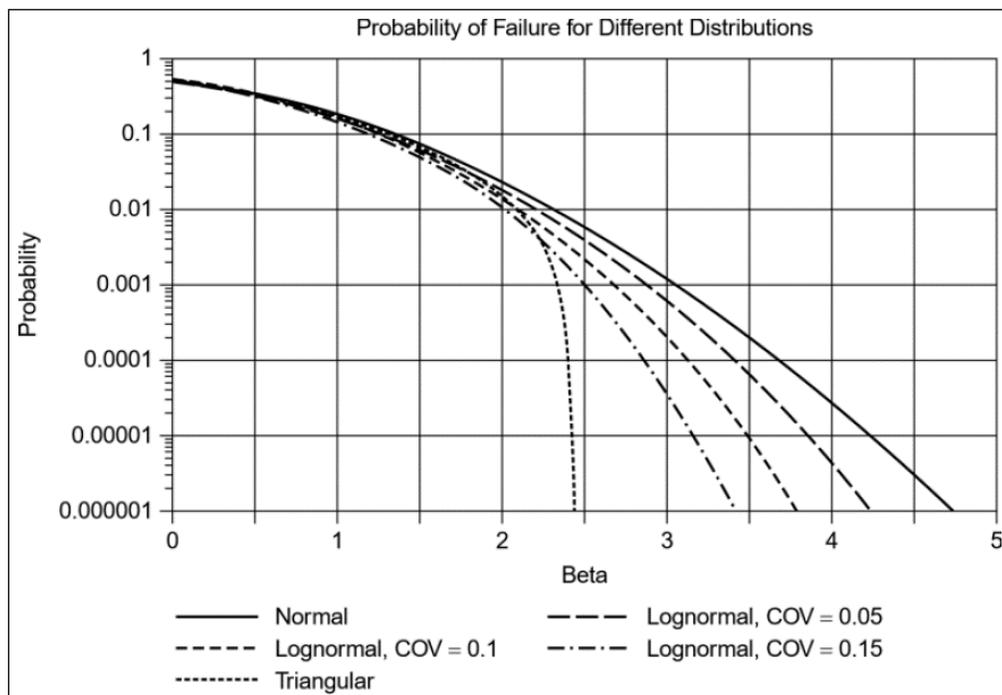


Figura 40. Gráfica de la probabilidad de excedencia (o falla) en función del índice de confiabilidad (Beta) para diferentes distribuciones de probabilidad

Fuente: Servicio Geológico Colombiano – Pontificia Universidad Javeriana (2020)

Tabla 9. Probabilidades de excedencia anual relacionada con el índice de confiabilidad para diferentes distribuciones de probabilidad

Índice de confiabilidad	Probabilidad de excedencia				
	Distribución Normal	Distribución Triangular	Distribución LogNormal		
			$\Omega = 0.05$	$\Omega = 0.10$	$\Omega = 0.15$
0,00	$5,000 \times 10^{-1}$	$5,000 \times 10^{-1}$	$5,100 \times 10^{-1}$	$5,199 \times 10^{-1}$	$5,297 \times 10^{-1}$
0,50	$3,085 \times 10^{-1}$	$3,167 \times 10^{-1}$	$3,150 \times 10^{-1}$	$3,312 \times 10^{-1}$	$3,271 \times 10^{-1}$
1,00	$1,586 \times 10^{-1}$	$1,751 \times 10^{-1}$	$1,583 \times 10^{-1}$	$1,571 \times 10^{-1}$	$1,551 \times 10^{-1}$
1,50	$6,681 \times 10^{-2}$	$7,513 \times 10^{-2}$	$6,236 \times 10^{-2}$	$5,713 \times 10^{-2}$	$5,111 \times 10^{-2}$
2,00	$2,275 \times 10^{-2}$	$1,684 \times 10^{-2}$	$1,860 \times 10^{-2}$	$1,437 \times 10^{-2}$	$1,026 \times 10^{-2}$
2,50	$6,621 \times 10^{-3}$	0	$4,057 \times 10^{-3}$	$2,298 \times 10^{-3}$	$1,048 \times 10^{-3}$
3,00	$1,350 \times 10^{-3}$	0	$6,246 \times 10^{-4}$	$2,111 \times 10^{-4}$	$4,190 \times 10^{-5}$
3,50	$2,326 \times 10^{-4}$	0	$6,542 \times 10^{-5}$	$9,831 \times 10^{-6}$	$4,415 \times 10^{-7}$
4,00	$3,167 \times 10^{-5}$	0	$4,484 \times 10^{-6}$	$1,977 \times 10^{-7}$	$6,469 \times 10^{-10}$
4,50	$3,398 \times 10^{-6}$	0	$1,927 \times 10^{-7}$	$1,396 \times 10^{-9}$	$4,319 \times 10^{-14}$

Fuente: Servicio Geológico Colombiano – Pontificia Universidad Javeriana (2020)

Una vez definida una probabilidad de excedencia (la guía sugiere una probabilidad 0,0025 asociada a 400 años de periodo de retorno) para las condiciones específicas del estudio y de la zona, se procede a realizar la lectura gráfica de la curva de amenaza (o bien para efectos prácticos en cuanto al cálculo, se calcula la intensidad de flujo para una probabilidad dada con la ecuación de ajuste generada por los diferentes puntos), del valor de la intensidad del flujo I_{DF} , para dicha probabilidad, y con este valor se procede a clasificar la amenaza, a través de 3 niveles de amenaza. Con base a la propuesta del Servicio Geológico Colombiano, este índice permite clasificar la amenaza por avenida torrencial, tal que:

- Si en una zona determinada el valor de I_{DF} no alcanza los $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$, implica que hay baja probabilidad de que se genere un daño estructural, luego la amenaza se clasifica como baja.
- Si en una zona determinada el valor de I_{DF} es mayor o igual a $1 \text{ m}^3/\text{s}^2$ e inferior a $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, implica que hay una baja probabilidad de presentarse un daño estructural leve, luego la amenaza se clasifica como media.
- Si en una zona determinada el valor de I_{DF} es igual o mayor a $50 \text{ m}^3/\text{s}^2$, implica que existe una probabilidad de colapso significativa en dicho punto, luego se clasifica como amenaza alta.
-

Lo anterior puede resumirse tal que:

- | | |
|--------------------------|----------------------|
| - Nivel de amenaza alto | $50 \geq I_{DF}$ |
| - Nivel de amenaza medio | $1 \geq I_{DF} > 50$ |
| - Nivel de amenaza bajo | $0 \geq I_{DF} > 1$ |

El paso final corresponde a construir el mapa de amenaza, donde para cada una de las celdas se asigna el respectivo valor de la amenaza.

6.4.1.3. Zonificación empleando un valor del índice I_{DF}

Este método considera la clasificación de la amenaza, a partir de un umbral del índice de intensidad del flujo tal que, se construye la curva de amenaza y para un valor dado de I_{DF} se determina la respectiva probabilidad de excedencia (o el periodo de retorno) y se clasifica la amenaza. La guía del Servicio Geológico Colombiano – Pontificia Universidad Javeriana, proponen basarse en el estudio de Jakob et Al. (2012), para el cual consideran que un valor razonable para dividir umbrales de diseño es de $I_{DF} = 5 \text{ m}^3/\text{s}^2$.

En este caso, se procede a realizar la lectura de la probabilidad de excedencia, para el valor determinado de índice de intensidad del flujo, una vez se obtiene dicho valor se clasifica siguiendo los siguientes criterios:

- Si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o mayor al umbral definido es de menos de 30 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza alta.
- Si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o mayor al umbral definido está entre 30 y 100 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza media.
- Finalmente, si en un lugar determinado la recurrencia esperada para un valor igual o mayor al umbral definido es mayor o igual a 100 años, entonces ese sitio se categoriza como amenaza baja.

A continuación, se presenta lo anterior, de forma resumida, P es la probabilidad de excedencia y T la respectiva probabilidad de excedencia expresada en años.

- Amenaza Alta $0,430 \geq P > 0,033$ ($2,33 \text{ años} \leq T < 30 \text{ años}$)
- Amenaza Media $0,033 \geq P > 0,010$ ($30 \text{ años} \leq T < 100 \text{ años}$)
- Amenaza Baja $0,010 \geq P > 0,0033$ ($100 \text{ años} \leq T < 300 \text{ años}$)

6.4.1.4. Zonificación final de la amenaza por avenidas torrenciales

Una vez se determina la zonificación de la amenaza empleando los dos criterios descritos anteriormente, se determina el resultado final de la amenaza como la envolvente de los resultados, es decir que por cada pixel se extrae el valor más alto de la amenaza.

6.4.2. Resultados Intensidad de flujo (IDF)

A partir de los resultados de la modelación Flo-2D para escala 1:2000 se realiza el cálculo de la intensidad de flujo (I_{DF}) para cada uno de los periodos de retorno, en la Figura 41 se presentan los mapas correspondientes a cada periodo de retorno.

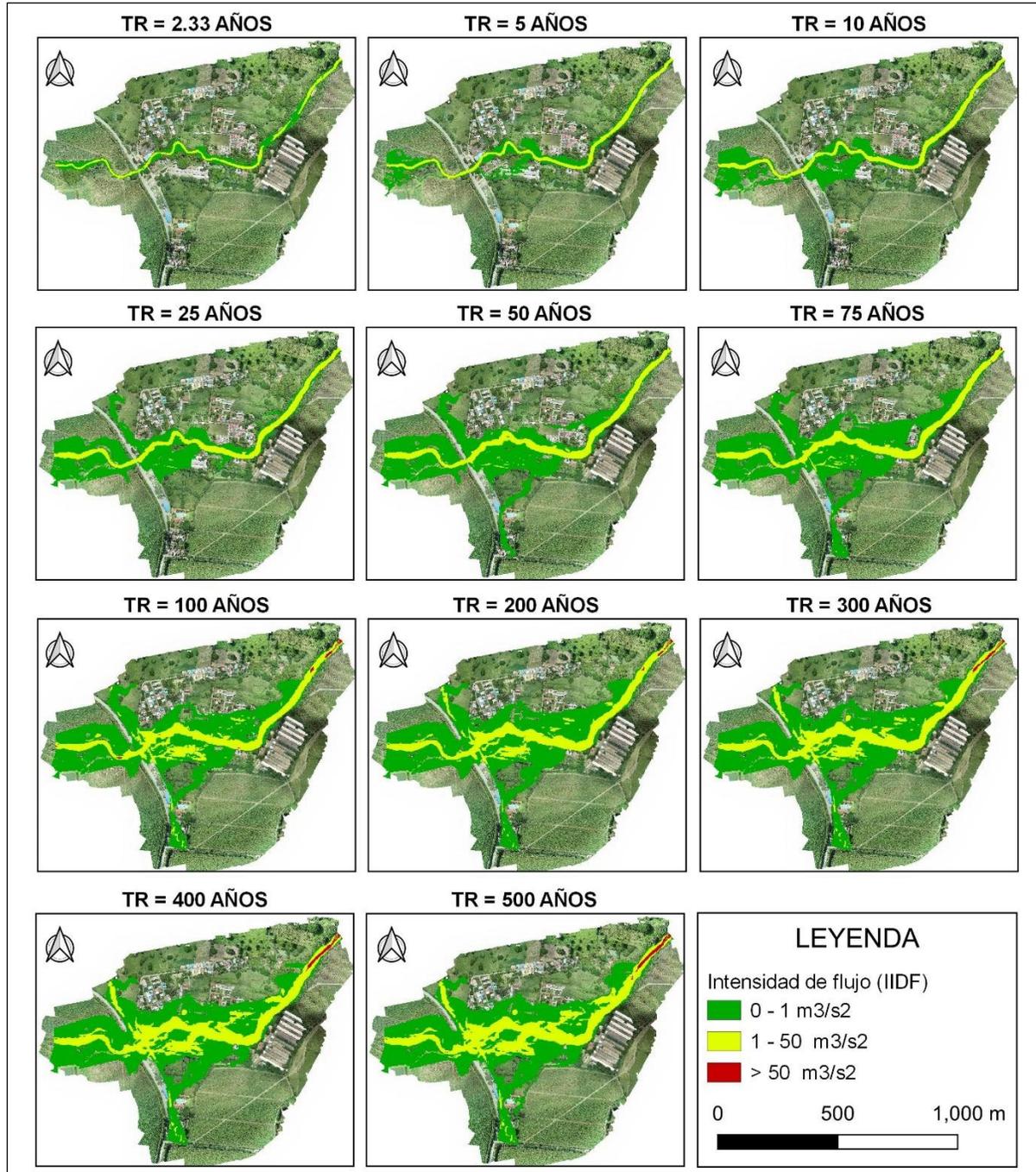


Figura 41. Resultados intensidad de flujo IDF para diferentes periodos de retorno
Fuente: Elaboración propia

El mapa de Intensidad de Flujo (IDF) para cada periodo de retorno, es un resultado que permite relacionar la magnitud del evento, considerando las variables de velocidad y profundidad. Para todos los periodos de retorno inferiores a 25 años, se observa que la intensidad de flujo no supera el umbral de 50 m²/s², considerándose este el valor límite inferior para el cual es probable un colapso estructural. Específicamente para 2.33 años de

periodo de retorno, no hay áreas por fuera del cauce, es decir que este se mantiene dentro del mismo, sin embargo, para periodos de retorno superiores se observan desbordamientos, a pesar de que, para todos los resultados inferiores a 75 años de periodo de retorno, no hay amenaza media por fuera del cauce. A partir de 100 años de periodo de retorno, se identifican zonas fuera del cauce con valores de intensidad de flujo que indican posibles afectaciones estructurales de las construcciones y vías.

Una vez determinado el valor de I_{DF} para cada celda y cada periodo de retorno, se cuenta con la información necesaria para la construcción de las curvas I_{DF} , a considerar que, para cada pixel en el espacio (o cada celda) se determina una curva de amenaza.

6.4.3. Resultados de Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales (AVT)

Finalmente, la amenaza final se determina como la envolvente de los resultados de los criterios anteriores; se extrae la amenaza máxima de cada celda y se representa este resultado obtenido en la Figura 42; donde se observa que la zona de amenaza alta predomina en el centro del cauce, y se observan algunas vías y construcciones en condición de amenaza media y baja por avenidas torrenciales. Los desbordamientos identificados en los resultados de la modelación se observan nuevamente en este mapa de zonificación de la amenaza.

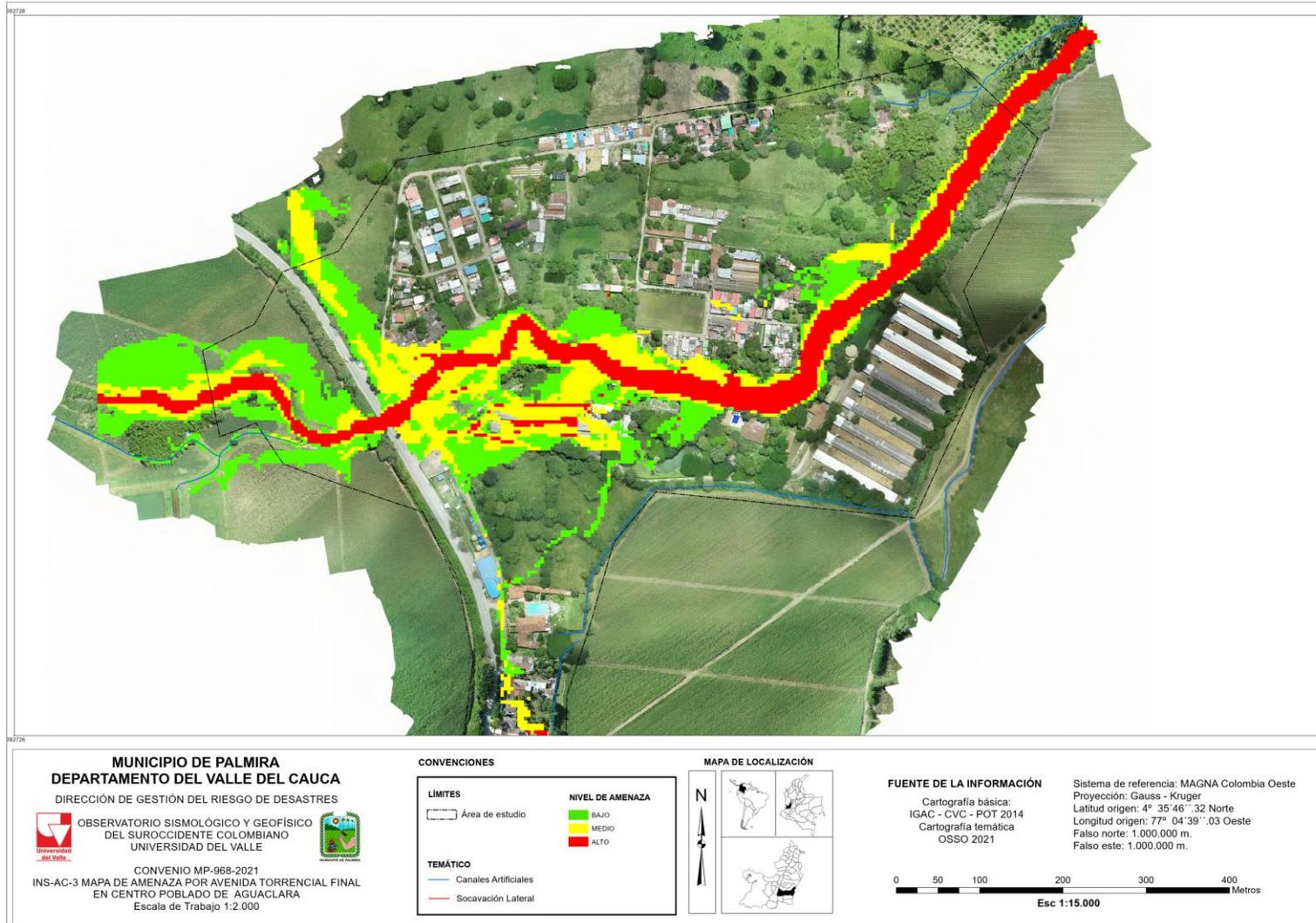


Figura 42. Zonificación de la amenaza final por avenidas torrenciales centro poblado de Aguaclara
 Fuente: Elaboración propia

7. CONCLUSIONES

- *Conclusiones metodológicas*

Se realizó una primera revisión de los resultados donde se observa que se tiene un coeficiente de concentración volumétrica que supera el límite base entre fluidos newtonianos y flujos hiperconcentrados; en ese orden de ideas, se clasifica el flujo como un flujo hiperconcentrado y se requirió el análisis reológico a través de un modelo hidráulico. El modelo empleado es el de programa FLO-2D para la elaboración de un modelo reológico para la simulación de avenidas torrenciales. En este modelo se ingresaron las variables de caudales líquidos, coeficientes de concentración volumétrica, rugosidad n de Manning y la configuración geométrica del modelo incluyendo las elevaciones topográficas. El programa resuelve las ecuaciones de Saint-Venant para la hidráulica y el modelo reológico cuadrático de O'Brien y Julien para la mezcla sólido-líquido. El modelo de FLO-2D presenta algunas limitaciones que fueron presentadas en el apartado 6.2.3.

El estudio se realizó siguiendo las recomendaciones de la Guía Metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales del Servicio Geológico Colombiano (SGC, 2021), por lo que se realizó las modelaciones para 11 periodos de retorno (2,33, 5, 10, 25, 50, 75, 100, 200, 300, 400 y 500 años). Para la zonificación a escala 1:2 000, los criterios para definir la zonificación son los que especifica la guía, que consideran 3 clases: baja, media y alta.

- *Conclusiones de los resultados de la amenaza de AVT*

El componente líquido que considera el estudio de avenidas torrenciales del presente estudio se toma del estudio hidrológico, en el marco del proyecto; así mismo los parámetros reológicos fueron conciliados con el equipo geotécnico y el componente sólido fue tomado del estudio geotécnico. Para el presente estudio de avenidas torrenciales se emplearon valores de rugosidad n de Manning determinados específicamente para este estudio a partir de un análisis de la cobertura con la ortofoto del centro poblado, estos mismos valores fueron los que se emplearon en el estudio de inundaciones.

Con base a los resultados del modelo, se identificó que en para periodos de retorno inferiores a 2.33 años, no se presentan especialmente desbordamientos, ni intensidades de flujo de grandes magnitudes fuera del cauce. Para periodos de retorno superiores, en especial para los mayores 10 años, se observa que la mancha de inundación es cada vez más amplia, con intensidades de flujo (y velocidades de flujo) con magnitudes superiores, que en, aunque en algunos sectores no afecta construcciones, en otros pueden favorecer los fenómenos de erosión como la socavación del lecho del río. Según la zonificación de la amenaza, algunas construcciones se encuentran cubiertas dentro de las áreas de

afectación con niveles de amenaza medio y alto, lo cual puede involucrar implicaciones estructurales significativas. En especial predomina una clase de amenaza media en las zonas fuera del cauce.

8. RECOMENDACIONES

A partir de los estudios desarrollados en el marco del análisis de las avenidas torrenciales, que llevó a generar los respectivos mapas de zonificación de la amenaza, donde se observa que la zona que mayor amenaza ha presentado es en el en el centro del cauce, y en las curvas, con algunos desbordamientos; se realizan algunas recomendaciones para mitigar los fenómenos de desbordamientos por avenidas torrenciales, que podrían considerarse:

- Reubicar las viviendas que se encuentra a menos de 35 m de la orilla del río Nima y construcción de diques respetando el área forestal protectora (AFP), lo que permite un área inundable mayor y controlar el desbordamiento. Esto involucra elevar los pasos vehiculares.
- Realizar monitoreo de las corrientes de agua, donde se identifiquen donde se puedan estar presentando posibles represamientos de sedimentos y material vegetal.
- Proyectar diques longitudinales a lo largo de aproximadamente 1.00 km, considerando 200 m aguas abajo de los puentes y 800 m aguas arriba, así mismo esto involucraría subir el gálibo de los puentes existentes.
- Promover programas educativos orientados a la conservación recuperación de la cuenca del río Aguaclara. También se recomienda que sea capacidad la comunidad para que puedan identificar las señales relacionadas con la posibilidad de presentarse eventos de avenidas torrenciales.
- Promover la implementación de usos del suelo apropiados en la cuenca, con el objetivo de reducir la erosión laminar y la desestabilización en taludes, aumentando la retención del agua; logrando así una disminución tanto de los volúmenes de agua como de los volúmenes de aporte de sólidos.
- Diseñar e implementar sistemas de monitoreo para la alerta temprana frente a avenidas torrenciales.

9. REFERENCIAS

- Aparicio Mijares, F. J. (1992). *Fundamentos de hidrología de superficie*. México D.F.: Editorial LIMUSA.
- Bertrand, M., Liébault, F., & Piégay, H. (2013). Debris-flow susceptibility of upland catchments. *Nat Hazards*. doi:10.1007/s11069-013-0575-4
- Brunner, G. (2016). *HEC-RAS: River Analysis System*. Washington DC: U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic.
- Burbank, D., & Anderson, R. (2001). *Tectonic Geomorphology*. Blackwell Science.
- Campos-Aranda, D. F. (2017). Definición de tres épocas de crecientes utilizando estadísticos direccionales. *Tecnología y Ciencias del Agua*, 155-165.
- Casanova, M. L. (2002). Topografía Plana. Universidad de Los Andes.
- Centro de Información de Recursos Naturales - CIREN. (2014). *Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional*. Santiago de Chile.
- Chero, W. E. (2015). *Aplicación de la nueva herramienta HEC-RAS 5.0 para cálculos bidimensionales del flujo de agua en ríos*. Barcelona.
- Chow, V. T. (2000). *Hidrología aplicada*. (M. E. R., Ed.) Bogotá: McGraw Hill.
- Chow, V. T. (2004). *Hidráulica de canales abiertos*. (M. E. R., Ed.) McGraw Hill.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca. (2011). *Acuerdo N° 052 de 2011 "Por medio del cual se subroga el Acuerdo 23 de septiembre 12 de 1979 por el cual se dicatan norma generales relativas a ubicación de diques riberaños de cauces de aguas de uso público"*. Santiago de Cali.
- Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca; Universidad del Valle. (2010). *Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión*. Cali: Universidad del Valle.
- Costa, J. (1984). Physical geomorphology of debris flows. En J. E. Fleischer, *Developments and Applications of Geomorphology* (págs. 168-317). Berlin: Germany.
- CVC, & Valle, U. d. (2010). *Proyecto Midas - Zonificación de amenazas y escenarios de riesgo por movimientos en masa, inundaciones y crecientes torrenciales, del área urbana y de expansión de los municipios de Buga, Riofrío, Dagua, el Cairo y la Unión*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- Franquet, B. j. (2010). Nivelacion de terrenos por regresión Tridimensional. Bernis.
- Ghosal, K., & Bhattacharya, S. (2020). A Review of RUSLE Model. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 689–707.
- Grupo técnico CORCUENCA - IDEAM. (2019). *Fórmula Pomca río La Luisa y otros Directos al Magdalena - Amenazas y Susceptibilidad*.
- Haan, T., & Barfield, B. (1994). *Design hidrology and sedimentology for small catch ments*. San Diego.
- IDEAM. (2017). *GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE MAPAS DE INUNDACIÓN*. Bogotá, Colombia.

- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá D.C, Colombia.
- Instituto Nacional de Vías. (2009). *Manual de drenaje para carreteras*. Bogotá, Colombia.
- Jamil A.A.Anachea, C. G.-S. (2014). Modeling of (R) USLE C-factor for pasture as a function of Normalized Difference Vegetation Index. *European International Journal of Science and Technology*, 214-221.
- Karssenberg, D., Schmitz, O., de Jong, K., & Bierkens, M. (2009). A software framework for construction of process-based stochastic spatio-temporal models and data assimilation. *Environmental Modelling & Software*, 489-502. doi:10.1016/j.envsoft.2009.10.004
- Lin, W.-T., Lin, C.-Y., & Chou, W.-C. (2002). Soil erosion prediction and sediment yield estimation: the Taiwan. *Soil and Tillage Research*.
- Lionel E, J., Kostaschuk, R., & MacDonald, G. (1987). Identification of debris flow hazard on alluvial fans. *Geological Society of America: Reviews in Engineering Geology*, VII.
- Meunier. (1991). *Elementos de hidráulica torrencial*. Grenoble: Francia.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. (2000). *Reglamento Técnico del Sector de Agua Potable y Saneamiento Básico - RAS*. Bogotá.
- Nobre, A., Cuartas, L., Honett, M., Rennó, C., Rodrigues, G., Silveira, A., & Waterloo, M. (2011). Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 13 - 29. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- OSSO. (2009). *Desinventar - Sistema de Inventario de Desastre: Guía Metodológica V8.1.9*. Cali. Obtenido de <https://www.desinventar.org/docs/DesInventar-GuiaMetodologica-2.pdf>
- Rivas, M., Ovalles de Cabezas, Y., Soto, A. C., Ramirez, G., Ripanti, F., & Gonzáles, J. L. (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 33-41.
- Rodriguez Díaz, A. (2009). *Hidráulica Experimental*. Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2021). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales*. Bogotá D.C.
- Universidad de Los Andes. (2002). En M. L. Casanova, *Topografía Plana*.
- Universidad del Valle; CVC; IGEI. (2019). *Modelación hidráulica para la evaluación de la amenaza por inundación y avenida torrencial de la quebrada Isabel Pérez, municipio de Santiago de Cali*. Santiago de Cali.
- US Army Corps of Engineers - Hydrologic Engineering Center. (2021). *HEC-RAS River Analysis System - User's Manual Versión 6.0*. California.
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: 2D Modeling User's Manual*. Davis, California.
- US Army Corps of Engineers. (2016). *HEC-RAS River Analysis System: Hydraulic Reference Manual Version 5.0*. Davis, California.
- Veósla, G. (2005). *Análisis sedimentológico y reología de materiales*.
- Wilford, D., Sakals, M., Innes, J., & Sidle, R. (2004). Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed. *Landslides*. doi:10.1007/s10346-003-0002-0

Wischmeier, W. a. (1978). *Predicting Rainfall Erosion Losses. A Guide to Conservation Planning. The USDA Agricultural Handbook No. 537.* Maryland.