

Elaboración de estudios básicos de amenaza por movimientos en masa, inundación y avenidas torrenciales, para la inclusión de la gestión del riesgo en la revisión del POT Distrital de Medellín, Antioquia



ANEXO 1.

METODOLOGIA

Información general del proyecto

Nombre:	Estudios Básicos Medellín
Objeto:	CONTRATO INTERADMINISTRATIVO DE MANDATO SIN REPRESENTACIÓN LEGAL PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIÓN Y AVENIDAS TORRENCIALES, PARA LA INCLUSIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA REVISIÓN DEL POT DEL DISTRITO ESPECIAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN DE MEDELLÍN
Vigencia:	28 de febrero de 2025 al 24 de octubre de 2025.
Alcance geográfico:	Distrito de Medellín

Tabla de contenido

1	INTRODUCCIÓN	6
2	MODELACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA....	7
2.1	BASE DE DATOS GEOTÉCNICA	10
2.2	DELIMITACIÓN DE UNIDADES DE LADERA	13
2.3	INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS	14
2.4	MÉTODOS ESTADÍSTICOS	14
2.4.1	Susceptibilidad	15
2.4.2	Detonante.....	19
2.4.3	Cálculo de la amenaza	20
2.5	MÉTODOS DE BASE FÍSICA.....	20
2.5.1	Modelo de infiltración	21
2.5.2	Modelo de análisis de estabilidad de taludes	22
2.5.3	Cálculo de la amenaza	23
2.6	ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA.....	26
2.7	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA.....	27
3	AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES	30
3.1	METODOLOGÍA TÉCNICA	30
3.1.1	Cartografía y escala de trabajo	30
3.1.2	Amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales	31
4	METODOLOGÍA PARA DELIMITACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO	95
5	BIBLIOGRAFÍA	98

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Clasificación de los métodos para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa	8
Ilustración 2. Generalidades de los métodos estadísticos y de base física	9
Ilustración 3. Esquema de la discretización espacial y el marco de modelación desarrollados para el Distrito de Medellín	10
Ilustración 4. Relación de deslizamientos L y factor condicionante w	16
Ilustración 5. Metodología para la zonificación de la susceptibilidad para el Distrito de Medellín.	17
Ilustración 6. Esquema de las componentes del modelo TRIGRS.....	21
Ilustración 7. Modelos de infiltración posibles implementados en TRIGRS	22
Ilustración 8. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla	25
<i>Ilustración 9. Esquemmatización del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder.</i>	<i>40</i>
<i>Ilustración 10. Hidrograma Unitario Adimensional del S.C.S.....</i>	<i>41</i>
<i>Ilustración 11. Cálculo del coeficiente de atenuación de almacenamiento R.....</i>	<i>45</i>
<i>Ilustración 12. Diagrama distribución temporal de la lluvia (Huff – 1967, Chow et al, 1994.).....</i>	<i>57</i>

Lista de Tablas

Tabla 1. Modelos ejecutados para el Distrito de Medellín	10
Tabla 2. Resumen de la información secundaria revisada, almacenada y procesada	11
Tabla 3. Zonas geológicas establecidas para las unidades geológicas del Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana	11
Tabla 4 Intervalos de probabilidad de falla anual para la determinación de los niveles de amenaza	23
Tabla 4. Parámetros utilizados en la modelación probabilista de propagación.....	26
Tabla 5. Parámetros utilizados en la modelación probabilista de propagación.....	27
Tabla 6. Número de Curva para los diferentes tipos de cobertura bajo condiciones de humedad AMC II.....	55
Tabla 7. Distribución en porcentaje de la lluvia con relación a la duración de la tormenta (%)... ..	57
Tabla 8. Coeficientes de escorrentía según Chow, 1994.....	58
Tabla 9. Relaciones para categorizar el índice morfométrico (IDEAM, 2013).	63

Tabla 10. Relaciones entre variables para el índice morfométrico (IDEAM, 2013).	64
Tabla 11. Clasificación del índice de variabilidad (IDEAM, 2013).	65
Tabla 12. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales - IVET (IDEAM, 2013).	66
Tabla 13. Valores para el cálculo de los coeficientes de rugosidad de Manning (Chow et al., 1994).	77
Tabla 14. Tabla de categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad.	86
Tabla 15. Tabla de decisión para la definición de la amenaza por avenida torrencial	86
<i>Tabla 16. Ejemplo codificación áreas con condición de amenaza (ACA) del Distrito de Medellín</i>	96
<i>Tabla 17. Ejemplo de codificación áreas con condición de riesgo (ACR) del Distrito de Medellín</i>	96

1 INTRODUCCIÓN

En el presente documento se encuentra la metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa, inundaciones y avenidas torrenciales en los estudios básicos de amenaza para el Distrito de Medellín, acorde con las metodologías y los criterios técnicos establecidos por el Decreto 1077 de 2015 del Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio.

La amenaza por movimientos en masa se estimará utilizando modelos estadísticos y de base física y a partir de la validación de los resultados desde el punto de vista estadístico y espacial, se escogerá el modelo que mejor represente esta amenaza para el territorio distrital.

Para inundaciones y avenidas torrenciales, se priorizará el estudio de un número de cuencas (60) donde por criterios morfométricos, registros de eventos e información del Plan de Ordenamiento Territorial - POT, se tiene reportada la ocurrencia de estos eventos. En estas cuencas se realizarán análisis hidrológicos y sobre la información topográfica obtenida de un sensor LiDAR (suministrado por el Distrito) se correrán los modelos hidráulicos.

Una vez se zonifica la amenaza, con la información catastral e información de sensores remotos, al igual que información sobre áreas a desarrollar, se realiza la delimitación de zonas con condición de riesgo y zonas con condición de amenaza para el Distrito de Medellín, respectivamente.

2 MODELACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

De acuerdo con el Decreto Nacional 1077 de 2015, para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa mediante estudios básicos, la escala de trabajo corresponde a 1:25.000 para suelo rural y 1:5.000 para suelo urbano, de expansión urbana y centros poblados. Para el caso de interés, correspondiente a Medellín, la modelación de la amenaza por movimientos en masa se realizó a una escala de 1:5.000 para todo el territorio distrital, empleando información base derivada de un modelo digital del terreno procesado a una resolución espacial de 1,0 m x 1,0 m de tamaño de píxel, el cual fue procesado y remuestreado a un tamaño de píxel de 5,0 m x 5,0 m. Esta resolución permitió desarrollar análisis detallados y homogéneos en el área de estudio, acordes con la escala establecida para este tipo de evaluación.

En un intento por estandarizar la terminología alrededor del riesgo y la amenaza por movimientos en masa¹, Corominas et al. (2023) definen la amenaza, en un sentido amplio, como una condición con el potencial de causar una consecuencia no deseada. Matemáticamente, la amenaza es la probabilidad de que un evento físico o condición peligrosa en particular ocurra en un área dentro de un periodo de tiempo.

La caracterización y descripción de la amenaza por movimientos en masa debe incluir su ubicación, clasificación, geometría, magnitud o intensidad, y se evalúa en términos de frecuencia de ocurrencia. La magnitud se suele expresar cuantitativamente como una media del tamaño del evento (volumen o área) y la intensidad (relacionada con el potencial destructivo del evento) con parámetros cuantitativos o cualitativos tales como velocidad máxima del evento, desplazamiento total, desplazamiento diferencial, profundidad, descarga pico por unidad de ancho o energía cinética por unidad de área (SGC, 2017).

¹Entendiéndose que “movimiento en masa” se refiere al término general *landslide*, cuya traducción literal es “deslizamiento”, palabra que se reserva en español para referirse específicamente a los movimientos en masa denominados *slide-type landslide*.



Ilustración 1. Clasificación de los métodos para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa

Fuente: Adaptado de Thiery et al. (2020)

Existen múltiples métodos para abordar el problema de la evaluación de la amenaza por movimientos en masa. Thiery et al. (2020) realizaron una revisión bibliográfica y desarrollaron una clasificación de por tipología, la cual se presenta de forma simplificada en la Ilustración 1. Independiente del método, todos se alimentan del inventario de deslizamientos, bien sea como una componente indispensable del método o como forma de calibración y/o validación. El presente estudio aborda dos de los grupos mencionado en la Ilustración 1: los métodos estadísticos y los de base física; sus generalidades discriminadas por insumos, etapa de procesamiento y productos o resultados, se resumen en la Ilustración 2 y se desarrollan en detalle en las siguientes secciones.

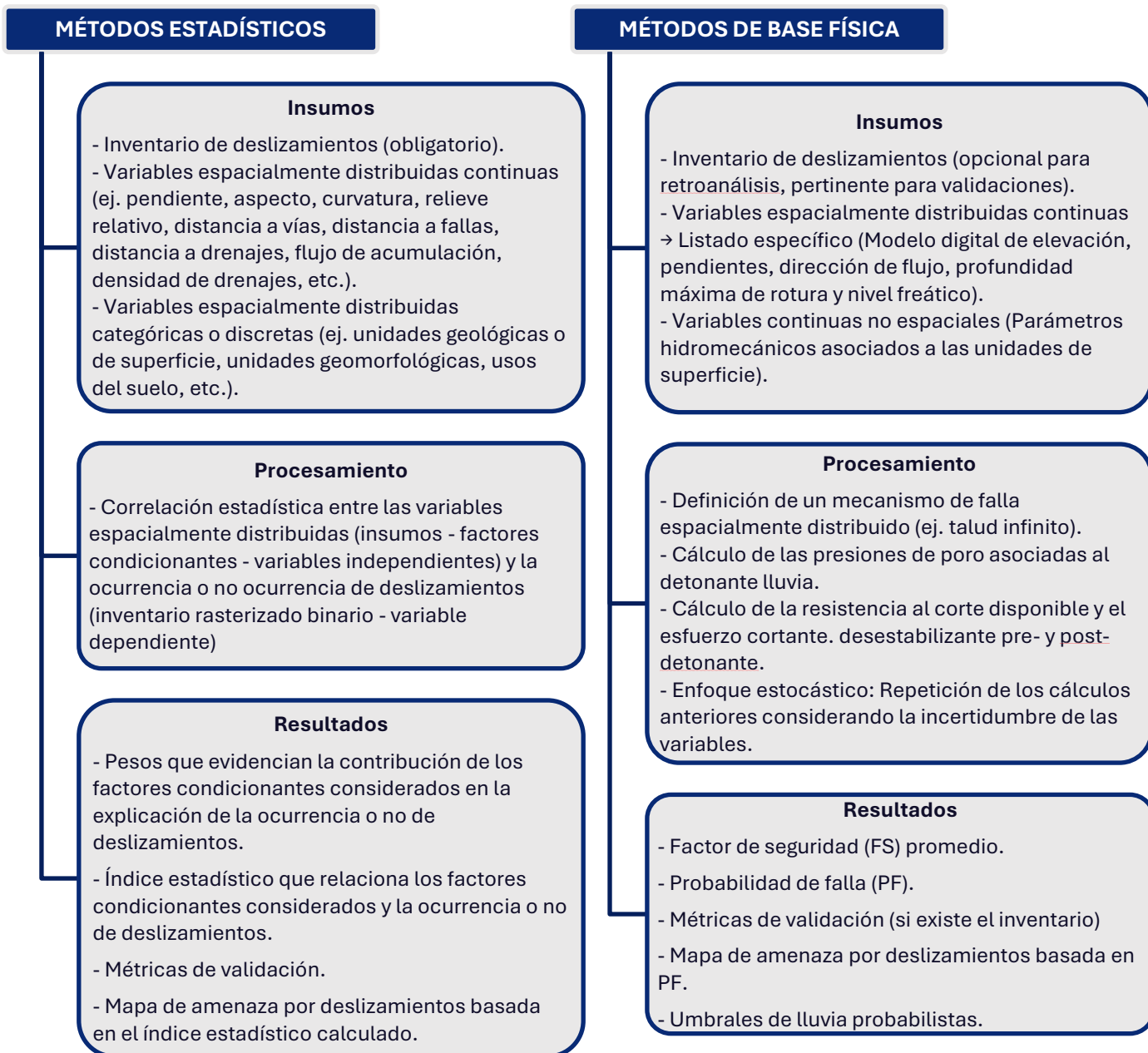


Ilustración 2. Generalidades de los métodos estadísticos y de base física

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Con el objetivo de evaluar el desempeño de múltiples métodos en los análisis para el Distrito de Medellín, se considerarán dos aproximaciones para la representación del terreno (píxeles y unidades de ladera) y múltiples modelos como se esquematiza en la Ilustración 3 y en la Tabla 1.

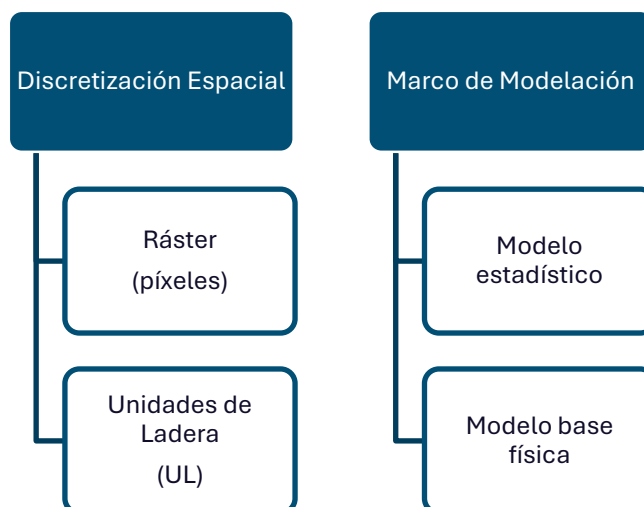


Ilustración 3. Esquema de la discretización espacial y el marco de modelación desarrollados para el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Tabla 1. Modelos ejecutados para el Distrito de Medellín

Tipo	Modelo	Discretización espacial
Estadístico	Peso de la evidencia	Raster
	Regresión logística	Raster
	Random Forest	Raster
	Valor de la información	Raster y Unidades de Ladera
Base física	Determinista	Unidades de Ladera
	Estocástico	

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

A continuación, se explica la base geotécnica tenida en cuenta para los análisis, la delimitación de las unidades de ladera y se desarrollan los modelos utilizados para el análisis de susceptibilidad y amenaza para cada tipo de método y modelo implementado.

2.1 BASE DE DATOS GEOTÉCNICA

Se implementó una base de datos relacional donde se almacenó la información proveniente de las distintas fuentes secundarias presentadas en el **Informe de Revisión de Información Secundaria**. La información consolidada se resume en la Tabla 2, donde además se detalla la cantidad de registros que cuentan con información de ensayos SPT y, de estos, el número de muestras que disponen de parámetros geomecánicos y pesos unitarios naturales obtenidos a partir de ensayos de laboratorio. Estos últimos resultan de especial relevancia dado que constituyen el insumo principal para los modelos de amenaza por movimientos en masa, especialmente los de base física.

Tabla 2. Resumen de la información secundaria revisada, almacenada y procesada

Proyecto	Año	Tipo (*)	Cantidad sondeos	Cantidad muestras	Cantidad ensayos SPT	Cohesión – Angulo Fricción $c'-\phi'$	Peso Unitario γ_n
Instrumentación y microzonificación sísmica del área urbana de Medellín	1999	EMZS	32	380	31	12	42
Microzonificación y evaluación del riesgo sísmico del Valle de Aburrá	2007	EMZS	50	344	36	37	80
Estudio red primaria sistema de distribución de agua de EPM	2011	EMZS	15	110	0	9	24
Estudios geológico-geotécnicos DAGRD	2006 2014	EGG	249	540	126	41	70
Estudios de detalle	2016 2022	ED	283	901	265	272	267

(*) EMZ: Estudios de microzonificación sísmica. EGG: Estudios geológico-geotécnicos.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Este proceso comprende la consolidación y vinculación de 629 registros de perforación derivados de campañas de exploración geotécnica asociadas a cada estudio, así como la incorporación de los resultados de los ensayos de laboratorio correspondientes, procesando un total de 2.275 muestras.

Tras el análisis estadístico exploratorio y con el propósito de optimizar los insumos geotécnicos para los modelos de amenaza, se agruparon las unidades geológicas del Valle de Aburrá en once (11) zonas geológico-geotécnicas, definidas a partir de su naturaleza o génesis geológica y sus características geomecánicas. La agrupación de las unidades geológico-geotécnicas se realizó como una estrategia de parametrización regional acorde con la escala y alcance de los estudios básicos de amenaza. Esta agrupación no supone que los materiales incluidos dentro de cada zona sean homogéneos en sentido estricto, ni desconoce la variabilidad geológica y geotécnica propia del Distrito de Medellín. Por el contrario, busca definir dominios con afinidad litológica, genética y geomecánica que permitan representar de manera coherente el comportamiento esperado de los materiales en los análisis de susceptibilidad y amenaza. Adicionalmente, la integración de unidades con características comparables permite contar con tamaños muestrales más amplios por zona, lo cual favorece una caracterización estadística más robusta de la variabilidad de los parámetros geomecánicos. En este sentido, la variabilidad residual al interior de cada dominio no se descarta, sino que se incorpora explícitamente mediante el análisis estadístico de los parámetros disponibles, incluyendo medidas de tendencia central, dispersión, coeficientes de variación y distribuciones probabilísticas empleadas en la modelación física estocástica.

La agrupación resultante se presenta a continuación en la Tabla 3.

Tabla 3. Zonas geológicas establecidas para las unidades geológicas del Distrito de Medellín y los municipios del Área Metropolitana

Código unidad	Nombre unidad	Zona geológico-geotécnica
JgR	Gabros de Romeral	1
JuR	Peridotitas de Romeral	

Código unidad	Nombre unidad	Zona geológico-geotécnica
KgSD	Gabro Stock de San Diego	
JKgmS	Gneis Milonítico de Sajonia	2
JKmbP	Metabasitas del Picacho	
Jml	Milonitas de La Iguaná	
TRgLC	Gneis de La Ceja	
TRgP	Gneis de Palmitas	
TRmPP	Migmatitas de Puente Peláez	
TReaB	Esquistos anfíbolíticos de Baldías	3
TReC	Esquistos de Cajamarca	
JKuM	Dunitas de Medellín	4
KcdA_n	Batolito Antioqueño	5
KcdA_s		
KcdE	Stock de Las Estancias	
KcdML	Stock de Media Luna	
KtO	Batolito Tonalita de Ovejas	
KvQG	Complejo Quebradagrande -Miembro volcánico	6
KvsQG	Complejo Quebradagrande - Miembro volcanosedimentario	
Qal	Depósitos aluviales	7
Qat	Depósitos aluviotorrenciales	
Qll	Depósitos antrópicos - Llenos antrópicos	8
NFI	Depósitos de vertiente - flujos de escombros y/o lodos	9
NFprel		
NQFII		
QFa		
QFIII		
QFIV		
Qfle		
Qd	Depósitos de vertiente – depósitos de deslizamiento	
TRaM	Anfibolitas de Medellín	10
KdA	Stock de Altavista	11

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

2.2 DELIMITACIÓN DE UNIDADES DE LADERA

Para la delimitación de unidades de ladera, se utilizó el módulo `r.slopeunits`, desarrollado por Alvioli et al. (2016), que permite la delineación automática de Unidades de Ladera (UL) a partir de un modelo digital de elevación (DEM). De forma opcional, es posible incluir una capa con zonas de baja pendiente, como planicies aluviales o llanuras de inundación, para excluirlas del análisis.

Los parámetros principales utilizados por el modelo son:

- `thresh` (t): Umbral de área de acumulación de flujo mínima para definir cauces.
- `areamin` (a): Área mínima permitida para una UL.
- `cvmin` (c): Varianza circular mínima de la orientación del terreno (*aspecto*), utilizada como medida de homogeneidad interna definida de cada unidad. Se define como:

$$c = 1 - \frac{|R|}{N_v}$$

donde N_v es el número de celdas dentro de la UL, y $|R|$ es la magnitud del vector R , correspondiente a la sumatoria de todos los vectores unitarios que describen la orientación de cada celda.

- `rf` (r): Factor de reducción de t aplicado de manera iterativa.
- `cleansize`: Área mínima aceptada tras la etapa de limpieza, que elimina unidades mal conformadas o demasiado pequeñas.

En términos generales, el algoritmo comienza generando cuencas de gran tamaño a partir del umbral t . Estas cuencas se subdividen en cuencas medias (*half-basins*) y, luego, se particionan iterativamente con base en los parámetros definidos. Las zonas planas, si se especifican, son excluidas del proceso. Finalmente, se aplican filtros de limpieza para eliminar unidades que no cumplan con los criterios establecidos.

Para el caso de estudio se empleó un modelo digital de elevación (DEM) con resolución espacial remuestreada a 5 m. Luego de evaluar múltiples combinaciones de parámetros, se seleccionaron los siguientes valores con el objetivo de balancear el número y el tamaño de las UL generadas:

- $t = 0.1 \text{ km}^2$
- $a_{\text{mín}} = 2000 \text{ m}^2$ (0.2 ha)
- $a_{\text{máx.}} = 3000 \text{ m}^2$ (0.3 ha)
- $c = 0.15$
- $r = 5$
- número máximo de iteraciones: 150 (garantizando la convergencia previa)
- `cleansize` = 500 m^2

Con esta configuración se generaron aproximadamente 124 000 UL, que posteriormente se redujeron a aproximadamente 100 000 UL mediante un proceso de homogeneización. Este consistió en integrar unidades vecinas cuando, en los píxeles contenidos en su interior, se cumplían simultáneamente las siguientes condiciones:

- a. Diferencia en la mediana de la pendiente $\leq 5^\circ$
- b. Diferencia en el aspecto $\leq 5^\circ$

En el caso del Distrito de Medellín, las UL generadas presentan una alta correspondencia con los rasgos geomorfológicos del terreno. Inicialmente, se delinearon UL muy finas (123.000 unidades) para capturar con precisión estos rasgos. No obstante, para optimizar la carga computacional de los modelos, las UL fueron posteriormente escaladas y homogeneizadas mediante criterios morfométricos (pendiente y aspecto), integrando unidades vecinas con características similares. De este modo, se redujo el número total de UL, garantizando que las unidades finales conservaran una representación fiel de la morfología del terreno.

2.3 INVENTARIO DE DESLIZAMIENTOS

Además del mapa de UL, se tuvo en cuenta un inventario de deslizamientos representado topológicamente por puntos. Este inventario proviene de un trabajo conjunto entre el DAGRD y el SIATA, complementado con datos adicionales suministrados por el Departamento Administrativo de Planeación (DAP) de Medellín. Dicho inventario se utilizó como insumo para validar la viabilidad de las UL y para actualizar el cálculo de la susceptibilidad y, posteriormente, la amenaza por movimientos en masa.

Se realizaron análisis preliminares de densidad de deslizamientos, definida como el número de eventos (n) por unidad de área de cada UL. Esta métrica se considera como indicador inicial de susceptibilidad y podrá ser contrastada posteriormente con los índices derivados de modelos probabilísticos. Los análisis se desarrollaron desacoplando los inventarios mencionados, permitiendo una evaluación diferenciada por fuente. Cabe destacar que el inventario DAGRD–SIATA presenta una mayor concentración de eventos en el área urbana del Distrito, mientras que el inventario del DAP muestra una mayor concentración en el área rural.

2.4 MÉTODOS ESTADÍSTICOS

Los movimientos en masa son procesos que ocurren en las denominadas zonas susceptibles; entendiéndose dicha susceptibilidad como la propensión del terreno a desarrollar este tipo de fenómenos que se definen a partir de las propiedades intrínsecas del terreno. Estas se pueden caracterizar mediante unidades de parámetro y unidades de terreno: (i) la litología, (ii) el grado de meteorización, (iii) la densidad de fracturamiento, (iv) las características morfométricas, (v) la morfogénesis, (vi) la densidad de drenaje, (vii) los tipos de suelos y sus propiedades hidro-físicas, y (viii) las coberturas de la tierra.

La susceptibilidad es la disposición propia de los terrenos para presentar movimientos en masa, la cual, a escalas intermedias, puede ser evaluada a partir de diferentes métodos estadísticos bivariados y multivariados, entre los que se encuentra el método estadístico Peso de la Evidencia (*Weight of Evidence*), método de radio de frecuencia (*Frequency Ratio Method*), método del índice

estadístico (*The statistical index method*), análisis discriminante y regresión logística, ampliamente utilizados en el análisis de la susceptibilidad.

A continuación, se describe la metodología utilizada para identificar los posibles escenarios de ocurrencia de deslizamientos la zona de estudio, para lo cual se desarrolla una cadena de procesos que involucra el análisis de susceptibilidad, la definición de los detonantes lluvia y sismo y la evaluación de la amenaza.

2.4.1 Susceptibilidad

Para la evaluación de la susceptibilidad, se emplearán en los modelos estadísticos variables morfométricas, físico – espaciales y categóricas (variables independientes o factores condicionantes), así como el inventario de deslizamientos (variable respuesta o independiente). A continuación, se explican brevemente estos métodos.

Peso de la evidencia (*Weight of Evidence*)

El peso de la evidencia analiza patrones de asociación entre los factores condicionantes (evidencias) y las áreas inestables mediante pesos. El peso de cada factor se calcula aplicando un enfoque bayesiano que considera la probabilidad incondicional y condicional de que ocurra un movimiento en masa (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2017).

En términos generales, dado que existe la probabilidad previa, conocida como incondicional, se calcula con los mismos tipos de movimientos en masa que ocurrieron en el pasado en un periodo determinado y puede ser modificada de modo que al agregar una nueva evidencia la probabilidad cambia y se genera entonces una probabilidad posterior llamada también probabilidad condicionada. La probabilidad posterior se obtiene de la sumatoria de los pesos de cada factor (SGC, Servicio Geológico Colombiano, 2017).

Los pesos son asignados basados en la relación de los factores condicionantes (como la geología, las pendientes, la rugosidad, el relieve relativo, la cercanía a vías, cercanía a drenajes y la cobertura terrestre) con la frecuencia de los movimientos en masa.

		w: Factor condicionante con potencialidad de deslizamientos		
		Presente	Ausente	
L: Deslizamientos	Presente	N_{pix1}	N_{pix2}	Área total deslizada
	Ausente	N_{pix3}	N_{pix4}	Área total no deslizada
		Área total con unidad w	Área total sin unidad w	Área total del mapa

Ilustración 4. Relación de deslizamientos **L** y factor condicionante **w**

Fuente: Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000 (SGC, 2017)

Donde:

- N_{pix1} : Representa la presencia del factor condicionante en el área deslizada, lo que indica una alta significancia de dicho factor en la ocurrencia del fenómeno.
- N_{pix2} : Representa la ocurrencia del deslizamiento en ausencia del factor condicionante, lo que sugiere que otros factores pudieron influir significativamente en el fenómeno.
- N_{pix3} : Representa la presencia del factor condicionante sin que ocurra el deslizamiento, lo que indica una significancia media del factor y sugiere que pudo haber contribuido en algún momento al fenómeno.
- N_{pix4} : Representa la ausencia tanto del factor condicionante como del deslizamiento, indicando una baja significancia en la ocurrencia del fenómeno.

Por ejemplo, para el método del peso de la evidencia, estos píxeles, a su vez, permiten expresar los pesos asignados a los factores condicionantes como se presenta en las siguientes ecuaciones

$$W_i^+ = \ln \left(\frac{\frac{N_{pix1}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix3}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

$$W_i^- = \ln \left(\frac{\frac{N_{pix2}}{N_{pix1} + N_{pix2}}}{\frac{N_{pix4}}{N_{pix3} + N_{pix4}}} \right) \quad \text{Ecuación 2}$$

$$W_f = W_i^+ - W_i^- \quad \text{Ecuación 3}$$

Los pesos asignados a cada clase pueden ser pesos positivos (W+) y negativos (W-). Los pesos positivos (W+) indican la presencia de la clase como parámetro que favorece los movimientos en masa y su magnitud indica su correlación. El peso negativo (W-) indica la ausencia de la clase. En caso de ser cero, indica que la clase analizada no es de interés para el fenómeno por movimiento en masa.

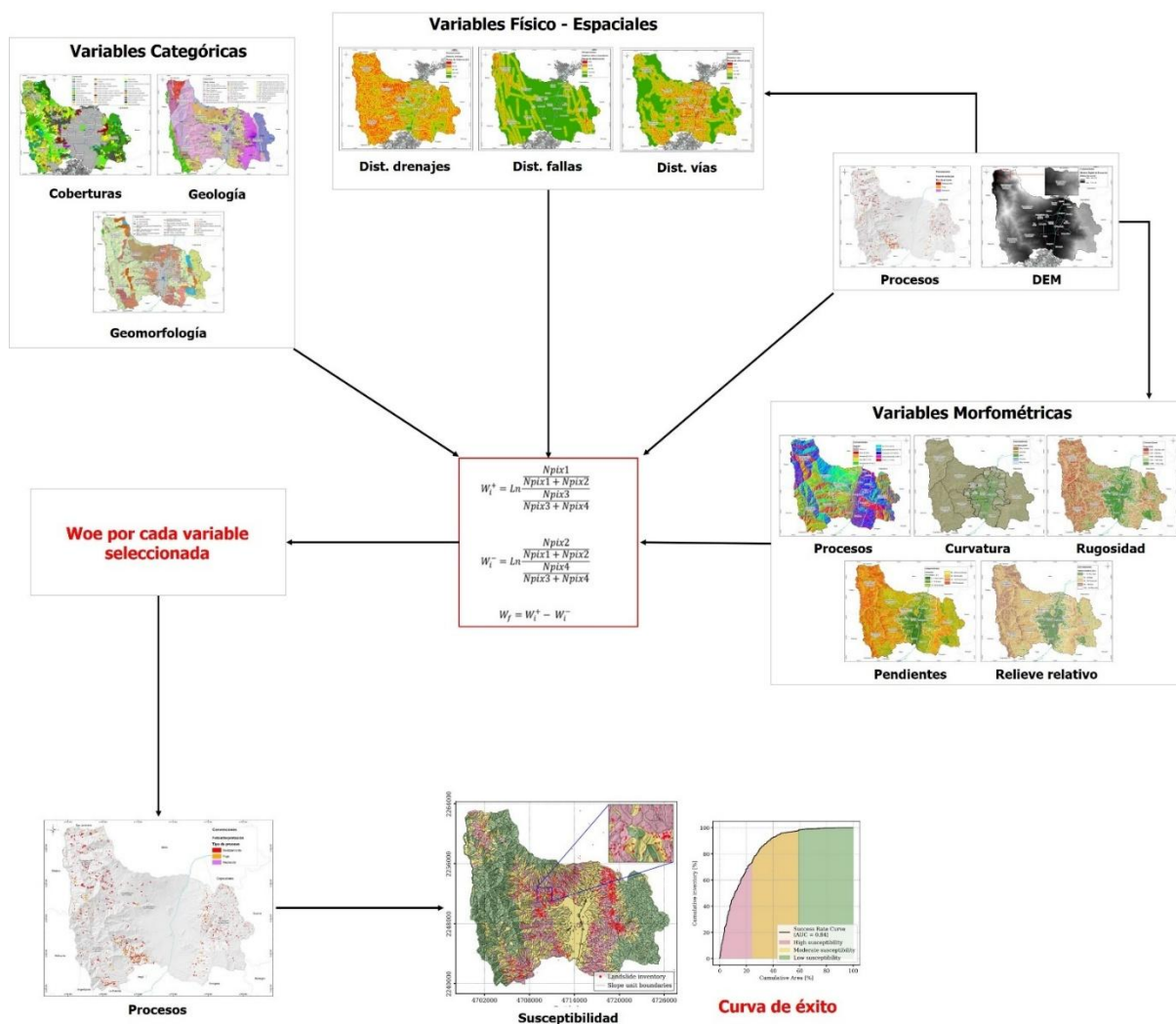


Ilustración 5. Metodología para la zonificación de la susceptibilidad para el Distrito de Medellín.

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Regresión logística

Este modelo, estima la relación entre una variable dependiente (la ocurrencia de movimientos en masa) de valores dicotómicos de 0 (no ocurrencia) y 1 (si ocurrencia), con un grupo de variables independientes, en este caso las variables condicionantes del terreno. La ventaja de este modelo es

que dichas variables predictoras no requieren tener distribución normal y pueden ser discretas o continuas (categóricas o no categóricas), o una combinación de ambas. La relación de dependencia entre la ocurrencia de movimientos en masa y las variables es expresada así:

$$P(y) = \frac{1}{1 + e^{-z}}, \quad \text{Ecuación 4}$$

donde

- $P(y)$: Probabilidad especial estimada de la ocurrencia de movimientos en masa (entre 0 y 1)
- z : combinación lineal de las variables independientes

$$z = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_nx_n \quad \text{Ecuación 5}$$

- b_0 : Intercepto
- b_i : coeficientes de la regresión
- x_i : variables independientes

Random forest

El Random Forest (RF) es una mejora del método CART (Breiman, 2001) que entrena muchos árboles de decisión sobre muestras aleatorias con reemplazo (bootstrap) y selecciona en cada nodo solo un subconjunto aleatorio de variables para buscar la mejor división.

En cada nodo de un árbol, en lugar de considerar todas las variables, se selecciona aleatoriamente un subconjunto de ellas y se elige la mejor división dentro de ese subconjunto. Los árboles se crecen hasta su tamaño máximo sin podarlos, y la predicción final se obtiene promediando los resultados de todos los árboles.

Para su aplicación se utiliza la biblioteca Sk-learn de Python 3.11.

Entre las ventajas para su uso está la robustez y capacidad predictiva, validación eficiente, poder discriminantes y entrega de probabilidades de clasificación de procesos según las variables predictoras.

Valor de la información (aplicado a unidades de ladera y a dominio rasterizado)

Para este análisis se implementará el enfoque propuesto por Ciurleo, Calvello, y Cascini (2016), basado en el método del valor de la información (*Information Value Method*, IV), una técnica estadística bivariada que evalúa la relación entre la ocurrencia de deslizamientos (variable dependiente) y cada factor condicionante (variables independientes) de forma individual.

Cada variable independiente se discretiza en n clases basadas en cuantiles. A cada clase se le asigna un peso que refleja su capacidad predictiva, calculado mediante la siguiente fórmula:

$$W_{ij} = \log \left(\frac{D_{ij}}{D^*} \right) = \log \left(\frac{F_{ij}/N_{ij}}{F_{\text{tot}}/N_{\text{tot}}} \right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde:

- W_{ij} : peso asignado a la clase j de la variable independiente V_i ;
- D_{ij} : densidad de deslizamientos dentro de la clase j de V_i ;
- D^* : densidad promedio de deslizamientos en el área de estudio;
- F_{ij} : número de deslizamientos que en la clase j de V_i ;
- N_{ij} : número de UL en la clase j de V_i ;
- F_{tot} : número total de deslizamientos en el área de estudio;
- N_{tot} : número total de UL en el área de estudio.

Pesos positivos indican una mayor asociación con la ocurrencia de deslizamientos, mientras que pesos negativos indican lo contrario. La suma de los pesos asociados a cada clase de las variables independientes para una UL determina su índice de susceptibilidad.

2.4.2 Detonante

Para la ventana de datos del presente estudio, no se incorpora el detonante sísmico ante la inexistencia de registros instrumentales de aceleraciones en el Distrito de Medellín que alcancen los umbrales comúnmente asociados a la activación de inestabilidades en laderas, por ejemplo, PGA del orden de 0.1–0.2 o mayor. Por otro lado, los inventarios existentes no registran históricamente movimientos en masa atribuibles a este detonante dentro del área de estudio. Finalmente, entre los pocos sismos regionales perceptibles y la ocurrencia de deslizamientos sísmicos locales nula, se tiene que los eventos de precipitación y la actividad antrópica explican en la práctica la totalidad de los eventos inventariados.

En consecuencia, y complementando con la imposibilidad de validar modelos numéricos físicos o estadísticos hipotéticos para el caso sísmico, se excluye de la evaluación de la amenaza sísmica de deslizamientos. No obstante, se establece un protocolo de revisión: si en el futuro se registran aceleraciones locales que superen los umbrales de activación o se documenten deslizamientos sísmicos en el Distrito de Medellín, se deberá incorporar esta componente en la próxima revisión de los Estudios Básicos.

De acuerdo con Alzate Llano (2015), los movimientos en masa están estrechamente relacionados con las precipitaciones, por lo que es fundamental analizar la respuesta del terreno ante eventos de lluvia con duraciones que pueden variar desde horas hasta ciclos multianuales de lluvia y sequía. En las laderas, la precipitación sigue tres posibles rutas: (i) es interceptada por la vegetación, (ii) se infiltra en el suelo o (iii) se almacena temporalmente en depresiones antes de infiltrarse.

La infiltración continúa incluso después del cese de la lluvia, lo que puede generar condiciones críticas debido al aumento de la humedad del suelo y del nivel freático. Esto provoca un incremento en la presión de poros, una reducción de los esfuerzos efectivos y, en consecuencia, una disminución de la resistencia al corte del suelo. Como resultado, pueden alcanzarse umbrales de inestabilidad que desencadenen movimientos en masa en una parte o en la totalidad de la ladera (Alzate Llano, 2015).

Bajo la hipótesis de que una mayor lluvia diaria máxima aumenta la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa, se seleccionan estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) ubicadas dentro del Distrito de Medellín. Esta selección tiene dos objetivos principales: (a) generar un campo de lluvia máxima en 24 horas para diferentes períodos de retorno (2, 33, 5, 10, 25, 50 y 100 años) a partir de un análisis estadístico de las series de precipitación, y (b) reducir la incertidumbre en los datos. Esta información servirá como insumo para evaluar la amenaza de movimientos en masa detonados por lluvia para distintos periodos de retorno.

Los campos de lluvia generados para diferentes periodos de retorno constituyen escenarios de análisis para evaluar la incidencia espacial del detonante lluvia en la zonificación de amenaza por movimientos en masa. En los modelos basados en datos, dichos campos pueden discretizarse mediante percentiles y combinarse con la susceptibilidad mediante matrices de decisión. Debido a que los campos de lluvia para distintos periodos de retorno conservan patrones espaciales similares, la discretización por percentiles tiende a generar clases relativas de intensidad espacial semejantes, por lo que la zonificación estadística no presenta una alta sensibilidad al T_r seleccionado. En este contexto, el $T_r = 25$ años se adopta como escenario de referencia para mantener coherencia con el modelo estocástico de base física.

2.4.3 Cálculo de la amenaza

El mapa de amenazas por movimientos en masa para la zona de estudio se obtendrá después de combinar o superponer el campo de lluvia máxima diaria sobre el resultado de la zonificación, de tal forma que zonas que representen mayores intensidades del detonante y zonas de más alta susceptibilidad sean por consecuencia aquellas con más alto nivel de amenaza por movimientos en masa, y viceversa.

2.5 MÉTODOS DE BASE FÍSICA

Para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa mediante métodos de base física en la zona de estudio se utilizará el modelo TRIGRS desarrollado por Baum, Savage y Godt (2002)– (2008) y posteriormente paralelizado por Alvioli y Baum (2016). Este es un modelo cuyo nombre es un acrónimo del inglés *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Model*, y que

se podría traducir y describir como un modelo para la infiltración transitoria de lluvia y la evaluación de la estabilidad de taludes en dominios regionales rasterizados. Una representación esquemática del modelo y sus parámetros se presenta en la Ilustración 6.

El modelo TRIGRS fue desarrollado en Fortran, por lo que puede ser compilado para ser ejecutado en múltiples sistemas operativos; adicionalmente, al estar paralelizado, resulta computacionalmente conveniente para analizar dominios espaciales de grandes dimensiones o de alta resolución. Es una herramienta computacional diseñada para modelar geotécnicamente la estabilidad de laderas sujetas a infiltración de lluvia, ya que permite analizar la evolución temporal de la presión de poros y el factor de seguridad en terrenos sometidos a eventos de precipitación de intensidad variable en el tiempo.

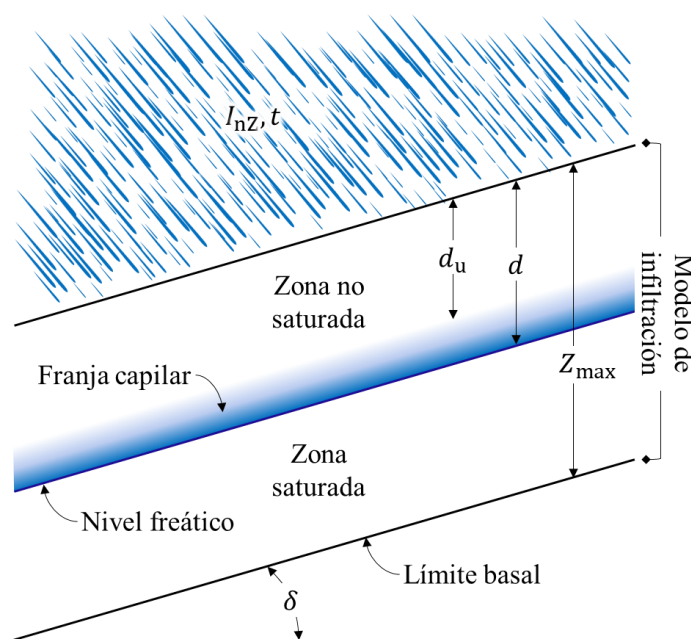


Ilustración 6. Esquema de las componentes del modelo TRIGRS

Fuente: Adaptado de Montoya-Araque y Montoya-Noguera (2023), y Baum, Savage y Godt (2008)

2.5.1 Modelo de infiltración

El modelo TRIGRS tiene implementado soluciones analíticas y/o numéricas para cuatro modelos de infiltración, donde cada uno se define en función de las condiciones iniciales. Por un lado, puede considerarse que la infiltración ocurre en un medio poroso saturado o no saturado, y, por otro lado, se establece que existe una frontera impermeable bien sea a una profundidad finita Z_{max} , o que dicha frontera se encuentra suficientemente profunda como para considerarla en el infinito. De esta manera, es posible modelar una de las cuatro condiciones esquematizadas en la Ilustración 7.

		Condición inicial de saturación	
		Saturado (S)	No saturado (U)
Profundidad de la frontera impermeable	Finita (F)	SF	UF
	Infinita (I)	SI	UI

Ilustración 7. Modelos de infiltración posibles implementados en TRIGRS

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Para los modelos no saturados se usa una solución analítica basada en la ecuación de Richards para flujo vertical. Este modelo considera que la infiltración es controlada por la retención de agua en la zona insaturada que se transmite hacia la zona saturada. Se usa la ecuación de Gardner (1958) para modelar la curva característica del suelo, la cual describe la relación entre el contenido volumétrico de agua y la succión del suelo expresada en términos de cabeza de presión negativa. Como resultado del proceso de infiltración, la presión de poros se propaga hacia profundidad, se forma una zona de acumulación de agua sobre el nivel freático, lo que genera un ascenso en el nivel freático, incrementando la presión de poros en la zona saturada tal que eventualmente puede inducir inestabilidad en el talud.

2.5.2 Modelo de análisis de estabilidad de taludes

Para evaluar la estabilidad de taludes, el modelo TRIGRS tiene implementada la solución analítica para el mecanismo de falla planar o modelo de talud infinito esquematizado en la Ilustración 6. Este es un modelo que compara la resistencia al corte disponible con las fuerzas desestabilizantes en dirección del plano de rotura para cuantificar el Factor de Seguridad (FS), cuya expresión se presenta a continuación.

$$FS(Z, t) = \frac{\tan \phi'}{\tan \delta} + \frac{c' - \psi(Z, t)\gamma_w \tan \phi'}{\gamma_s \sin \delta \cos \delta} \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

- ϕ' y c' son los parámetros de resistencia al corte del criterio de rotura Mohr–Coulomb (ángulo de fricción e intercepto de la envolvente),
- γ_s y γ_w son los pesos unitarios del suelo y del agua respectivamente,
- δ es el ángulo de inclinación del mecanismo,
- $\psi(Z, t)\gamma_w$ es la succión matricial, es decir, $\psi(Z, t)$ es la cabeza de presión a una profundidad Z y tiempo t dados.

El FS no es un valor constante, sino que, al igual que la cabeza de presión, varía en profundidad y en el tiempo en función a la dinámica del proceso de infiltración.

2.5.3 Cálculo de la amenaza

La evaluación de la amenaza por movimientos en masa usando el modelo de base física descrito en la sección precedente se basa en el flujo de trabajo metodológico que se presenta en la Ilustración 8. A continuación, se enlistan algunos detalles de la metodología propuesta.

- La tipología de movimientos en masa considerada está optimizada para a deslizamientos superficiales y a algunos más profundos con mecanismo traslacional, que se aproximan razonablemente bien al método de talud infinito implementado en TRIGRS. Esto es válido teniendo en cuenta que normalmente los eventos de precipitación de corta duración y alta intensidad tienden a detonar este tipo de movimientos en masa en zonas de ladera.
- La zonificación de la amenaza se definirá a partir de la Probabilidad de Falla (PF) espacial, considerando un número de categorías comparable a las del método estadístico. Los valores de PF que limitan las diferentes categorías se evaluarán con base en el rango de valores de PF calculados, su distribución y el desempeño del modelo (área bajo la curva de éxito).
- Aunque la aproximación adoptada no depende rigurosamente del inventario de deslizamientos, estos se usaron para proponer los límites de la zonificación mediante la curva de éxito. En este caso se adoptó como umbral para la zona de susceptibilidad alta a media el índice que hiciera que se abarcara un 50% de deslizamientos en la zona de amenaza alta; para el umbral de susceptibilidad media a baja se tomó el índice que hiciera que se abarcara un 80% de los deslizamientos en las zonas de amenaza alta y media conjuntamente. Estos umbrales corresponden respectivamente a 2.4×10^{-3} y 4.4×10^{-3} de probabilidad anual de falla como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4 Intervalos de probabilidad de falla anual para la determinación de los niveles de amenaza

Categoría de amenaza	Proporción de deslizamientos del inventario (Umbrales en la curva de éxito)	Intervalos de probabilidad de falla	Intervalos de probabilidad de falla anual
Baja	< 20%	< 0.06	$< 2.4 \times 10^{-3}$
Media	20 - 50%	0.06 - 0.11	$2.4 \times 10^{-3} - < 4.4 \times 10^{-3}$
Alta	> 50%	> 0.11	$> 4.4 \times 10^{-3}$

Fuente: Universidad EAFIT, 2026.

- El factor detonante lluvia evaluado se considera espacialmente variable. La intensidad se estima a partir del valor acumulado del campo de lluvia impuesto y de la duración de este. El enfoque probabilístico es robusto en la dimensión espacial, no obstante, la probabilidad temporal está condicionada al periodo de retorno seleccionado.
- La PF espacial se determinar mediante el método de Montecarlo, el cual consiste en generar n realizaciones de las variables aleatorias consideradas, en este caso los parámetros de resistencia teniendo en cuenta la incertidumbre de estos, y calculando el FS en cada

realización, tal que la PF se determine como la proporción de realizaciones con $FS < 1.0$ respecto a n . Los demás parámetros se consideran deterministas, no obstante, la metodología se podría replicar considerando más variables aleatorias.

- La distribución de las pendientes se calcula a partir del modelo de elevación digital del terreno.
- La distribución espacial de $Z_{\max}$ se determinará mediante retroanálisis como una función dependiente de la inclinación del terreno a partir de datos del inventario de deslizamientos.

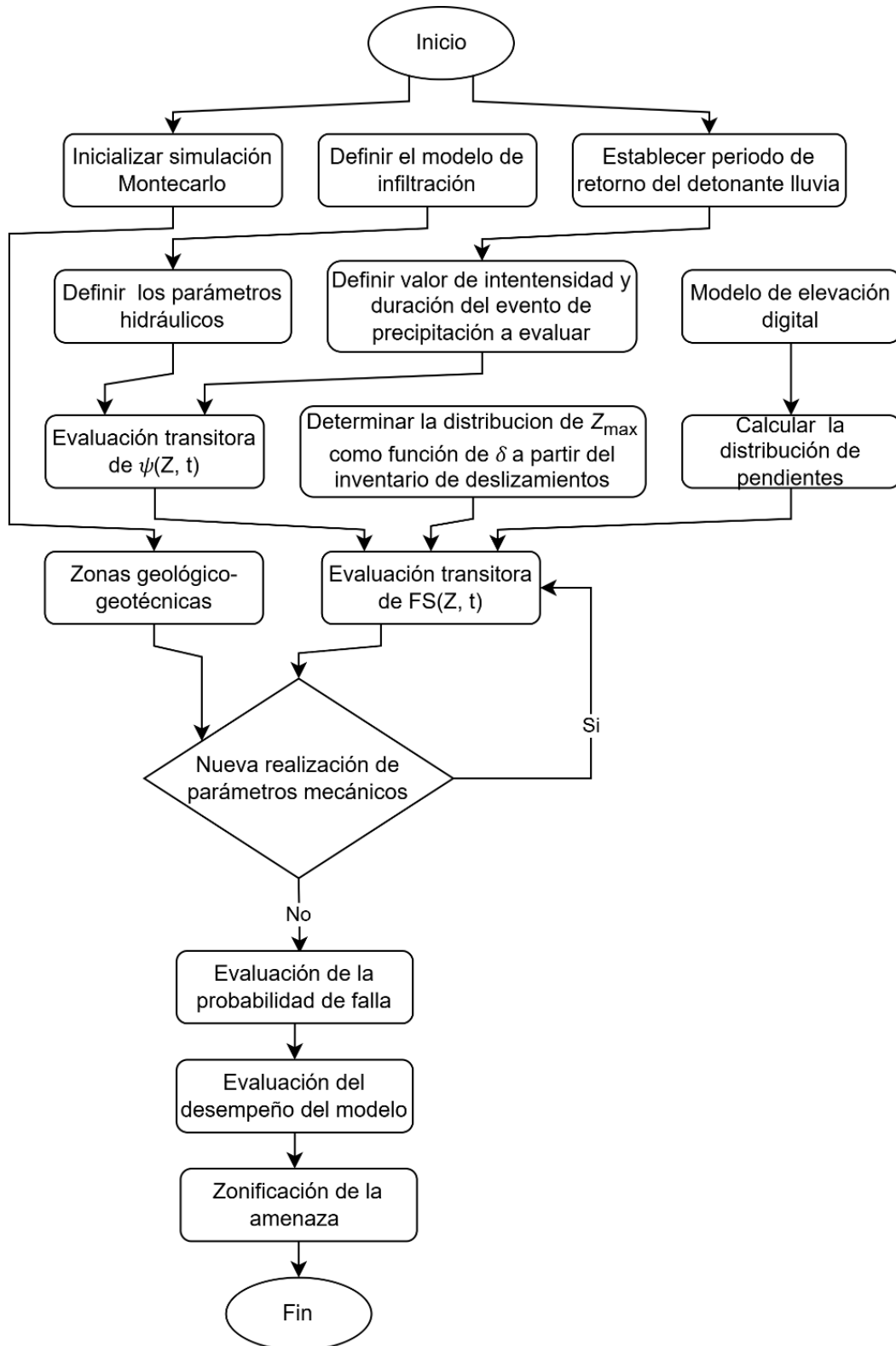


Ilustración 8. Metodología para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa a partir de la probabilidad espacial de falla

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

2.6 ANÁLISIS DE LA PROPAGACIÓN DE MOVIMIENTOS EN MASA

La modelación de propagación de deslizamientos (*runout*) se realizará mediante la implementación del paquete FlowPy (D’Amboise et al. 2022), una herramienta de código abierto desarrollada en Python para la simulación de la extensión e intensidad de masas inestables. La metodología se basará en un enfoque empírico sustentado en el concepto de ángulo de propagación (*runout angle*) y en el enrutamiento de trayectorias sobre superficies topográficas tridimensionales.

Con el fin de incorporar la incertidumbre asociada a la propagación de los deslizamientos, se realizará una evaluación probabilista mediante la generación de 300 realizaciones estocásticas. Para ello, se efectuarán muestreos aleatorios de los parámetros de control del modelo correspondientes al ángulo de propagación (α) y al exponente de concentración de rutas (*exp*). Las muestras serán obtenidas a partir de distribuciones uniformes definidas dentro de rangos representativos, establecidos entre 15° y 35° para α y entre 1,0 y 10,0 para *exp*. Posteriormente, se elaborarán histogramas de frecuencia con el propósito de verificar la distribución y representatividad estadística de las muestras generadas. En la Tabla 5 se presentan los parámetros considerados y sus respectivos rangos de variación (Tabla 5).

Tabla 5. Parámetros utilizados en la modelación probabilista de propagación

Parámetro	Descripción	Rango de evaluación	Distribución
α	Ángulo de propagación	15° – 35°	Uniforme
<i>exp</i>	Exponente de concentración de rutas	1,0 – 10,0	Uniforme

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

En cada realización se seleccionará aleatoriamente un subconjunto de 1750 unidades de ladera clasificadas previamente como amenaza alta, correspondientes aproximadamente al 5 % del total de unidades identificadas. Los centroides de dichas unidades serán empleados como puntos fuente para la simulación de propagación de deslizamientos, permitiendo incorporar variabilidad espacial en las condiciones iniciales del modelo.

Posteriormente, el modelo será ejecutado para cada una de las 300 combinaciones de parámetros y puntos fuente definidos, obteniendo mapas individuales de extensión de propagación simulada. Los resultados parciales generados en cada simulación serán integrados posteriormente para calcular el índice de Probabilidad de Exposición a Propagación (PEP), definido como la relación entre el número de veces que una celda resulte afectada y el número total de realizaciones efectuadas. Este índice permitirá representar la probabilidad relativa de que una determinada zona sea alcanzada por la propagación de movimientos en masa.

Con base en los valores obtenidos del índice PEP, se evaluarán cuatro escenarios de propagación correspondientes a $PEP > 0 \%$, $PEP > 10 \%$, $PEP > 25 \%$ y $PEP > 50 \%$. El escenario $PEP > 0 \%$ corresponderá a la condición más conservadora, al incluir todas las celdas afectadas al menos una vez durante las simulaciones, mientras que los escenarios $PEP > 25 \%$ y $PEP > 50 \%$ representarán

trayectorias con mayor persistencia espacial dentro del conjunto de realizaciones probabilistas (Tabla 6).

Tabla 6. Parámetros utilizados en la modelación probabilista de propagación

Escenario	Condición evaluada	Interpretación
PEP > 0 %	Celdas afectadas al menos una vez	Escenario más conservador
PEP > 10 %	Persistencia moderada	Escenario de referencia
PEP > 25 %	Persistencia alta	Escenario restrictivo
PEP > 50 %	Persistencia muy alta	Máxima recurrencia espacial

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Para cada escenario se realizará la comparación entre las áreas de propagación obtenidas y las zonas de amenaza alta definidas previamente mediante el modelo de base física, con el fin de identificar la extensión potencial de las áreas susceptibles por efecto de la propagación. Posteriormente, se integrarán los resultados de propagación con la zonificación inicial de amenaza para generar escenarios ajustados de amenaza por movimientos en masa.

Finalmente, se adoptará el escenario PEP > 10 % como escenario de referencia para la zonificación final con propagación, debido a que representa una condición intermedia entre la amplitud espacial del escenario más conservador y la restricción de los escenarios de mayor recurrencia. Este escenario permitirá complementar la zonificación obtenida previamente mediante el modelo de base física, incorporando áreas con recurrencia suficiente dentro de las simulaciones probabilistas de propagación. Asimismo, se presentará la distribución de áreas correspondientes a las categorías de amenaza alta, media y baja para cada escenario evaluado, junto con la zonificación final de amenaza por movimientos en masa con incorporación de propagación.

2.7 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA

La zonificación final de amenaza por movimientos en masa se realizará mediante la integración de los resultados obtenidos a partir del modelo de base física estocástico y de la modelación probabilista de propagación (runout). Posteriormente, esta información será complementada con los estudios de detalle protocolizados suministrados por el Departamento Administrativo de Planeación y con los inventarios de procesos morfodinámicos provenientes del DAGRD, el SIATA y el DAP, además de los procesos identificados mediante fotointerpretación multitemporal. Los inventarios de procesos morfodinámicos harán parte integral de los análisis numéricos de zonificación y serán utilizados tanto en la calibración como en la validación espacial de los resultados. No obstante, considerando la escala regional del estudio, la incertidumbre asociada a algunos registros y la naturaleza estadística y estocástica de los modelos empleados, algunos procesos activos o significativos podrán no quedar clasificados inicialmente dentro de zonas de amenaza alta (Ilustración 9).

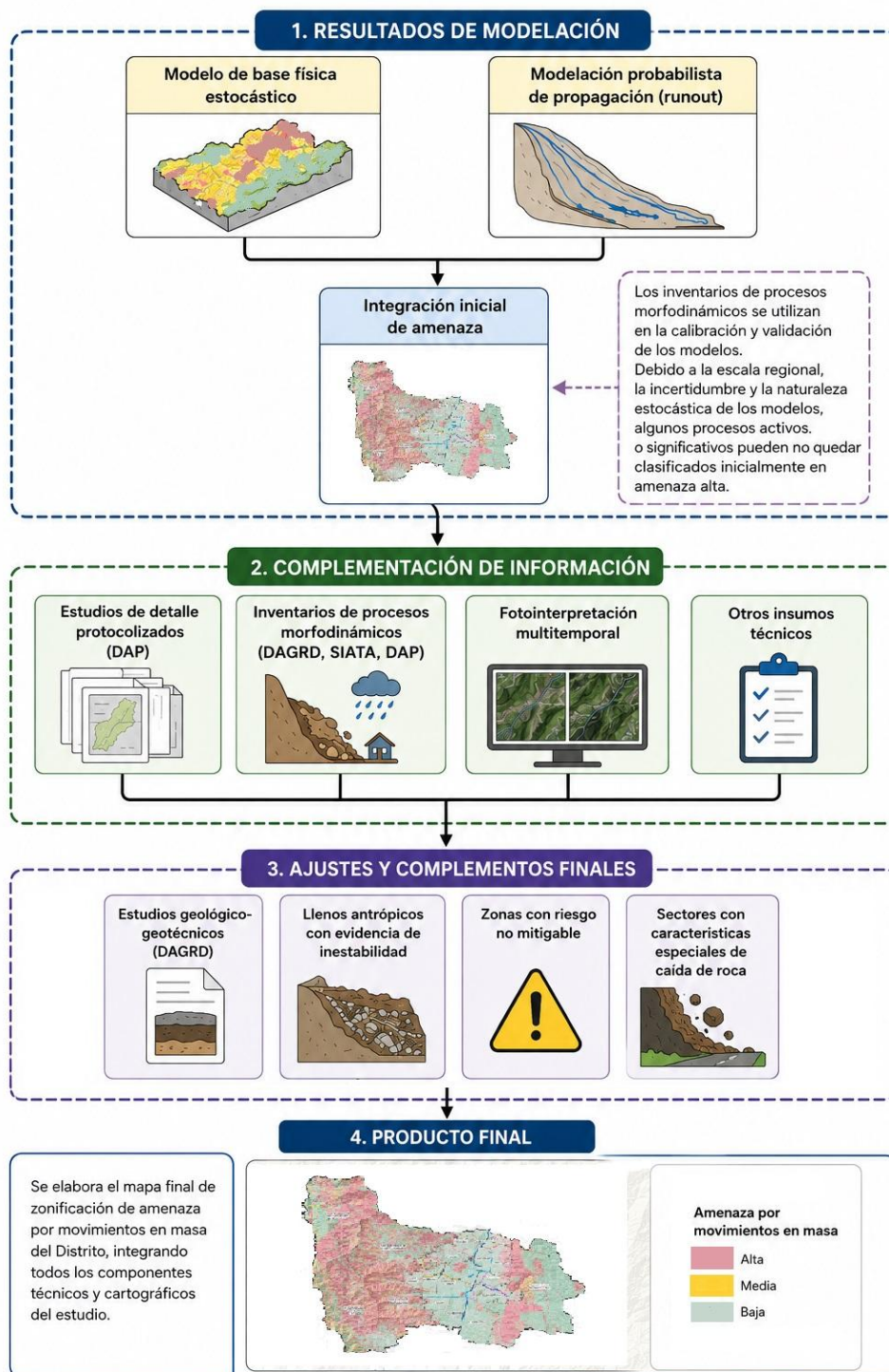


Ilustración 9. Esquema de la zonificación de la amenaza por movimientos en masa en el Distrito de Medellín

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

Por esta razón, la zonificación final será ajustada mediante la incorporación explícita de procesos morfodinámicos activos, estudios geológico-geotécnicos del DAGRD, llenos antrópicos con evidencia de inestabilidad, zonas declaradas con riesgo no mitigable y sectores con características

especiales de caída de roca, con el fin de mejorar la representación espacial de la amenaza y garantizar la coherencia técnica del producto final. Por lo tanto, se elaborará el mapa final de zonificación de amenaza por movimientos en masa del Distrito, integrando todos los componentes técnicos y cartográficos desarrollados durante el estudio.

3 AMENAZA POR INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES

Este documento presenta la metodología empleada para la delimitación y zonificación de las amenazas socionaturales (inundación y avenidas torrenciales) en escala 1:5.000 para el suelo rural y 1:2.000 para las zonas urbanas y centros poblados del distrito de Medellín, departamento de Antioquia, a la luz de los requerimientos por la legislación vigente correspondiente al correspondiente al Decreto 1807 de 2014, compilado en el Decreto 1077 de 2015.

El Decreto 1077 de 2015 indica que los municipios deben analizar la amenaza por avenidas torrenciales e inundaciones en el suelo urbano y en el suelo rural; de igual manera el lineamiento nacional indica las escalas de trabajo y las metodologías generales recomendadas para desarrollar cada uno de los análisis. Estos resultados permitirán la incorporación de la gestión del riesgo en los diferentes instrumentos de planificación municipal.

3.1 METODOLOGÍA TÉCNICA

En este capítulo, se presenta la metodología para la zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales como elemento de planificación dentro del componente de la Gestión del Riesgo del municipio de Medellín, departamento de Antioquia.

Se entiende por amenaza al peligro latente de que un evento físico, sea de origen natural, causado o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida 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 (Ley 1523 de 2012). Para este trabajo, se especifica que los fenómenos a analizar corresponden a las amenazas de tipo natural asociadas principalmente a inundaciones y avenidas torrenciales.

3.1.1 Cartografía y escala de trabajo

De acuerdo con el decreto nacional 1077 de 2015, para la evaluación de la amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales mediante el desarrollo de estudios básicos, la escala de trabajo es 1:25.000 para suelo rural y 1:5.000 para suelo urbano, de expansión urbana y centros poblados. Para el caso de interés, y correspondiente al Distrito de Medellín, departamento de Antioquia, la amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el suelo rural, urbano y centros poblados, se realizará a una escala de 1:2.000, teniendo en cuenta que el ente territorial cuenta con un levantamiento LIDAR (“Light Detection and Ranging”) el cual permitió la construcción de un modelo digital del terreno de 1,0 m x 1,0 m de tamaño de pixel, la cual fue procesada y remuestreada a un tamaño de pixel de 2,0

m x 2,0 m información base que permite que el análisis de la amenaza se realice a una mayor escala que la definida para el tipo de estudios dentro del decreto nacional 1077 de 2015.

3.1.2 Amenaza por inundaciones y avenidas torrenciales

Según (IDEAM, s.f.), las inundaciones son fenómenos hidrológicos recurrentes potencialmente destructivos, que hacen parte de la dinámica de evolución de una corriente. Se producen por lluvias persistentes y generalizadas que causan un aumento progresivo del nivel de las aguas contenidas dentro de un cauce superando la altura de las orillas naturales o artificiales, ocasionando un desbordamiento y dispersión de las aguas sobre las llanuras de inundación y zonas aledañas a los cursos de agua normalmente no sumergidas.

En la clasificación más sencilla se pueden identificar dos tipos: Inundaciones lentas, que son las que ocurren en las zonas planas de los ríos y con valles aluviales extensos, donde los incrementos de nivel diario son de apenas del orden de centímetros, se reportan afectaciones de grandes extensiones, pero usualmente pocas pérdidas de vidas humanas. Así mismo, el tiempo de afectación puede fácilmente llegar a ser del orden de meses.

El otro tipo de inundación son las llamadas crecientes súbitas en las que, aunque las áreas de afectación son menores, el poder destructivo es potencialmente superior y cobra el mayor número de vidas cuando se presentan. Responden rápidamente a la ocurrencia de fuertes precipitaciones en las partes altas de las cuencas, los incrementos de nivel son del orden de metros en pocas horas, y el tiempo de permanencia de estas inundaciones en las zonas afectadas son igualmente de horas o pocos días (IDEAM, s.f.) Este fenómeno es diferente a las avenidas torrenciales, puesto que en la inundación súbita hay un predominio de agua respecto a los sedimentos.

Por otra parte, las avenidas torrenciales son descritas como un flujo rápido que transita por cauces permanentes o intermitentes con pendientes longitudinales altas, que pueden ser generadas 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 baja pendiente se genera el depósito del material a lo largo de su trayectoria (SGC, 2021)

Así mismo, las avenidas torrenciales se caracterizan por una falla progresiva y rápida, donde el flujo desciende formando una especie de “ríos de roca y suelo”. Estos flujos comúnmente se relacionan con lluvias ocasionales de índices pluviométricos excepcionales muy altos, deshielo de nevados o movimientos sísmicos en zonas de alta montaña y la ausencia de vegetación, aunque es un factor influyente, no es un prerrequisito para que ocurran. Generalmente los flujos torrenciales corren a lo largo de cañones estrechos y cuando encuentran un área más amplia tratan de detenerse, formando abanicos de depositación, los cuales pueden sepultar áreas relativamente extensas (Suárez, 2001).

El término avenida torrencial puede considerarse como un término general que agrupa diferentes procesos de tipo gravitacional e hidrológico, que se dan en cuencas de montañas. Dentro de la

propuesta de clasificación de las avenidas torrenciales elaborada por la Universidad Nacional de Colombia y (DAGRAN, 2023) se consideran las características morfológicas de las cuencas y la disponibilidad de sedimentos, información que permite definir el tipo de evento que puede ocurrir en las cuencas y la cuales se describen a continuación:

Tipo Inundación de escombros: “Corresponden a flujos torrenciales hiperconcentrados de dos fases. Las inundaciones de escombros inician como una inundación súbita, la cual aumenta su capacidad erosiva y de arrastre a lo largo del cauce y genera el aumento del volumen y concentración de sedimentos, pero estos son insuficientes para cambiar significativamente las propiedades del fluido, el cual aunque no cuenta con la energía necesaria para cargar grandes bloques cauce abajo, puede arrastrarlos a altas velocidades con gran capacidad destructiva, que en muchas ocasiones se depositan por fuera del cauce generando daños considerables.

En algunas ocasiones el aporte de sedimentos se puede dar por la ocurrencia de movimientos en masa, pero estos se transportan a lo largo de cuencas de valles amplios y de pendientes moderadas, donde el aporte de agua es muy grande y los sedimentos no alcanzan a cambiar sus propiedades, marcando una diferencia entre este tipo de cuencas y las susceptibles a flujos torrenciales, tipo flujos de escombros canalizados. Son susceptibles a este tipo de eventos cuencas con características como valles anchos y vertientes amplias, y una disponibilidad de sedimentos alta” (DAGRAN, 2023).

Tipo Flujo de escombros canalizados: “Son flujos torrenciales de una fase originados por flujos de escombros que se presentan sobre las laderas y que alcanzan rápidamente drenajes de orden 1 o 2, y continúan su desplazamiento. Cuando un flujo de escombros canalizado Este fenómeno cuando se presentan en forma de enjambre y se combina con inundaciones súbitas puede alcanzar la capacidad de propagarse por drenajes de orden mayor y alcanzar grandes distancias, sin embargo, de acuerdo con la proporción de agua y sedimentos, comúnmente se transforman en flujos torrenciales tipo inundación de escombros. Se presentan cuando los eventos intensos de lluvias sobrepasan umbrales críticos, desencadenando enjambres de movimientos en masa, especialmente sobre laderas conformadas por suelos de textura arenosa y alta permeabilidad. Aunque la lluvia es el principal detonante de los movimientos en masa asociados a este tipo de avenidas torrenciales, su ocurrencia puede estar también relacionada con un sismo durante o antes de la avenida súbita” (DAGRAN, 2023).

Al igual que para las inundaciones, el Decreto 1077 de 2015 indica que para el análisis de amenaza por avenida torrencial deben emplearse métodos estadísticos, determinísticos o probabilísticos. Los análisis para estas amenazas parten de los estudios hidrológicos e hidráulicos, sin embargo, para las avenidas torrenciales estos estudios se complementan con análisis históricos, geomorfológicos y sedimentológicos de los depósitos torrenciales asociados. La caracterización de avenidas torrenciales busca identificar y describir los componentes geomorfológicos, geológicos,

morfodinámicos y morfométricos de una cuenca que están directamente involucrados en la ocurrencia de una avenida torrencial (SGC, 2021).

3.1.2.1 Estudio hidrológico

El estudio hidrológico se llevará a cabo mediante la estimación de parámetros morfométricos para así calcular las tormentas de diseño para las cuencas. A partir de esta información se estimarán las crecientes de diseño mediante los métodos de las hidrógrafas unitarias sintéticas de Clark, *Soil Conservation Service* y Snyder, así como la aplicación del método racional probabilístico. En cuanto a las hidrógrafas unitarias sintéticas, se utilizará el software HEC – HMS v 4.9 para la transformación de la lluvia en escurrimiento directo. Para este caso en particular, se pretende determinar el caudal máximo para los periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Dadas las características del área de estudio, se evaluarán diferentes puntos de control a lo largo de las cuencas y del territorio de interés, para así determinar adecuadamente la respuesta hidrológica para las vertientes.

3.1.2.1.1 Recopilación de información

Para el desarrollo del análisis hidrológico, inicialmente se realizará la recopilación de información disponible que se describe a continuación:

INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA

Con el fin de representar la conformación y caracterización de la superficie terrestre, se realiza la implementación de un modelo digital del terreno, el cual consiste en una representación de las alturas del suelo y que indican las zonas de drenaje en un área determinada. Para los estudios básicos de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, se recopilará la información disponible en la geodatabase del Plan de Ordenamiento Territorial – POT del municipio de Medellín – Acuerdo 048 del 2014, y que corresponde a la cartografía SIGMA en sus planchas 1:2.000 y rurales con escala 1:5.000, lo cual permitió la construcción de un modelo con resolución de 2 m por 2 m de tamaño de píxel, escala adecuada para representar las variaciones en las vertientes de estudio.

Para los análisis a realizar, también se tendrá en cuenta la información del estudio de Cartografía Digital de Antioquia – Cartoantioquia, elaborada por la Comisión Tripartita (Gobernación de Antioquia, Alcaldía de Medellín y Área Metropolitana) EPM, el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC- y el Instituto para el Desarrollo de Antioquia – IDEA, 2006, con escala 1:2.000 para en área urbana y 1:5.000 en área rural y para la zona estudiada. Las cuáles serán comparadas para cada caso específico y se definirá la pertinencia de utilizar una u otra según sea el caso. Adicionalmente, para toda la zona que se encuentra dentro del Distrito de Medellín, también se dispone de una imagen LIDAR con resolución de 1x1 m, la cual permite detallar elementos estructurantes dentro del territorio como obras hidráulicas, vías, asentamientos urbanos, entre otros.

INFORMACIÓN HIDROCLIMÁTICA

El área objeto del análisis hidrológico (distrito de Medellín), no dispone de ningún tipo de información o registros de caudales a través de sus cauces principales o afluentes que cuente con suficiente longitud de registro, por lo cual se usará como fuente primaria, la información de precipitación disponible en la zona.

Con respecto a la información de precipitación, específicamente para caracterizar su intensidad, duración y frecuencia (IDF), se cuenta con diferentes fuentes de información a saber:

- Empresas Públicas de Medellín E.S.P: cuenta con información de curvas IDF y sus respectivos parámetros actualizadas hasta el año 2021
- Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA): en el año 2018, en el marco del trabajo “ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN LOS MUNICIPIOS DE CALDAS, LA ESTRELLA, ENVIGADO, ITAGÜÍ, BELLO, COPACABANA Y BARBOSA, PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL, CONTRATO N° 715 DE 2017” esta entidad estima los parámetros de calibración de curvas IDF para las estaciones de EPM en escenarios con y sin cambio climático.

Con base en esta información, se realizará un comparativo para determinar la información de IDF de la precipitación que se utilizará en los cálculos hidrológicos posteriores.

Para determinar la variabilidad espacial de esta variable se utilizará la metodología de polígonos de Thiessen (interpolación de Voronoi).

USOS DEL SUELO Y COBERTURAS VEGETALES

Para obtener las coberturas terrestres del Distrito, se utiliza como insumo principal el *feature class* “CoberturaTierra_UsoActual” de la geodatabase del POMCA del río Aburrá 2018. Luego mediante procesamiento geográfico (UNION) realizado en el software ArcGis v. 10.8, se incorporan las coberturas terrestres suministradas por planeación para los corregimientos de San Sebastián de Palmitas y San Antonio de Prado. Finalmente, se realiza una edición de coberturas de todo el distrito, utilizando la ortofoto para el municipio de Medellín del año 2024 disponible en el servidor de mapas del Distrito, ajustando las zonas que han venido ocupándose con la categoría de tejido urbano discontinuo y continuo.

3.1.2.1.2 Procesamiento del modelo del terreno y morfometría

Un modelo digital de elevación (MDE) es una representación digital del terreno que permite su almacenamiento y procesamiento en sistemas de información geográfica. La implementación de herramientas ha optimizado significativamente el procesamiento y la obtención de datos a partir de mapas digitales del terreno, como la generación de cuencas hidrográficas a partir de MDE. Un ejemplo de esto es el software HidroSIG 4.0, desarrollado por un grupo interdisciplinario de posgrados en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos y Sistemas de la Universidad Nacional

de Colombia sede Medellín (2011), potenciado por MapWindows. Este paquete no solo modela variables hidrometeorológicas, sino que también genera cuencas y, mediante algoritmos especializados, calcula balances hidrológicos a largo plazo.

Los MDE manejados por HidroSIG 4.0 tienen una estructura conocida como raster, donde el área deseada se discretiza en píxeles cuadrados, cada uno asignado con un valor de altura promedio sobre el nivel del mar. Estos valores se obtienen a partir de mediciones tomadas en todos los puntos dentro de cada píxel. Una técnica común para construir un MDE, llamada 'rasterización', utiliza curvas de nivel digitalizadas, que representan líneas de igual elevación en formato vectorial. Convertir esta información a formato ráster implica la interpolación de elevaciones para asignar valores a todos los puntos de la zona de interés, seguido de la discretización de la superficie resultante.

TRAZADO AUTOMÁTICO DE CUENCAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DE ELEVACIÓN (MDE)

Para que la metodología que permite trazar cuencas pueda usarse repetidas veces, sobre cuencas arbitrarias y con resultados reproducibles, se utiliza la estrategia de extracción automática de cuencas a partir de modelos digitales de terreno que se encuentra implementada en HidroSIG 4.0. A partir del MDE y utilizando el software Tau DEM-Terrain Analysis Using Digital Elevation Models en la plataforma de MapWindow GIS 4.7 (MapWindow Open Source Team, 2024) de libre distribución, se construyeron en formato ráster los mapas de: pendientes máximas, direcciones de drenaje, áreas acumuladas y red de drenaje, los cuales son insumos necesarios para la estimación de caudales y el análisis morfométrico.

Esto permitió el trazado automático de cuencas con resultados precisos en el área rural del municipio – cabecera de cuencas, donde la conformación y delimitación del área de drenaje se encuentra definida por las características y variaciones topográficas. Dado que el modelo digital del terreno elaborado permitió contar con detalle de elementos estructurantes en área urbana, el trazado de las cuencas también contó con una adecuada precisión en la definición del límite o divisoria, resultados que fueron verificados en función de la localización y existencia de drenajes teniendo en cuenta la cartografía oficial del Distrito de Medellín en cuanto a la red hídrica. Considerando estos aspectos, se logró una adecuada representación de las divisorias de cuencas para cada uno de los elementos estudiados dentro del Estudio Básico de Amenaza – EBA por inundación y avenidas torrenciales.

PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS DE LAS CUENCAS ESTUDIADAS

Con la información cartográfica se identificarán y delimitarán las cuencas de interés localizadas al interior del territorio analizado. La información se procesará y luego se estimarán los parámetros morfométricos necesarios para la evaluación hidrológica. Dentro de los parámetros morfométricos a estimar se encuentran: área de drenaje, longitud del cauce principal, longitud

del cauce principal a la divisoria, pendiente promedio del cauce, pendiente promedio de la cuenca, cota superior e inferior de la cuenca y cauce principal, longitud de la cuenca y las coordenadas, entre otros parámetros, de cada uno de los puntos de control o de interés hidrológico.

3.1.2.1.3 Cálculo de caudales máximos

En este trabajo se realizará el cálculo de caudales máximos para períodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años en las cuencas de análisis. Debido a que la mayoría de las cuencas de nuestra región no dispone de información hidrológica que permita estimar caudales a partir de un análisis histórico (estadístico), se hace necesario utilizar modelos precipitación – escorrentía como las hidrógrafas unitarias y el método racional.

Una hidrógrafa unitaria (o hidrograma unitario) representa la respuesta de la cuenca en forma de escorrentía directa, que resulta de una precipitación efectiva de profundidad unitaria, uniformemente distribuida sobre la cuenca y de duración específica igualmente unitaria. Cuando se conoce el hietograma de la precipitación efectiva y el hidrograma unitario de igual duración, el hidrograma de escorrentía directa respectivo se puede calcular convolucionando esa precipitación efectiva con el hidrograma unitario, así:

$$Q(t) = \sum_{i=1}^N U(T,i) \cdot P(t-i+1)$$

Ecuación 8

Donde N representa la memoria del sistema, Q(t) la ordenada t del hidrograma de escorrentía directa, U(T,i) la ordenada i del hidrograma unitario de T horas de duración y P(t-i+1) la ordenada j de la precipitación efectiva. El valor de N es en general igual al número de ordenadas del hidrograma unitario. La duración T del hidrograma unitario corresponde al intervalo de duración de la lluvia efectiva de igual intensidad. Si se tiene un hietograma de precipitación efectiva compuesto con varias intensidades, la duración del hidrograma unitario no es la duración total del hietograma sino la duración de cada intervalo de intensidad constante.

El hidrograma unitario es un modelo lineal simple que permite deducir el hidrograma resultante de cualquier cantidad de exceso de lluvia y se basa en varias hipótesis fundamentales. En primer lugar, se asume que la precipitación efectiva se distribuye uniformemente tanto en el tiempo como en toda el área de la cuenca. Además, el tiempo base de los hidrogramas unitarios generados por precipitaciones unitarias idénticas se mantiene constante. También se considera que existe una relación lineal entre los caudales y la precipitación, conforme al principio de proporcionalidad. Asimismo, para una determinada cuenca, el hidrograma de escorrentía correspondiente a una precipitación de duración específica es único y refleja las características físicas de la cuenca. No obstante, si el área de drenaje es demasiado extensa, resulta improbable que la precipitación se distribuya de manera uniforme en todo el territorio. En tales casos, es

necesario dividir el área en subcuencas y evaluar los escenarios más críticos para tormentas que cubran cada sub-área de manera representativa.

El hidrograma unitario para una duración dada, en una cuenca particular, se construye con registros simultáneos de precipitación y caudal, que no siempre están disponibles tal como ocurre en la cuenca de la quebrada de interés. Hay técnicas que relacionan características morfométricas de la cuenca con características del hidrograma unitario (tiempo al pico, caudal pico, tiempo base, etc.), las cuales suplen la falta de información. Con estas técnicas se construyen los hidrogramas unitarios sintéticos como los que se emplearán en este trabajo, las cuales calculan de manera indirecta los caudales pico para crecientes asociadas a diferentes períodos de retorno. Debido a que estos modelos lluvia – escorrentía utilizan parámetros tanto morfológicos como climáticos, es necesario determinar apropiadamente la lluvia de diseño con su respectiva duración, la cual se considera igual al tiempo de concentración de la cuenca (T_c).

A continuación, se presentan diferentes tipos de hidrogramas unitarios sintéticos.

MÉTODO DE SNYDER

Este modelo propuesto por (Snyder, 1938), considera los siguientes componentes del hidrograma.

Caudal Pico

El modelo propone calcular el caudal pico de la crecida por milla cuadrada, u_p , mediante la siguiente expresión:

$$u_p = C_p \frac{640}{T_R} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde u_p es el caudal pico del Hidrograma Unitario por unidad de área en $\text{pie}^3/\text{s.mí}^2$, C_p es un coeficiente y T_R es el tiempo de rezago. El coeficiente C_p depende de la topografía de la cuenca variando entre 0,5 y 0,8, por ejemplo, para cuencas de alta pendiente se recomienda emplear valores cercanos a 0,8 (menor atenuación del hidrograma de respuesta). Este coeficiente puede ser obtenido si se tiene información simultánea de precipitación y caudal de la cuenca, lo cual solo es posible en cuencas instrumentadas.

Cuando el hidrograma unitario sintético a construir corresponda a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo de concentración, el caudal pico del hidrograma unitario por unidad de área puede calcularse con la ecuación anterior, en caso contrario si la duración de la lluvia es diferente puede calcularse como:

$$u_p = C_p \frac{640}{[T_R + (T - t_s)/4]} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde u_p es el caudal pico del Hidrograma Unitario por unidad de área en $\text{pie}^3/\text{s}.\text{mi}^2$, C_p es un coeficiente y T_R es el tiempo de rezago. El coeficiente C_p depende de la topografía de la cuenca variando entre 0,5 y 0,8, por ejemplo, para cuencas de alta pendiente se recomienda emplear valores cercanos a 0,8 (menor atenuación del hidrograma de respuesta). Este coeficiente puede ser obtenido si se tiene información simultánea de precipitación y caudal de la cuenca, lo cual solo es posible en cuencas instrumentadas.

Cuando el hidrograma unitario sintético a construir corresponda a una precipitación efectiva cuya duración coincide con el tiempo de concentración, el caudal pico del hidrograma unitario por unidad de área puede calcularse con la ecuación anterior, en caso contrario si la duración de la lluvia es diferente puede calcularse como:

$$u_p = C_p \frac{640}{[T_R + (T - t_s)/4]} \quad \text{Ecuación 11}$$

Donde T es la duración de la precipitación efectiva en horas y t_s es la duración de la lluvia efectiva en horas. Una vez obtenido el caudal pico por unidad de área de la cuenca, el caudal pico total se obtiene como:

$$u_p = u_p \cdot A_c \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde A_c es el área de la cuenca en mi^2 y U_p es el caudal pico total del Hidrograma Unitario Sintético en $\text{pie}^3/\text{s}/\text{pul}$.

Tiempo al Pico

El tiempo puede calcularse como:

$$T_p = T/2 + T_R \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde T_p es el tiempo al pico en horas, T es la duración de la lluvia en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas.

Tiempo de Rezago

El modelo emplea como definición de tiempo de rezago (T_R), el tiempo comprendido entre el centroide del hietograma de precipitación efectiva y el pico del hidrograma de escorrentía directa correspondiente. Se asume que el rezago es constante para una cuenca, ya que depende de algunas características físicas y no está determinado por el tipo de lluvia o sus variaciones. El tiempo de rezago se calcula mediante la siguiente ecuación de regresión:

$$T_R = \frac{L_c^{0,8} (S+1)^{0,7}}{1.900 \cdot S_c^{0,5}}$$

Ecuación 14

Donde T_R es el tiempo de rezago en horas, L_c es la longitud del canal principal en pies, S es el factor de retención o almacenamiento calculado en términos del número de curva CN y S_c es la pendiente de la cuenca en porcentaje. Para las cuencas en donde se obtienen tiempos de rezago mayores que el tiempo de concentración se recomienda utilizar la siguiente expresión:

$$T_R = 0,6 \cdot T_c$$

Ecuación 15

Duración de la Lluvia Seleccionada por Snyder

Snyder consideró lluvias que estuvieran de acuerdo con el tamaño de la cuenca, definiendo para ellas una duración de (1/5,5) veces el tiempo de rezago de la cuenca, es decir:

$$t_s = \frac{T_R}{5,5}$$

Ecuación 16

Donde t_s es la duración de la lluvia efectiva en horas.

Duración de la Escorrentía Superficial

Para el cálculo del tiempo base del Hidrograma Unitario se propone la siguiente ecuación:

$$t_b = 3 + 3 \frac{T_R}{24}$$

Ecuación 17

Donde t_b es el tiempo base en días con T_R en horas. Esta ecuación da una estimación razonable del tiempo base para cuencas grandes, pero produce valores excesivamente altos para cuencas pequeñas. En estas el tiempo base puede calcularse, en forma aproximada, como 3 a 5 veces el tiempo al pico.

Esquemmatización de la Hidrógrafa

El Cuerpo de Ingenieros de los EE. UU. (Chow V.T. et al., 1994) introdujo después de los estudios de Snyder dos ecuaciones adicionales a este modelo, con el objeto de obtener otros cuatro puntos del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder que facilitan su definición. Estas ecuaciones son:

$$W_{50} = \frac{770}{u_p^{1,08}} \quad W_{75} = \frac{440}{u_p^{1,08}} \quad \text{Ecuación 18}$$

Dónde: u_p es el caudal pico por unidad de área en $\text{pie}^3/\text{s mi}^2$, W_{50} es el intervalo de tiempo en horas, correspondiente al 50% del caudal pico y W_{75} es el intervalo de tiempo en horas, correspondiente al 75% del caudal pico. Como se puede ver en la Ilustración 9 cada intervalo de tiempo se ubica en la curva de tal forma que su tercera parte quede a la izquierda de la vertical que pasa por el pico del Hidrograma Unitario y las otras dos terceras partes a la derecha de dicha línea (Snyder, 1938 en Chow V.T. et al., 1994).

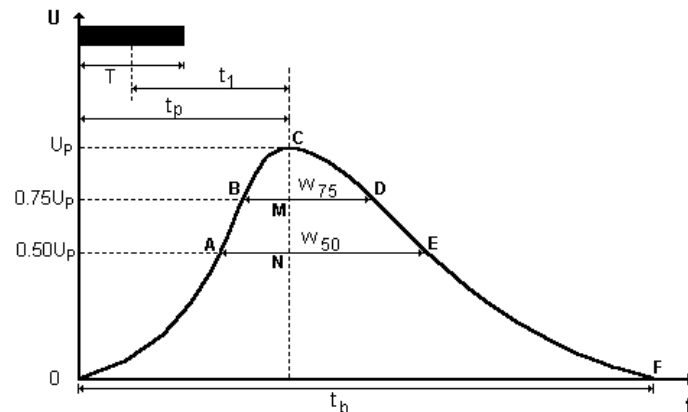


Ilustración 9. Esquematación del Hidrograma Unitario Sintético de Snyder.

Método del Soil Conservation Service - SCS

El Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (Soil Conservation Service, SCS) desarrolló un Hidrograma Unitario Adimensional a partir de una serie de hidrógrafas observadas, correspondientes a cuencas de muy diversos tamaños y ubicadas en distintos sitios de los Estados Unidos (Natural Resources Conservation Service, 2007).

Relación entre Tiempos Característicos

El Hidrograma Unitario adimensional curvilíneo del S.C.S puede ser representado por un Hidrograma Unitario Triangular equivalente, con las mismas unidades de tiempo y caudal, teniendo por consiguiente el mismo porcentaje del volumen en el lado creciente del Hidrograma como se observa en la Ilustración 10.

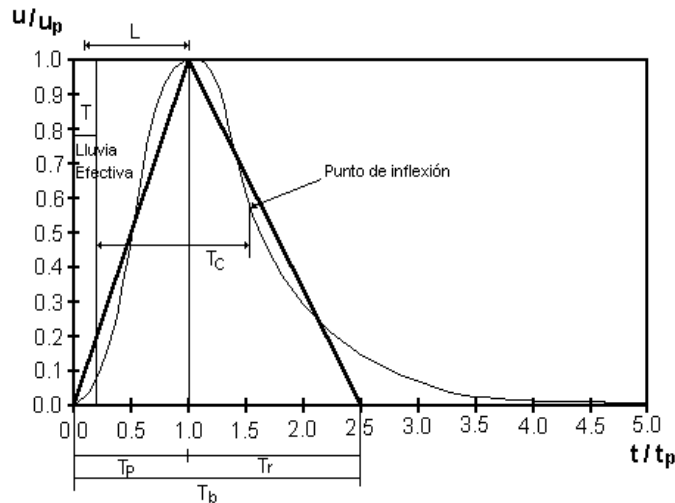


Ilustración 10. Hidrograma Unitario Adimensional del S.C.S.

Caudal Pico

El caudal pico en pies cúbicos por segundo por pulgada se puede calcular como:

$$U_p = \frac{484 \cdot A_c}{T_p} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde U_p es el caudal pico correspondiente a un Hidrograma Unitario, A_c es el área de la cuenca en millas cuadradas y T_p es el tiempo al pico en horas.

Obtención del Tiempo de Concentración Según el SCS

El método del SCS utiliza el tiempo de concentración, el cual define como el tiempo que demora la escorrentía en llegar desde el punto más lejano de la cuenca hasta el punto de aforo, o de manera equivalente, el tiempo que transcurre desde el final de la lluvia efectiva hasta el punto de inflexión de la rama decreciente del Hidrograma Unitario. Con base en esto, el SCS propone una relación promedio entre el tiempo de rezago, T_R y el tiempo de concentración, T_c , como:

$$T_c = 5/3 \cdot T_R \quad \text{Ecuación 20}$$

El tiempo de rezago, T_R , definido como el tiempo en horas desde el centroide del hietograma de la precipitación efectiva hasta el caudal pico del hidrograma unitario, puede calcularse como:

$$T_R = \frac{L_c^{0.8} \cdot (S+1)^{0.7}}{1900 \cdot S_c^{0.5}} \quad \text{Ecuación 21}$$

Donde L_c es la longitud del canal principal en pies, S_c es la pendiente promedio de la cuenca en porcentaje y S es el factor de retención o almacenamiento en pulgadas. El factor de retención o almacenamiento S se obtiene del método del S.C.S para pérdidas mediante la siguiente expresión:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde CN es el Número de Curva.

Duración del Hidrograma Unitario, T

El tiempo al pico, T_p está dado por:

$$T_p = \frac{T}{2} + T_R \quad \text{Ecuación 23}$$

En donde T es la duración de la lluvia efectiva en horas y T_R es el tiempo de rezago en horas. La relación promedio entre el rezago y el tiempo de concentración, puede escribirse de la siguiente manera:

$$T_R = 0,6 \cdot T_c \quad \text{Ecuación 24}$$

Los valores del tiempo de rezago según esta expresión son los mismos obtenidos para el Hidrograma Unitario de Snyder. Se puede demostrar que la relación entre la duración T de la precipitación efectiva a la que se le va a construir el hidrograma unitario y el tiempo de concentración está dada por:

$$T = 0,13 \cdot T_c \quad \text{Ecuación 25}$$

MÉTODO DE CLARK

El Hidrograma Unitario de Clark es empleado cuando no se cuenta con datos de caudales de una creciente desencadenados por una tormenta. Está basado en el principio de que el hidrograma total de una creciente es la suma de todos los hidrogramas aportados por las distintas subcuencas, debidamente modificados por el efecto de almacenamiento en el río. Este método fue expuesto por Clark (1945) y es recogido por casi todos los textos de hidrología; y se implementa en modelos como HMS (HEC, 2010). El método se basa en la distribución de la superficie de la cuenca entre líneas isócronas (puntos con igual tiempo de concentración) para computar el

volumen de agua caído sobre cada una de esas superficies y considerar el retardo producido por el tránsito del agua a lo largo de la cuenca.

Este método puede ser aplicado a cuencas no instrumentadas con geomorfología, suelos, cobertura vegetal o usos del suelo, y características climáticas similares a las de las cuencas instrumentadas. El proceso de atenuación y translación domina el movimiento del flujo gradiente abajo a través de la cuenca en respuesta a la gravedad. La atenuación resulta a partir de las fuerzas friccionales y de los efectos de almacenamiento del canal que resisten el flujo. Partiendo de la ecuación de continuidad:

$$\frac{ds}{dt} = I_t - O_t \quad \text{Ecuación 26}$$

Donde,

ds/dt: Tasa de cambio del almacenamiento en un tiempo t

I_t: Flujo de entrada promedio en el tiempo t

O_t: Flujo de salida promedio en el tiempo t

La atenuación del flujo puede ser representado con tanque lineal para el cual el almacenamiento está relacionado con el flujo de salida de la siguiente manera:

$$S_t = RO_t \quad \text{Ecuación 27}$$

Donde,

S_t: Almacenamiento de la cuenca en el tiempo t

R: Coeficiente de almacenamiento de la cuenca.

O_t: Flujo de salida de la cuenca en el tiempo t.

Combinando y solucionando las ecuaciones mencionadas y empleando un modelo en diferencias finitas aproximado se obtiene la siguiente expresión.

$$O_t = C_A I_t + C_B O_{t-1} \quad \text{Ecuación 28}$$

Donde C_A y C_B son coeficientes que pueden ser obtenidos mediante la siguiente expresión:

$$C_A = \frac{\Delta t}{R + 0.5\Delta t} \quad \text{Ecuación 29}$$

$$C_B = 1 - C_A$$

El flujo promedio de salida en el instante t se calcula como:

$$\overline{O}_t = \frac{O_{t-1} - O_t}{2} \quad \text{Ecuación 30}$$

Clark (1945) observó que la translación del flujo a través de la cuenca puede ser descrita mediante la curva de tiempo-área, la cual expresa la curva de la fracción del área que contribuye a la escurrentía de la cuenca como una función del tiempo desde que comienza la precipitación efectiva. La precipitación efectiva es aquella precipitación que ni es retenida en la superficie ni es infiltrada dentro del suelo. La curva tiempo área es delimitada en el tiempo por el tiempo de concentración (T_c) de la cuenca.

El software HEC-HMS presenta una curva tiempo - área típica obtenida a partir de estudios realizados en muchas cuencas de Estados Unidos, la cual está dada por la siguiente expresión.

$$\frac{A_t}{A} = \begin{cases} 1.414 \left(\frac{t}{t_c} \right)^{1.5} & \text{para } t \leq \frac{t_c}{2} \\ 1 - 1.414 \left(1 - \left(\frac{t}{t_c} \right) \right) & \text{para } t \geq \frac{t_c}{2} \end{cases} \quad \text{Ecuación 31}$$

Donde,

A_t : Área acumulada contribuyente en el tiempo t

A : Área total de la cuenca

t_c : Tiempo de concentración de la cuenca

La multiplicación del área contribuyente en el tiempo t multiplicada por la intensidad de la lluvia en el instante t produce el caudal de salida Q_t . Numerosos investigadores han encontrado que no es necesario determinar la curva tiempo-área para la cuenca. Por ejemplo, Turner y Burdoin (1941) encontraron una hidrógrafa con resultados relativamente aceptables obtenidas cuando la curva de tiempo - área fue sustituida por las formas geométricas simples. En Illinois, el programa de modelación hidrológica, HEC-1 (que es la versión anterior del HEC-HMS), es utilizado típicamente para calcular la hidrógrafa unitaria sintética de Clark. T_c y R son los parámetros requeridos para la modelación en el HEC-1. El T_c de Clark es ligeramente diferente a la definición típica del tiempo de concentración aplicado en otras metodologías, tal como el método racional.

En la hidrógrafa de Clark, T_c es definido como el tiempo desde el fin de la precipitación efectiva hasta el punto de inflexión de la hidrógrafa de escurrentía. El punto de inflexión de la hidrógrafa de escurrentía corresponde al tiempo cuando el flujo sobre el terreno hacia los canales cesa desde el drenaje de los canales de almacenamiento. Por ende, el T_c de Clark es el tiempo de viaje requerido para que la última gota agua de la precipitación efectiva en el punto más distante

hidráulicamente en la cuenca alcance la red de canales. En la mayoría de las aplicaciones del HEC-1, T_c es determinado a partir de valores calibrados con precipitaciones medidas y datos de escorrentía superficial directa.

Debido a la no presencia de cuencas instrumentadas dentro de zona de estudio, se hace necesario recurrir a la aplicación de metodologías regionalizadas en otros países, específicamente Estados Unidos, con el propósito de poder obtener los parámetros requeridos para la modelación hidrológica con el hidrograma de Clark. El coeficiente de atenuación, el cual representa el efecto de almacenamiento de un canal, es calculado a partir de un hidrograma observado en la cuenca. Como se muestra en la *Ilustración 11*.

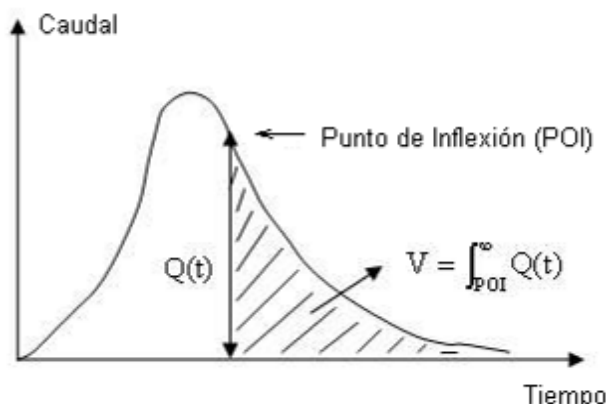


Ilustración 11. Cálculo del coeficiente de atenuación de almacenamiento R.

El valor del coeficiente de almacenamiento (R) se calcula como:

$$R = \frac{\int_{poi}^{\infty} Q(t) dt}{Q_{poi}} \quad \text{Ecuación 32}$$

La metodología regionalizada con la cual se estimaron los parámetros R y T_c fue implementada en el estado de Illinois, Estados Unidos. Esta metodología utilizó el análisis de regresión múltiple lineal para correlacionar el logaritmo de la media de T_c y la media de R para cada cuenca con los logaritmos del área de la cuenca, pendiente y longitud del canal. Las ecuaciones regionalizadas para T_c y R se expresan a continuación:

$$T_c = 1.54L^{0.875}S^{-0.181} \quad \text{Ecuación 33}$$

$$R = 16.4L^{0.342}S^{-0.790} \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde:

L es la longitud del cauce expresado en millas, S es la pendiente del canal expresado en ft / milla y Tanto R como T_c están expresados en horas.

MÉTODO RACIONAL

La técnica conocida como método racional se usa ampliamente en nuestro medio. La forma más conocida de la fórmula racional para el sistema internacional es:

$$Q = \frac{CIA}{3,6} \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde C es el coeficiente de escorrentía, I, la intensidad de la lluvia y A, el área de la cuenca. En este método los efectos de la lluvia y del tamaño de la cuenca son considerados en la expresión explícitamente y otros procesos son considerados implícitamente en el tiempo de concentración y el coeficiente de escorrentía. El almacenamiento temporal y las variaciones espacio – temporales de la lluvia no son tenidas en cuenta, concluyéndose debido a esto que el método debe dar buenos resultados solo en cuencas pequeñas, no mayores de 1,0 Km². La intensidad es la obtenida de las curvas IDF para una lluvia con una duración igual al tiempo de concentración (Tc). El coeficiente de escorrentía depende del porcentaje de impermeabilidad, de la pendiente, así como características de encharcamiento de la superficie, de las condiciones del suelo, entre otras características. La cantidad de parámetros presentes en la determinación del coeficiente de escorrentía hacen que sea una de las fuentes de mayor incertidumbre en la utilización de este método.

El método cuenta con algunas restricciones:

El método proporciona solamente un caudal pico, no el hidrograma de creciente.

El método racional asume que la escorrentía es directamente proporcional a la precipitación (si duplica la precipitación, la escorrentía se duplica también). En la realidad esto no es cierto, pues la escorrentía depende también de muchos otros factores tales como precipitaciones antecedentes, condiciones de humedad del suelo, etc.

El método asume que el período de retorno de la precipitación y el de la escorrentía son los mismos lo que no es cierto. La precipitación es filtrada por la cuenca para producir escorrentía y ese filtro no es lineal. La transformación de precipitación en escorrentía se ve afectada por las características de la cuenca, el estado de la cuenca al momento de la lluvia y otros factores. Por ejemplo, precipitaciones con períodos de retorno pequeños pueden producir caudales con períodos de retorno mayores, debido a las condiciones de humedad de la cuenca en el momento en que ocurra la tormenta.

El coeficiente de escorrentía depende en gran medida de las condiciones de humedad antecedente de la cuenca, que a su vez dependen de las tormentas que hayan ocurrido antes.

3.1.2.1.4 Tiempo de Concentración

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al punto de salida o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo. En la literatura para el caso de cuencas no instrumentadas, se cuenta básicamente con dos métodos del tipo empírico para estimar el tiempo de concentración, el primero trata de relacionar T_c con algunas de las características principales de la cuenca y su cauce principal. Existen múltiples expresiones para el cálculo del tiempo de concentración, entre otras las propuestas por: Temez, Kirpich, California *Coulverts Practice*, Giandotti, S.C.S, y Ven Te Chow. Sus fundamentos teóricos pueden ser revisados en Campo y Múnera (1997) y Vélez y Botero (2010).

El segundo es el método de la velocidad, este considera que el flujo en la cuenca se desarrolla como una combinación de tres procesos: a) flujo laminar el cual ocurre a escala de ladera en longitudes del orden de los 100 m (aunque este valor depende estrictamente de la densidad de drenaje en la cuenca) y para alturas del agua del orden de milímetros, b) un flujo concentrado superficial, y c) el flujo presente propiamente en los canales de la red hídrica.

Este método es empleado principalmente para la estimación de mapas de tiempo de viaje al interior de cuencas (isócronas) los cuales apoyan la construcción de hidrógrafas unitarias sintéticas como la de Clark, y que tiene su principal incertidumbre en los valores a emplear para la rugosidad en el flujo laminar, pues los valores comúnmente reportados para coeficientes como el de Manning han sido estimados para tirantes de agua en escalas mayores a las de milímetros (especialmente para canales naturales o artificiales o llanuras de inundación), pero tiene la ventaja de considerar de primera mano la estructura real de terreno a evaluar, pues no necesariamente el mayor tiempo de concentración lo da la distancia más alejada a la salida de la cuenca, dado que eso depende de las características propias del terreno, como sus concavidades, coberturas y pendientes en los canales. En este estudio se empleó como ya se mencionó el primer método.

Debido a las diferentes formas en las que fueron concebidas estas expresiones, la variabilidad en los resultados de una a otra puede ser bastante alta por lo cual se hace necesario escoger el tiempo de concentración de forma apropiada descartando aquellos métodos que presenten resultados extremos. Algunas de las metodologías usadas se presentan a continuación:

- Kirpich (1990):

$$T_c = 0,066 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,77} \quad \text{Ecuación 36}$$

Tc: tiempo de concentración, en horas.

L: longitud desde la estación de aforo hasta la divisoria, siguiendo el cauce principal, en kilómetros.

So: diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L en m/m.

- Kirpich:

$$T_c = 0,0078 \cdot L^{0,77} \cdot S^{-0,385} \quad \text{Ecuación 37}$$

Tc: tiempo de concentración, en min.

L: longitud del cauce principal en pies.

So: pendiente promedio del canal principal en m/m.

- Témez (1978):

$$T_c = 0,3 \left(\frac{L}{S_o^{0,25}} \right)^{0,75} \quad \text{Ecuación 38}$$

Tc: tiempo de concentración en horas.

L: longitud del cauce principal en kilómetros.

So: diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente sobre L en %.

- Giandiotti (1990):

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{LS_o}} \quad \text{Ecuación 39}$$

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

L: Longitud del cauce principal, en kilómetros.

So: Diferencia de cotas entre puntos extremos de la corriente sobre L, en m/m.

- Williams (1922):

$$T_c = \frac{LA^{0,4}}{DS_0^{0,2}}$$

Ecuación 40

Tc: tiempo de concentración, en horas.

A: área en millas cuadradas.

L: distancia en línea recta desde el sitio de interés al punto más alto de la cuenca en millas.

So: diferencia de cotas entre los puntos extremos de la cuenca dividida por L, en %.

D: diámetro de una cuenca circular, con área A, en millas.

- Johnstone y Cross (1949):

$$T_c = 5 \left(\frac{L}{\sqrt{S_0}} \right)^{0,5}$$

Ecuación 41

Tc: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del cauce principal, en millas.

So: Pendiente del canal, en pies/milla.

- California Culverts Practice - CCP (1942):

$$T_c = 60 \cdot \left[\frac{0,87075 \cdot L^3}{H} \right]^{0,385}$$

Ecuación 42

Tc: Tiempo de concentración, en min.

L: Longitud del cauce principal hasta la divisoria, en km.

H: Diferencia de cotas entre el punto de control y la divisoria, en m.

- Clark:

$$T_c = 0,335 \cdot \left(\frac{A}{S^{0,5}} \right)^{0,593}$$

Ecuación 43

Tc: Tiempo de concentración en horas.

A: Área de la cuenca en km².

S: Pendiente promedio del cauce principal en m/m.

- Passini:

$$T_c = \frac{[0,108 \cdot (A \cdot L)^{1/3}]}{S^{0,5}}$$

Ecuación 44

Tc: Tiempo de concentración en horas.

A: Área de la cuenca en km².

L: Longitud del cauce principal en km.

S: Pendiente promedio del cauce principal en %.

- Pilgrim y McDermott:

$$T_c = 0,76 \cdot A^{0,38}$$

Ecuación 45

Tc: Tiempo de concentración en horas.

A: Área de la cuenca en km².

- S.C.S-Ranser:

$$T_c = 0,947 K^{0,385}$$

Ecuación 46

$$K = \frac{L_c^3}{H}$$

Ecuación 47

Tc: tiempo de concentración, en horas.

Lc: distancia desde el sitio de interés al punto en el cual la corriente principal corta la divisoria, en kilómetros.

H: diferencia de cotas entre los puntos extremos de la corriente, en pies.

- Valencia y Zuluaga:

$$T_c = 1,7694 \cdot A^{0,325} \cdot L^{-0,096} \cdot S^{-0,290}$$

Ecuación 48

T_c: Tiempo de concentración, en horas.

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

L: longitud del cauce hasta la divisoria en km.

S: Pendiente del cauce, en %.

- Ventura – Heras:

$$T_c = \alpha \cdot \frac{A^{0,5}}{S_o}$$

Ecuación 49

T_c: Tiempo de concentración, en horas.

A: Área de la cuenca, en kilómetros cuadrados.

S: Pendiente del cauce, en m/m.

α: 0.03 – 0.13

- Ventura – Heron:

$$T_c = 0,30 \cdot \left(\frac{L}{S^{0,25}} \right)^{0,75}$$

Ecuación 50

T_c: Tiempo de concentración, en horas.

L: Longitud del cauce principal en km.

S: Pendiente promedio del cauce, en %.

- Bransby - Williams:

$$T_c = 14,6 \cdot L \cdot A^{-0,1} \cdot S^{-0,2}$$

Ecuación 51

T_c: Tiempo de concentración, en minutos.

L: Longitud del cauce principal en km.

A: Área de la cuenca en km².

S: Pendiente promedio del cauce, en m/m.

Con el objetivo de excluir los tiempos de concentración que se alejaban excesivamente de la mediana, se descartaron aquellos tiempos que estuvieron por fuera de una banda de confianza con un ancho de un (1) IQR y centrada en la mediana, correspondiente a un método estadístico para determinar valores atípicos y establecer una banda de confianza para los resultados de la variable, en este caso, el tiempo de concentración asociado a cuencas. Con el fin de dar claridad al procedimiento utilizado, es importante indicar que el Rango Inter cuartílico (IQR) es una medida de dispersión que se calcula restando el primer cuartil (Q1) del tercer cuartil (Q3). Al usar el IQR centrado en la mediana, se establece un rango de valores que se considera "aceptable" o "normal" y éste no corresponde al promedio de los valores obtenidos.

3.1.2.1.5 *Intensidad de la lluvia de diseño*

Para determinar la intensidad de lluvia asociada a diferentes períodos de retorno, se utilizan las curvas IDF (Intensidad-Duración-Frecuencia) que relacionan la duración de la lluvia con la intensidad de ésta para diferentes períodos de retorno. Dentro de este proceso, se usan los parámetros estimados y dados en La Revista Hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín, (EPM, 2005). Los parámetros consignados en esta revista fueron actualizados en el año 2021 teniendo en cuenta los registros históricos de precipitación para el periodo de análisis entre 1996 y 2021.

La intensidad se calcula mediante la siguiente expresión:

$$I_{tr} = \frac{k \cdot Tr^m}{(c + d)^n}$$

Ecuación 52

Donde, I: Intensidad en (mm/h) para cada periodo de retorno, d: La duración de la lluvia (min), Tr corresponde al periodo de retorno de interés (2.33, 5, 10, 25, 50 y 100 años), y k, m, n y c: son parámetros de la curva IDF para cada estación pluviométrica.

Para este proceso se tendrá en cuenta el documento ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN LOS MUNICIPIOS DE CALDAS, LA ESTRELLA, ENVIGADO, ITAGÜÍ, BELLO, COPACABANA Y BARBOSA, PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL, CONTRATO N° 715 DE 2017, presentado en 2018 y donde se presentan los parámetros para la construcción de curvas IDF para las estaciones operadas por Empresas Públicas de Medellín E.S.P. bajo escenarios sin cambio climático y con cambio climático.

Con la finalidad de escoger la mejor representación de la intensidad de la lluvia en la zona de estudio, se pudo evaluar que, para la duración de lluvia inferior a 10 min, el comportamiento de las estaciones y del cálculo de la intensidad representa mayores valores en función de los parámetros ajustados a 2021 por parte de Empresas Públicas de Medellín E.S.P., comportamiento que no se presenta de forma general para todas las estaciones. Sin embargo, se puede determinar que, para duración de lluvia superior a 10 min, las mayores intensidades son estimadas a partir de los parámetros con

cambio climático partiendo de los parámetros aportados dentro del documento: ESTUDIOS BÁSICOS DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA, INUNDACIONES Y AVENIDAS TORRENCIALES EN LOS MUNICIPIOS DE CALDAS, LA ESTRELLA, ENVIGADO, ITAGÜÍ, BELLO, COPACABANA Y BARBOSA, PARA LA INCORPORACIÓN DE LA GESTIÓN DEL RIESGO EN LA PLANIFICACIÓN TERRITORIAL, CONTRATO N° 715 DE 2017, presentado en 2018.

Considerando que el análisis de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales dentro del municipio de Medellín contempla la definición de cuencas principales según proceso de priorización, y donde en general, el área tributaria de las diferentes vertientes se considerará superior a 0,50 km², se espera que la duración de lluvia se encuentre por encima de 10 min y por ello, se utilizarán los parámetros para la construcción de IDF considerando cambio climático y así optar por una postura más desfavorable.

PRECIPITACIÓN EFECTIVA

La precipitación efectiva es la parte de la precipitación total que contribuye a la escorrentía directa. Para simular las pérdidas de la precipitación, esto es, la cantidad de agua que se pierde por intercepción en la vegetación, almacenamiento en depósitos del suelo y por infiltración, se usa el método del número de curva del SCS (Soil Conservation Service), cuyos detalles de la metodología pueden ser consultados en Chow et al., (1994). La precipitación efectiva por el método del SCS se estima a partir de la precipitación total acumulada, así:

$$P_e = \frac{(P_{acum} - Ia)^2}{P_{acm} - Ia + S} \quad \text{Ecuación 53}$$

$$S = \left(\frac{1.000}{CN} - 10 \right) \cdot 25,4 \quad \text{Ecuación 54}$$

$$Ia = 0,2 \cdot S \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde P_e es la Precipitación efectiva, Ia : las abstracciones iniciales, CN el denominado Número de curva, y S la capacidad de almacenamiento.

Número de Curva

El intervalo del número de curva es desde 0 a 100 y es función de la textura, la cobertura, tipo de tratamiento superficial que éste presente, de su condición hidrológica y a la humedad antecedente del suelo (AMC), que puede relacionarse con la precipitación en los 5 días anteriores. Entre menor sea el número de curva, más bajo es el potencial de escorrentía. La humedad antecedente del suelo está definida en tres grupos:

AMC-I: Para suelos secos.

AMC-II: Para suelo intermedios.

AMC-III: Para suelos húmedos.

Las tablas de las cuáles se obtiene el número de curva están dadas para condiciones AMC II. Por lo tanto, para transformar el número de curva de AMC II a un número de curva equivalente para AMCIII se utiliza la siguiente expresión:

$$CN(III) = \frac{23 \cdot CN(II)}{10 + 0,13 \cdot (CNII)} \quad \text{Ecuación 56}$$

Además del número de curva, también se requiere ubicar la zona dentro de un grupo hidrológico del suelo, el cual está definido como el potencial de infiltración después de una lluvia prolongada. Los números de curva han sido tabulados por el *Soil Conservation Service* (SCS) con base en el tipo y uso del suelo. Se definen cuatro grupos de suelos:

Grupo de Suelo A: Alta infiltración (baja escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas cubiertos con vegetación (bosque o rastrojo alto) con grado de meteorización 30/50 según Brand (1988) y con discontinuidades en la matriz de suelo producto del proceso de descomposición de la roca. Las estructuras funcionan como canales de flujo principales. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 7%. También se incluyen los suelos que presentan un efecto geológico marcado por diaclasas y bandeamientos, y cuyo buzamiento se da en ángulos mayores a 60°.

Grupo de Suelo B: Infiltración moderada (escorrentía moderada). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas o sedimentarias poco denudados con grado de meteorización 0/30 según Brand (1988) y con discontinuidades difícilmente cartografiables en campo. Las estructuras ya no son tan importantes en la permeabilidad del conjunto, por lo cual la permeabilidad primaria es la que controla el flujo de agua en el suelo. La pendiente en este grupo de suelo debe ser inferior a un 10%.

Grupo de Suelo C: Infiltración baja (escorrentía de moderada a alta). Suelos residuales derivados de cualquier tipo de roca, y cuyo grado de meteorización se clasifique como residuales maduros (SR, Brand – 1988), en los cuales las propiedades y minerales del material parental no son fácilmente identificables. Esta formación tiene como característica principal que está cubierta por pastos manejados y sus pendientes varían entre un 5 y 15%.

Grupo de Suelo D: Muy poca infiltración (alta escorrentía). Suelos derivados de rocas metamórficas, ígneas y sedimentarias, cuyo grado de meteorización varía entre 0/90 y en donde la pendiente media excede 15%. El tipo de vegetación en este grupo no es de mayor importancia ya que el fuerte gradiente topográfico impide la recarga de los acuíferos en la zona, generando por el contrario un flujo hipodérmico hasta aflorar nuevamente en superficie

y hacer parte del agua que se aporta al canal principal de la cuenca. En este grupo se encuentran las áreas urbanizadas con poca vegetación (10%).

En la Tabla 7, se presentan los diferentes tipos de coberturas vegetales con sus respectivos CN, discretizados por la clasificación hidrológica de cada tipo de suelo.

Tabla 7. Número de Curva para los diferentes tipos de cobertura bajo condiciones de humedad AMC II.

Descripción uso del suelo		Grupo suelo hidrológico			
		A	B	C	D
Residencial					
Tamaño medio del lote	% promedio Impermeabilidad				
1/8 de acre o menos	65	77	85	90	92
1/4 de acre	38	61	75	83	87
1/3 de acre	30	57	72	81	86
1/2 de acre	25	54	70	80	85
1 acre	20	51	68	79	84
Parqueadero pavimentado, tejados, vías de acceso, etc		98	98	98	98
Calles y avenidas					
Pavimentos con cuneta y alcantarillado pluvial		98	98	98	98
Grava		76	85	89	91
Tierra		72	82	87	89
Áreas comerciales (85% impermeabilidad)		89	92	94	95
Distritos industriales (72% impermeabilidad)		81	88	91	93
Áreas libres, zonas verdes, parques, campos de golf					
Condiciones buenas: Zona verde en 75% o más de área		39	61	74	80
Condiciones aceptables: Zona verde de 50% a 75% del área		49	69	79	84
Baldío		77	86	91	94

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

MODELO HEC – HMS

El HEC-HMS v 4.9 (*Hydrologic Engineering Center's Hydrologic Modeling System*) es un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar las hidrógrafas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico) a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

El programa se deriva directamente del HEC-1, y conserva en esencia la misma filosofía de introducción de datos y secuencia de cálculos. El HMS, incluye la mayor parte de las rutinas de HEC-1 (algunas parecen haber sido obviadas) e incorpora como elementos adicionales:

- Un método de transformación lineal de la escorrentía (basado en una modificación del hidrograma unitario de Clark) que puede utilizarse en una representación de la cuenca a través de celdas, con datos distribuidos de precipitación obtenidos por ejemplo de registros de radar.
- Una opción de pérdida distribuida de humedad en suelos que aplica el mismo principio de las celdas y puede utilizarse en simulaciones sobre períodos largos (de días o meses) Una opción de optimización, un poco más versátil que la del HEC-1.

Funcionamiento

El programa incluye una interfaz gráfica para el usuario (GUI) que le permite introducir la información necesaria para una simulación, manejar los componentes de análisis hidrológico a través de módulos integrados, y obtener respuestas gráficas o tabuladas de fácil comprensión e impresión. Para definir la estructura de las cuencas, el programa considera los siguientes elementos: Subcuencas (*subbasins*), Tramos de tránsito (*routing reach*), Uniones (*junctions*), Embalses (*reservoirs*), Fuentes (*Sources*), Sumideros (*sinks*), Derivaciones (*diversions*).

Con estos siete componentes, se puede elaborar una cuenca tan compleja como requiera el problema que está tratando y como permita la información de campo disponible. Si se cuenta con información digital de campo, el HMS incluye la opción de trabajar la cuenca con subdivisiones en grillas o celdas, cada una de las cuales almacena información pertinente respecto a la precipitación, área, pendientes y condición de humedad del suelo.

Los elementos anteriores se disponen en forma de redes dendríticas con un orden o secuencia lógica para realizar los cálculos desde las subcuencas que conforman las cabeceras aguas arriba hasta el punto de salida de todo el caudal aguas abajo. El programa trabaja con tres módulos básicos que definen en su conjunto el proyecto de simulación de la cuenca:

- Módulo de precipitación: permite seleccionar uno de seis patrones de precipitación (tipos de hietogramas) del evento de tormenta que más se ajuste a las posibles condiciones de la cuenca, incluyendo la introducción manual de los datos de la lluvia de diseño.
- Módulo de la cuenca: permite la representación del sistema físico con los elementos antes citados, y la inclusión de las características morfométricas y de condición del suelo para cada uno de ellos. Así, cada componente incluye la información necesaria para construir la hidrógrafa total de salida.
- Módulo de control: incluye las fechas de inicio y culminación de los datos de lluvia y caudal para la simulación (u optimización) y los intervalos de tiempo para realizar los cálculos.

El programa es utilizado para la conversión de la precipitación en escorrentía directa, teniendo como insumo las características morfométricas de las cuencas a estudiar, las condiciones de pérdidas hidrológicas y la precipitación total calculada. Para el caso en estudio, se realiza el cálculo para las hidrógrafas unitarias sintéticas de SCS, Snyder y Clark, teniendo como base la conversión de la precipitación total a precipitación neta a partir del número de curva.

DISTRIBUCIÓN TEMPORAL DE LA LLUVIA

Para la distribución temporal de la lluvia se utilizó el diagrama elaborado por Huff (1967) que se presenta en la *Ilustración 12*, para lluvia con una probabilidad de excedencia del 50%. En los modelos lluvia-escorrentía, para determinar la tormenta de diseño, es necesario hallar la distribución de la lluvia en el tiempo.

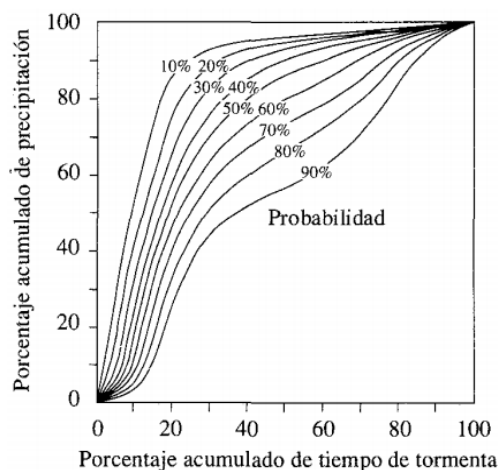


Ilustración 12. Diagrama distribución temporal de la lluvia (Huff – 1967, Chow et al, 1994.)

Para este propósito existen diferentes metodologías (Diagrama de Huff, Histograma triangular, Bloque alterno). Como ya se mencionó para este estudio, los valores de distribución de la lluvia en el tiempo fueron tomados del Diagrama de Huff (ver *Ilustración 12*) para el primer cuartil (más severos) con una probabilidad de ocurrencia del 50% (Chow, et al., 1994), tal como se presenta en la Tabla 8.

Tabla 8. Distribución en porcentaje de la lluvia con relación a la duración de la tormenta (%).

T acm	P acm	T acm	P acm	T acm	P acm
0	0	40	80	80	94
10	16	50	85	90	98
20	52	60	87	100	100
30	69	70	91	-	-

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Donde: T acm, corresponde al % del tiempo total de la duración de la tormenta de diseño de forma acumulada y P acm, es el % de la precipitación total de forma acumulada.

3.1.2.1.6 Método racional probabilístico

Una de las variables de importancia para el uso del método Racional corresponde al coeficiente de escorrentía. Por definición el coeficiente de escorrentía es:

$$C = \frac{\text{Escorrentía (Es)}}{\text{Precipitación (P)}} \quad \text{Ecuación 57}$$

La escorrentía superficial (Es) que genera cualquier evento de precipitación (P) se puede cuantificar mediante el método del número de curva. Admitiendo la relación habitual $I_a = 0,2 \times S$ (Infiltración inicial), se tiene que:

$$Es = \frac{(P - I_a)^2}{P + 4 \cdot I_a} \rightarrow C = \frac{Es}{P} = \frac{(P - I_a)^2}{P^2 + 4 \cdot P \cdot I_a} \quad \text{Ecuación 58}$$

Otra forma de estimar el coeficiente de escorrentía es el procedimiento tabular planteado por Ven Te Chow (1994), el cual consiste en asignar un valor de coeficiente de escorrentía a una cobertura vegetal específica y para un periodo de retorno dado. En la Tabla 9, se presentan los valores para los coeficientes de escorrentía, según Chow, 1994.

Tabla 9. Coeficientes de escorrentía según Chow, 1994.

Tipo de Superficie	Periodo de Retorno					
	2	5	10	25	50	100
Zonas Urbanas						
Asfalto	0,73	0,77	0,81	0,86	0,90	0,95
Cemento, Tejados	0,75	0,80	0,83	0,88	0,92	0,97
Zonas Verdes						
Condición Pobre (Cobertura inferior al 50%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,32	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47
Pendiente Media (2-7%)	0,37	0,40	0,43	0,46	0,49	0,53
Pendiente Alta (>7%)	0,40	0,43	0,45	0,49	0,52	0,55
Condición Media (Cobertura entre 50 y 75%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
Pendiente Media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
Pendiente Alta (>7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53
Condición Alta (Cobertura superior al 75%)						
Pendiente Baja (0-2%)	0,21	0,23	0,25	0,29	0,32	0,36
Pendiente Media (2-7%)	0,29	0,32	0,35	0,39	0,42	0,46
Pendiente Alta (>7%)	0,34	0,37	0,40	0,44	0,47	0,51
Zonas Rurales						
Campos de Cultivos						
Pendiente Baja (0-2%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47
Pendiente Media (2-7%)	0,35	0,38	0,41	0,44	0,48	0,51
Pendiente Alta (>7%)	0,39	0,42	0,44	0,48	0,51	0,54
Pastizales, Prados						

Tipo de Superficie	Periodo de Retorno					
	2	5	10	25	50	100
Pendiente Baja (0-2%)	0,25	0,28	0,30	0,34	0,37	0,41
Pendiente Media (2-7%)	0,33	0,36	0,38	0,42	0,45	0,49
Pendiente Alta (>7%)	0,37	0,40	0,42	0,46	0,49	0,53
Bosques, Montes Arbolados						
Pendiente Baja (0-2%)	0,22	0,25	0,28	0,31	0,35	0,39
Pendiente Media (2-7%)	0,31	0,34	0,36	0,40	0,43	0,47
Pendiente Alta (>7%)	0,35	0,39	0,41	0,45	0,48	0,52

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Partiendo de las coberturas vegetales disponibles en las cuencas, se realiza el cálculo ponderado del coeficiente de escorrentía. El procedimiento para determinar el coeficiente de escorrentía que presenta Chow (1994) fue desarrollado con los estándares de la ciudad de Austin Texas. Una forma de ajustar los coeficientes tomados de Ven Te Chow, a unas condiciones regionales consiste en dividir cada valor en cada periodo de retorno por el coeficiente tomado para el periodo de retorno de 100 años, y este resultado multiplicarlo por el coeficiente del periodo de retorno de 2,33 años.

Se hace un análisis comparativo entre los valores estimados para el coeficiente de escorrentía calculado a partir del número de curva y la precipitación de la cuenca, y el valor determinado según el procedimiento tabular propuesto por Chow, 1994, para así, determinar en definitiva el coeficiente de escorrentía a ser utilizado dentro del método Racional.

3.1.2.1.7 Índices Morfométricos

El cálculo de índices morfométricos tiene como objetivo caracterizar morfométricamente las cuencas que han presentado antecedentes de torrencialidad o evidencias geomorfológicas de ello. De esta manera se busca obtener un orden del grado de torrencialidad de las cuencas y los posibles tipos de flujos que pueda generar. Este cálculo también debe ser realizado en aquellas cuencas que a pesar de no tener registro histórico ni evidencias geomorfológicas de torrencialidad se consideran prioridad del municipio por contener centros poblados en su zona de tránsito o depósito o según el criterio experto (SGC, 2021).

De acuerdo al documento: GUÍA METODOLÓGICA PARA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana, 2021, se indica que hay varios índices morfométricos utilizados para determinar qué tipos de avenidas torrenciales pueden darse con mayor frecuencia en una cuenca, de los cuales son recomendados los siguientes: índice de Melton, longitud de la cuenca, relación del relieve, área de la cuenca, integral hipsométrica, tiempo de concentración, relación de bifurcación y coeficiente de torrencialidad.

Para este proceso se estimará el Índice de Melton, la Relación de Relieve, La Integral Hipsométrica, el coeficiente de torrencialidad, el índice Gradiente – Longitud del canal (SL), entre otros.

ÍNDICE DE MELTON

Se define como el relieve de la cuenca dividido por la raíz cuadrada de su área (Kain et al., 2018; Welsh, 2007; Wilford et al., 2004, mencionados en SGC, 2021), y es considerado como uno de los mejores índices morfométricos para identificar los tipos de flujos que se puedan generar en una cuenca (Santangelo et al., 2012; Welsh y Davies, 2011; Welsh, 2007; Wilford et al., 2004, mencionado en SCS, 2021).

$$R = \frac{H_b}{\sqrt{A_b}}$$

Ecuación 59

Al descubrir que los abanicos dominados por flujos de detritos están asociados con cuencas pequeñas y de relieve alto, Melton propuso un índice adimensional expresando la robustez de la cuenca, dirigido a clasificar abanicos según las características de la cuenca corriente arriba (Santangelo et al., 2012, mencionado por SGC, 2021). En términos generales, la discriminación propuesta por Wilford et al. (2004), donde las cuencas con predominancia de flujos de detritos presentan índices de Melton mayores a 0,6, de flujos hiperconcentrados entre 0,30 y 0,60, e inundaciones o flujos de corriente índices menores de 0,30, ha sido una de las más adoptadas por otros autores (Ouellet y Germain, 2014, 2010; Santangelo et al., 2012; Welsh y Davies, 2011; Welsh, 2007; Zhou y Chang, 2016, mencionados en SGC, 2021).

En Colombia, el rango del índice de Melton se encuentra entre 0,15 y 0,91 para cuencas con ocurrencia de flujos de detritos y flujos de lodos, y 0,06 y 0,50 para cuencas con desarrollo de flujos hiperconcentrados. En este sentido, las cuencas con predominancia de flujos hiperconcentrados presentan valores muy por debajo del rango propuesto por Wilford et al. (2004) (0,30-0,60) incluyendo también rangos de cuencas con desarrollo de inundaciones (< 0,30). Por otra parte, las cuencas con predominancia de flujos de detritos en Colombia presentan un rango amplio del índice de Melton, incluyendo los valores propuestos por Wilford et al. (2004) para cuencas con flujos de detritos (> 0,60), flujos hiperconcentrados y cuencas con predominancia de inundaciones.

Adicionalmente, dentro del documento: ANÁLISIS DE METODOLOGÍAS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR AVENIDAS TORRENCIALES APLICADAS A CUENCAS DE ALTA MONTAÑA EN COLOMBIA, desarrollado por Elizabeth Vera Camacho y Maira Lizeth Valderrama Corredor, en 2020, se indica que cuando el resultado del índice de Melton es superior a 0,5 se asume que es una microcuenca torrencial. Adicionalmente, presenta la interpretación del índice según diferentes autores:

Índice Melton: según Bertrand et al. 2013

Flujos detritos Me 0.29 – 1.71

Zona inicio flujo Me 0.1 a 0.9

Índice Melton: según Montoya et al., 2009

Drenaje torrencial 0,5

Índice Melton: según Wilford et al., 2004

Flujos detritos Me 0.26– 1.21

Zona inicio flujo Me 0.66 a 1.21

Inundación 0.08 a 0.49

RELACIÓN DEL RELIEVE

Schumm (1956) propuso el análisis del relieve de una cuenca a través de la relación de relieve, el cual permite la comparación entre cuencas a pesar de las diferencias de escala topográfica; además, es un parámetro usado para describir la movilidad de material desde su punto de inicio hasta su frente de disposición (Chen y Yu, 2011, mencionado en SGC, 2021). Este índice se define como la relación entre la diferencia de la cota máxima y mínima (relieve) [km] y la longitud de la cuenca [km] (Wilford et al., 2004, mencionado en SGC, 2021).

El rango de valores de la relación de relieve para cuencas que presentan flujos de detritos está entre 0,15 y 0,70 (Chen y Yu, 2011; de Scally et al., 2010; Khan et al., 2013, mencionados en SGC, 2021), mientras que para flujos hiperconcentrados se encuentra entre 0,21 y 0,22 (Ouellet y Germain, 2014). Para Colombia se encontraron valores entre 0,08 y 0,43 para cuencas con desarrollo de flujos de detritos, entre 0,08 y 0,27 para cuencas con flujos de lodos y entre 0,03 y 0,27 para cuencas con ocurrencia de flujos hiperconcentrados.

INTEGRAL HIPSOMÉTRICA

Este índice explica la distribución de elevaciones en un área dada del paisaje, particularmente una cuenca de drenaje (Wang et al., 2016). La integral hipsométrica es ampliamente usada para la caracterización de la actividad tectónica reciente (expresada mediante valores altos, p. ej., HI > 0,5). Además, este índice es usado para evaluar de forma general la susceptibilidad por avenidas torrenciales, ya que permite determinar la interacción entre la erosión y la tectónica reciente (SGC, 2021). Es definido como el área bajo la curva hipsométrica y se expresa así:

donde h_{max} es la elevación máxima en la cuenca de drenaje, h_{min} la elevación mínima y h_{mean} la elevación media de la cuenca. La HI puede caracterizarse para tres rangos: HI < 0,4 representa un

paisaje senil donde predominan los procesos de degradación; $0,4 < HI < 0,5$ se trata de un paisaje en equilibrio y $HI > 0,5$ dan cuenta de un paisaje juvenil con actividad tectónica reciente.

COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD

Este índice es un indicador de la erodabilidad lineal y la capacidad de descarga de una cuenca. Se determina a partir de la relación entre el número total de cursos de primer orden (N_{c1}) y el área total de la cuenca (A) (Camino et al., 2018, mencionado en SGC, 2021).

$$C_t = \frac{N_{c1}}{A} \quad \text{Ecuación 60}$$

A mayor número de cursos de primer orden y menor superficie, la torrencialidad de la cuenca será mayor (Camino et al., 2018; López y Romero, 1987). Debido a que los cursos de primer orden son de génesis erosiva, altos valores indican elevada susceptibilidad a la erosión, menores tiempo de llegada al pico y alta torrencialidad; en otras palabras, los cursos de orden 1 son los de mayor importancia en la generación de flujos torrenciales y de inundaciones aluvionales veloces (Busnelli y Horta, 2014, mencionados en SGC, 2021).

Los rangos propios para las cuencas colombianas se presentan de acuerdo con el tipo de flujo: flujo de detritos 0,38-26,90, flujo de lodos: 1,01-21,51 y flujos hiperconcentrados: 0,37-18,01.

GRADIENTE-LONGITUD DEL CANAL (SL)

Se define como el producto de la pendiente del canal en un punto y la longitud del canal medido a lo largo de la corriente más larga sobre el punto dado (Hack, 1973, mencionado en SGC, 2021). El índice de gradiente-longitud de la corriente (SL, por su sigla en inglés) permite identificar desviaciones a partir de perfiles longitudinales y señala knickpoints/knickzones donde el gradiente de la corriente muestra valores anómalos (Piacentini et al., 2020, mencionado en SGC, 2021). El índice SL es sensible a los cambios de pendiente, por tanto, permite la evaluación de relaciones entre: actividad tectónica, resistencia de la roca y la topografía.

ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A EVENTOS TORRENCIALES (IVET)

Existen múltiples factores para la calificación de una cuenca torrencial, principalmente 3 características. La primera relacionada con los parámetros morfométricos propios de una cuenca, la segunda con los factores geológicos y geomorfológicos regionales, la tercera los factores climáticos, como lluvias intensas en un tiempo corto, las cuales desencadenan estos fenómenos (CORNARE,

2012, mencionado en Vera y Valderrama, 2020). Las principales características son: Cuencas jóvenes y pequeñas, Cuencas en regiones montañosas y escarpadas, Alta pendiente del canal central y de la pendiente media de la cuenca, Cuencas con valles o cañones estrechos en V, Gran capacidad de socavación e incisión del cauce, Abundante material detrítico para arrastrar, Capacidad de transporte de material, Gran variabilidad del caudal máximo y mínimo en la cuenca, Variaciones extremas en los valores pico de precipitación, Alta susceptibilidad ante procesos de remoción en masa.

En los lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua – ERA, realizado por el instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM; se encuentra el Índice de Vulnerabilidad a Eventos Torrenciales (IVET) el cual fue desarrollado con el fin de delimitar áreas que pueden verse afectadas por eventos de origen torrencial, identificando cuencas con alta susceptibilidad (IDEAM, 2013, mencionado en Vera y Valderrama, 2020). La vulnerabilidad se expresa en relación con los índices morfométricos de torrencialidad e índice de variabilidad, de acuerdo con lo dispuesto por el IDEAM, 2013.

El Índice morfométrico de torrencialidad es la relación entre los parámetros morfométricos como el coeficiente de compacidad o de forma, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales son indicativos de la forma como se concentra la esorrentía, la oportunidad de infiltración, la velocidad y capacidad de arrastre de sedimentos en una cuenca, la eficiencia o rapidez de la esorrentía y de los sedimentos para salir de la cuenca luego de un evento de precipitación y con ello inferir cuál podría ser el nivel de susceptibilidad a procesos torrenciales (Rivas y Soto, 2009).

El Índice de variabilidad muestra el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca definiendo una cuenca torrencial como aquella que presenta una mayor variabilidad, es decir, donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan y los valores máximos.

Para categorizar el índice morfométrico se tiene en cuenta 3 variables morfométricas; la densidad de drenaje, la pendiente media de la cuenca y el coeficiente de compacidad o de forma, estableciendo categorías o rangos con valores promedio, mientras mayores sean estos valores, mayor tendencia a que en la cuenca se presenten procesos torrenciales. En la Tabla 10 se muestran los rangos de la clasificación de los parámetros. En la Tabla 10 se relaciona las variables según las categorías del índice morfométrico que van desde muy alta hasta muy baja, en función de los parámetros indicados.

Tabla 10. Relaciones para categorizar el índice morfométrico (IDEAM, 2013).

Índice morfométrico	Escala	Área de cuenca (km ²)	Categoría				
			1	2	3	4	5
	1:10.000	<15	<1,50	1,51 – 2.00	2,01 – 2.50	2,51 – 3,00	> 3

Índice morfométrico	Escala	Área de cuenca (km ²)	Categoría				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1:25.000	16 a 50	<1,20	1,21 – 1,80	1,81 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
	1:100.000	>50	<1,00	1,01 – 1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	> 2,5
			Baja	Media	Media a Alta	Alta	Muy Alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10.000	<15	<20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	>75
	1:100.000	>50	<15	16 – 30	30 – 45	46 – 65	>65
			Accidentado	Fuerte	Muy Fuerte	Escarpado	Muy Escarpado
Coeficiente de compacidad			<1,625	1,376 – 1,500	1,251 – 1,375	1,126 – 1,250	1,00 – 1,125
			Oval-oblonga a rectangular-oblonga		Oval-redonda a oval-oblonga		Casi redonda a oval-redonda

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Tabla 11. Relaciones entre variables para el índice morfométrico (IDEAM, 2013).

		Pendiente Media de la Cuenca						
		1	2	3	4	5		
Densidad de Drenaje	1	111	121	131	141	151	1	Coeficiente de Forma
		112	122	132	142	152	2	
		113	123	133	143	153	3	
		114	124	134	144	154	4	
		115	125	135	145	155	5	
	2	211	221	231	241	251	1	
		212	222	232	242	252	2	
		213	223	233	243	253	3	
		214	224	234	244	254	4	
		215	225	235	245	255	5	
	3	311	321	331	341	351	1	
		312	322	332	342	352	2	
		313	323	333	343	353	3	
		314	324	334	344	354	4	
		315	325	335	345	355	5	
	4	411	421	431	441	451	1	
		412	422	432	442	452	2	
		413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
	5	511	521	531	541	551	1	

Pendiente Media de la Cuenca					
1	2	3	4	5	
512	522	532	542	552	2
513	523	533	543	553	3
514	524	534	544	554	4
515	525	535	545	555	5

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Una condición muy alta para el índice morfométrico corresponde a áreas que se caracterizan por ser inestables y potencialmente inestables, que responden rápida y violentamente a lluvias de alta intensidad y corta duración, generando avenidas torrenciales de forma frecuente. La categoría alta muestra áreas con una respuesta hidrológica rápida con una cobertura de suelo que permite procesos torrenciales que se presentan frecuentemente en periodos lluviosos. La condición media, en cambio, presenta una respuesta a procesos hidrológicos de moderada a rápida y los eventos se presentan generalmente en las épocas de las mayores precipitaciones al año (IDEAM, 2013, mencionado en Vera y Valderrama, 2020).

Índice de variabilidad de caudales: Describe el comportamiento de los caudales en una determinada cuenca donde existen diferencias grandes entre los caudales mínimos que se presentan y los valores máximos, por medio de la ecuación se logra obtener un resultado el cual se clasifica en la Tabla 12 (IDEAM, 2013, mencionado en Vera y Valderrama, 2020).

$$\text{Índice_variabilidad} = \frac{\log(Q_i) - \log(Q_f)}{\log(x_i) - \log(x_f)} \quad \text{Ecuación 61}$$

Donde: Q_i y Q_f = Dos caudales tomados de la curva de duración de caudales y x_i y x_f = Porcentajes de tiempo en que se exceden los caudales Q_i y Q_f .

Tabla 12. Clasificación del índice de variabilidad (IDEAM, 2013).

Índice de variabilidad	Vulnerabilidad
<10°	Muy baja
10,1° - 37°	Baja
37,1° - 47°	Media
47,1° - 55°	Alta
>55°	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2013

Cálculo de Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET): Se determina con una matriz de correlación entre el índice morfométrico de torrencialidad y el índice de variabilidad de caudales de la dada en la Tabla 13.

Tabla 13. Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales - IVET (IDEAM, 2013).

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy alta
Muy baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy alta	Muy alta
Muy alta	Media	Alta	Alta	Muy alta	Muy alta

Fuente: IDEAM, 2013

En el proceso del cálculo del Índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales – IVET, se utilizó el cálculo del índice de variabilidad de las principales cuencas que hacen parte del territorio evaluado y que fueron presentadas dentro del documento: PLAN DE ORDENACIÓN Y MANEJO DE LA CUENCA DEL RÍO ABURRÁ – POMCA, desarrollado por la empresa CAP INGENIERÍA S.A.S. para CORANTIOQUIA – CORNARE – ÁREA METROPOLITANA DEL VALLE DE ABURRÁ – AMVA, y para el MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, en el año 2018. Posteriormente y teniendo en consideración las características morfométricas de las cuencas, se realizó el cálculo y clasificación del índice morfométrico para la estimación final del Índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales – IVET, indicado utilizado en la clasificación y priorización de cuencas dentro del estudio básico de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el distrito de Medellín.

Como anotación final, el estudio hidrológico será realizado de forma integral mediante el análisis conjunto de las diferentes cuencas priorizadas tanto para la evaluación hidrológica como hidráulica, incluyendo el informe definitivo que cuenta con todos los análisis y resultados obtenidos.

3.1.2.2 Estudio Hidráulico

El estudio hidráulico busca evaluar los cambios de las variables hidráulicas a través de los canales de los drenajes localizados en el territorio de interés. Para ello se implementarán los caudales de diseños que serán calculados en el estudio hidrológico de las cuencas, teniendo como caudal de diseño el estimado para el periodo de retorno de 100 años para el caso de la amenaza por inundación. Para el caso de avenidas torrenciales, se tendrá en cuenta las recomendaciones dadas dentro del documento: GUÍA METODOLÓGICA PARA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana en 2021. En este aspecto, es necesario considerar los caudales líquidos complementados

con el volumen sólido generado por el transporte de sedimentos y que incrementa el volumen total que transita en el tramo de interés y en especial, para un evento torrencial.

Por ello, se asumirá como caudales en el análisis de torrencialidad, el caudal líquido previamente indicado con una mayoración en 40%. en consideración de lo planteado en documentos como POMCA ABURRÁ, 2006 y POMCA del río Aburrá 2018, entre otros, que indican que la carga de sedimentos en un flujo tipo torrencial, tiende a alcanzar un máximo de 40% adicional al caudal líquido.

En este análisis se realizará el cálculo hidráulico para los diferentes caudales de diseño, teniendo como prioridad en la zonificación de la amenaza por inundación a los caudales líquidos para los periodos de retorno de 25 y 100 años y para avenidas torrenciales a los caudales con periodos de retorno de 25, 100 y 500 años incrementados por el volumen de sedimentos, aumentando el 40% a los caudales líquidos.

Es de indicar que el incremento de los caudales sólidos en dicho porcentaje también ha sido recomendado en los lineamientos definidos dentro del Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Lineamientos Metropolitanos para la Elaboración de Estudios Geológicos, Geomorfológicos, Hidráulicos, Hidrológicos y Geotécnicos y se Dictan Otras Disposiciones para la Prevención del Riesgo en Construcción en Laderas – “Código de Laderas”: (...) *Estimar, mediante al menos cuatro métodos, la creciente de diseño para los períodos de retorno de 2.33, 10, 25, 50, 100 y 500 años... De acuerdo con lo establecido en el Plan de Manejo y Ordenación de la Cuenca del Río Aburrá, POMCA, para cauces con características torrenciales, los caudales obtenidos para un periodo de retorno de 100 años deben ser mayorados en un 40%. Para el análisis de ocurrencia de caudales máximos en cauces, es crítica una adecuada definición del período de retorno. Se deben adoptar los criterios definidos en el POMCA del río Aburrá y los POMCA o PIOM de las cuencas secundarias que los tengan. Los periodos de retorno de los caudales para la delimitación de zonas de inundación deben ser: ... Determinación de zonas de inundación asociada a amenaza hídrica alta, periodo de retorno de 100 años. Para cauces torrenciales se debe mayorar un 40%. Determinación de zonas de inundación asociada a una amenaza hídrica moderada, periodo de retorno de 500 años (...).* Estas consideraciones son tenidas en cuenta dentro del análisis hidráulico de la corriente de interés, especialmente en cuanto a la definición de la mancha por fenómeno de inundación y avenidas torrenciales.

Se presentará la evaluación hidráulica del sistema fluvial para un escenario actual, información base para el diseño y recomendaciones desde los aspectos hidráulicos. Este análisis será realizado mediante la implementación del software HEC RAS v 6.7 (1D/2D). Evaluadas las particularidades de cada uno de los tramos de análisis, se puede definir el tipo de evaluación hidráulica, sea unidimensional o bidimensional.

3.1.2.2.1 Información Básica

MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL

Para adelantar el análisis hidráulico, se utilizará el software HEC RAS en su versión 6.7, la cual permite analizar el comportamiento del flujo en dos dimensiones - 2D. Este tipo de modelos y su consideración física, está basada en una superficie o terreno de referencia por lo cual, no se requiere ingresar dentro del modelo hidráulico ningún tipo de secciones transversales que defina la geometría del canal en cuanto al cauce, márgenes y pendiente en el lecho de la corriente, toda vez que el modelo calcula el desplazamiento del agua a partir de las celdas que se representan por el terreno o modelo digital de elevación.

En este análisis, y según los resultados del modelo hidráulico, se podrá determinar sobre la necesidad de usar algún tramo en 1D a partir de secciones transversales con el fin de mejorar los resultados en la modelación, considerando información que definan el canal y márgenes de las corrientes, y así construir la base geométrica para el modelo hidráulico. De acuerdo con la información disponible y a suministrar por parte del municipio de Medellín, se cuenta con un levantamiento LIDAR ("*Light Detection and Ranging*") el cual permitió la construcción de un modelo digital del terreno de 2,0 m x 2,0 m de tamaño de píxel, información base que permite el análisis de la amenaza a una escala más detallada que la definida para el tipo de estudios dentro del decreto nacional 1077 de 2015.

Es importante mencionar que el DEM para el análisis Hidrológico e hidráulico difiere del DEM utilizado para el componente de amenaza por movimientos en masa, esto se debe a que para el componente de Inundación y avenidas torrenciales es necesario analizar la totalidad de la superficie de las cuencas priorizadas, que en este caso toma áreas por fuera del distrito de Medellín.

CAUDALES DE DISEÑO

Los resultados del estudio hidrológico serán insumo para la modelación hidráulica, con relación a los caudales con periodos de retorno de 2,33, 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para esto se tendrán en cuenta las recomendaciones dadas en GUÍA METODOLÓGICA PARA ZONIFICACIÓN DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES, desarrollado por el Servicio Geológico Colombiano y la Pontificia Universidad Javeriana en 2021, en cuanto a la determinación de los caudales para los periodos de retorno de 300 y 500 años, en el proceso de análisis de avenidas torrenciales.

3.1.2.2.2 Diagnóstico – Evaluación condiciones existentes

La modelación del tránsito hidráulico de caudales máximos es realizada utilizando el programa HEC-RAS versión 6.7 (*U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center, 2002 a*), desarrollado por el *U.S. Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering*. El software requiere como datos de

entrada las condiciones de borde, la geometría o terreno, el valor de rugosidad de Manning n y los caudales de diseño, solucionando a través de elementos finitos para la solución del movimiento del agua en dos dimensiones – 2D. Las profundidades de flujo también se calculan a partir del método estándar por pasos para el modelado 1D y como resultado del modelo se obtiene la superficie libre del agua asociada a una condición de caudal impuesta que puede variar a lo largo del cauce.

En primer lugar, se realiza la calibración del modelo hidráulico la cual consiste en ajustar los diferentes parámetros de entrada al modelo y así poder realizar la evaluación de las condiciones reales de las corrientes de interés, es decir, que la situación modelada en HEC-RAS, represente las condiciones y evidencias del tránsito del flujo a través del canal de la corriente. Para ello, se realiza la estimación del coeficiente de rugosidad de Manning y se evaluará el comportamiento de los caudales de diseño calculados en el estudio hidrológico y que los mismos representen el flujo de crecientes al interior del canal de la corriente.

El estudio busca analizar el comportamiento de los caudales máximos, generando la mancha de inundación para el escenario actual y evaluar la incidencia de la corriente en todo el tramo colindante con el suelo del distrito de Medellín, análisis que evalúa la amenaza por inundación y avenidas torrenciales como parte de los estudios básicos de amenaza para ser integrados en el desarrollo en el componente de ordenamiento del distrito.

Para la simulación hidráulica, se agruparon los ejes de las cuencas priorizadas en diferentes modelos, basados en los tiempos computacionales de cada uno; este tiempo se buscó optimizar una vez se contó con mallados y pasos de tiempo que lograran la estabilidad numérica, por lo cual la segmentación de los tramos de simulación obedece a una condición técnica de capacidad computacional, garantizando en lo posible que se lograran simular las condiciones de las confluencias entre cuencas subsiguientes.

Los modelos implementados comparten en su mayoría las características de simulación, tales como tamaño de celdas, pasos de tiempo, condiciones de frontera (hidrógrafas, niveles de descarga), mientras que los coeficientes de Manning se asignaron según la capa de coberturas y usos de suelo, tal y como se describe en el documento del EBA.

3.1.2.2.3 Descripción del Modelo Hidráulico

HEC-RAS (*Hidrológica Engineering Center's River Analysis System*), es un programa de dominio público, desarrollado por el Centro de Ingeniería Hidrológica del cuerpo de ingenieros de la armada de los EE.UU. (US Army Corps of Engineers), y surge como evolución del conocido HEC-2, con varias mejoras respecto a éste, entre las que destaca la interfaz gráfica de usuario que facilita las labores de preproceso y postproceso, así como la posibilidad de intercambio de datos con los Sistemas de Información Geográfica mediante la extensión HEC-GeoRAS.

El principal objetivo del programa HEC-RAS, es el de calcular la elevación de la superficie de la lámina de agua para un caudal y condiciones de flujo dadas, (flujo permanente o estacionario), aunque HEC-RAS también puede ser empleado para movimientos transitorios, (no permanentes) unidimensionales, y recientemente para el cálculo del transporte de sedimentos. El modelo HEC - RAS es capaz de simular condiciones hidráulicas para flujos gradualmente variados en régimen permanente y no permanente y en redes de drenajes naturales y artificiales, estima tasas de transporte de sedimentos para lecho móvil y permite realizar modelación de variables de calidad de agua.

El procedimiento básico computacional del software está basado en la solución numérica de la ecuación de energía unidimensional (modelo 1D), las pérdidas de energía son evaluadas a partir de ecuaciones de coeficientes de rugosidad del lecho (número de Manning) y a partir de coeficientes de contracción y expansión del flujo (coeficientes que se multiplican al cambio en la cabeza de velocidad). La ecuación de momentum es empleada en situaciones donde el perfil de la lámina de agua está relacionado a un flujo rápidamente variable. Esas situaciones incluyen: régimen de flujo mixto (resaltos hidráulicos), flujo a través de puentes y comportamiento hidráulico del flujo en confluencias.

El módulo de transporte de sedimentos del HEC - RAS, realiza simulaciones de este transporte en lecho móvil, siendo capaz de reproducir procesos morfodinámicos como erosión del lecho y deposición de material en el mismo. El transporte de sedimentos potencial es estimado por tamaño del sedimento, permitiendo establecer procesos de gradación del material del lecho (*sorting*) y de acorazamiento (*armoring*).

El modelo es capaz de simular procesos de transporte en redes de canales, en canales con procesos de dragado, entre otros, utilizando para ello distintas ecuaciones para el cálculo del transporte de sedimentos.

LIMITACIONES DE HEC – RAS

El empleo de HEC-RAS, para la resolución de problemas hidráulicos, implica la conocer las limitaciones en el marco de su aplicación. Hay que entender que una solución calculada a través de HEC-RAS no es una única solución real, sino que muestra un posible resultado. En este instante intervienen con fuerza los conocimientos hidráulicos del modelador para lograr una correcta interpretación de los resultados.

En la aplicación de HEC-RAS podemos encontrar las siguientes limitaciones más relevantes:

- La ecuación de la energía supone siempre distribución hidrostática de presiones. Entonces la solución es una simplificación, y será adecuada cuando la distribución de presiones no se aleje mucho de la hidrostática.

- HEC-RAS inicialmente es un modelo unidimensional, por lo que la posible solución es una aproximación a la real. Actualmente, se dispone de una versión 2D, la cual será explicada más adelante.
- Solo se pueden modelar cauces con pendientes menores de 10%, al no tener en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua ($\cos(\alpha)$) en las ecuaciones. Para el análisis 2D, se han mejorado las características en la solución de problemas con mayores pendientes.
- Dificultades en la elección del calado crítico en secciones complejas, (terrazas fluviales). Por defecto es seleccionada una profundidad menor.
- Siempre ofrece una solución, por lo que se debe ser crítico ante el resultado obtenido.

ECUACIONES GOBERNANTES

Para el modelo 1D, los perfiles de la superficie del agua son estimados entre secciones resolviendo la ecuación de energía con un procedimiento iterativo denominado “*Standard Step Method*”. La ecuación de la energía se presenta a continuación:

$$Z_2 + Y_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \quad \text{Ecuación 62}$$

Dónde:

Z_1, Z_2 son las cotas del fondo del lecho entre secciones

Y_1, Y_2 es la profundidad del agua en las secciones transversales

V_1, V_2 son las velocidades promedio en las secciones

α_1, α_2 son coeficientes de peso para las velocidades

g es la aceleración de la gravedad

h_e es la cabeza de pérdidas de energía

La cabeza de pérdidas de energía (h_e) entre dos secciones, comprende las pérdidas por fricción y pérdidas por contracción y expansión. La ecuación para la cabeza de pérdidas de energía se muestra a continuación:

$$h_h = L \overline{S_f} + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad \text{Ecuación 63}$$

Dónde,

~~L es el caudal ponderado para el tramo entre secciones~~

~~Sf es la pendiente de fricción representativa entre dos secciones~~

~~C es el coeficiente de pérdida por expansión o contracción~~

~~El caudal ponderado para el tramo entre secciones, L, es calculado como:~~

$$L = \frac{L_{lob} \overline{Q_{lob}} + L_{ch} \overline{Q_{ch}} + L_{rob} \overline{Q_{rob}}}{\overline{Q_{lob}} + \overline{Q_{ch}} + \overline{Q_{rob}}} \quad \text{Ecuación 64}$$

Donde,

~~Llob, Lch, Lrob son las longitudes entre secciones por el centro, margen izquierda y margen derecha, respectivamente.~~

~~Qlob, Qch, Qrob son los promedios aritméticos de los caudales por el centro del cauce y en ambas orillas (izquierda y derecha).~~

PÉRDIDAS POR FRICCIÓN

Las pérdidas por fricción son evaluadas en HEC - RAS como el producto de Sf y L, donde Sf es la pendiente de fricción representativa para un tramo y L está definido por la ecuación anterior. La pendiente por fricción o friccional (pendiente de la línea de energía) en cada sección transversal es calculada de la ecuación de Manning de la siguiente manera:

$$S_f = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 \quad \text{Ecuación 65}$$

Donde K es la “conveyancia o transportabilidad” total de la sección transversal.

MODELO EN DOS DIMENSIONES, 2D – HEC RAS V 6.7

HEC-RAS puede realizar cálculos hidrodinámicos bidimensionales (2D) dentro de la parte de análisis de flujo inestable del software. Se puede realizar el análisis de flujo inestable unidimensional (1D), flujo inestable bidimensional (2D) (ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o ecuaciones de onda de difusión (DWE)), así como también un modelo combinado de flujo inestable 1D y 2D. Las áreas de flujo 2D en HEC-RAS se pueden utilizar de varias formas.

Las capacidades de análisis de flujo 2D en HEC-RAS se han desarrollado para permitir realizar modelado 2D o 1D / 2D combinado. El algoritmo de modelado de flujo 2D en HEC-RAS tiene las siguientes capacidades:

1. Puede realizar modelado 1D, 2D y combinado 1D y 2D. HEC-RAS puede realizar modelado 1D, modelado 2D (sin elementos 1D) y modelado combinado 1D y 2D. La capacidad de realizar un modelado 1D / 2D combinado dentro del mismo modelo de flujo inestable permitirá trabajar en sistemas fluviales más grandes, utilizando modelado 1D cuando sea apropiado (por ejemplo: el sistema fluvial principal) y modelado 2D en áreas que requieren un nivel superior de evaluación hidrodinámica.
2. Ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o Ecuaciones de onda de difusión (DWE) en 2D. El programa resuelve las ecuaciones 2D de aguas poco profundas (con adiciones de impulso opcionales para turbulencia, fuerzas del viento, flujos de lodo y escombros y efectos de Coriolis) o las ecuaciones de onda de difusión 2D. Esto es seleccionable, lo que brinda más flexibilidad. En general, las ecuaciones de onda de difusión 2D permiten que el software se ejecute más rápido y tenga mayores propiedades de estabilidad. Las ecuaciones 2D de aguas poco profundas son aplicables a una gama más amplia de problemas. Sin embargo, muchas situaciones de modelado se pueden modelar con precisión con las ecuaciones de onda de difusión 2D. Debido a que se pueden cambiar fácilmente entre conjuntos de ecuaciones, cada uno puede probarse para cualquier problema dado para ver si el uso de las ecuaciones 2D de aguas poco profundas está justificado sobre las ecuaciones de onda de difusión.
3. Algoritmo implícito de solución de volumen finito. El solucionador de ecuaciones de flujo inestable 2D utiliza un algoritmo de volumen finito implícito. El algoritmo de solución implícito permite pasos de tiempo computacional más grandes que los métodos explícitos. El método de volumen finito proporciona un incremento de estabilidad y robustez mejoradas sobre las técnicas tradicionales de diferencia y elementos finitos. La “mojada” o “secada” de las celdas 2D es muy robusta. Las áreas de flujo 2D pueden comenzar a secarse por completo y soportar una repentina avalancha de agua en el área. Además, el algoritmo puede manejar regímenes de flujo subcrítico, supercrítico y mixto (flujo que pasa a través de una profundidad crítica, como un salto hidráulico) sin ninguna opción especial para encender.
4. Mallas computacionales estructuradas o no estructuradas. El software fue diseñado para utilizar mallas computacionales no estructuradas, pero también puede manejar mallas estructuradas. Una malla estructurada se trata de la misma manera que una malla no estructurada. El software asume que las celdas son ortogonales entre sí (la cara entre dos

celdas es perpendicular a una línea que conecta los dos centros de las celdas). Asumir ortogonalidad simplifica algunos de los cálculos necesarios y mejora la velocidad de cálculo. Esto significa que las celdas computacionales pueden ser triángulos, cuadrados, rectángulos o incluso elementos de cinco y seis lados (el modelo está limitado a elementos con hasta ocho lados). La malla puede ser una mezcla de formas y tamaños de celdas. El límite exterior de la malla computacional se define con un polígono. Las celdas computacionales que forman el límite exterior de la malla pueden tener líneas multipunto muy detalladas que representan la (s) cara (s) exterior (es) de cada celda.

5. Tablas detalladas de propiedades hidráulicas para celdas computacionales 2D y caras de celdas. Dentro de HEC-RAS, las celdas computacionales no deben tener un fondo plano, y las caras / bordes de las celdas no tienen que ser una línea recta, con una sola elevación. En cambio, cada celda computacional y cada cara de celda se basa en los detalles del terreno subyacente. Este tipo de modelo a menudo se denomina en la literatura un “modelo de subcuadrícula de alta resolución” (Casulli, 2008). El término "subcuadrícula" significa que utiliza el terreno subyacente detallado (subcuadrícula) para desarrollar las tablas de propiedades geométricas e hidráulicas que representan las celdas y las caras de las celdas. HEC-RAS tiene un preprocesador de área de flujo 2D que procesa las celdas y las caras de las celdas en tablas detalladas de propiedades hidráulicas basadas en el terreno subyacente utilizado en el proceso de modelado. Por ejemplo, considere un modelo construido a partir de un modelo de terreno detallado (resolución de celda de cuadrícula de 2 pies) con un tamaño de celda de cálculo de 200x200 pies. El preprocesador de área de flujo 2D calcula una relación elevación-volumen, basada en los datos detallados del terreno (Cuadrícula de 2 pies), dentro de cada celda. Por lo tanto, una celda se puede mojar parcialmente con el volumen de agua correcto para la elevación de la superficie del agua dada (WSEL) según los datos de la cuadrícula de 2 pies.

Además, cada cara de la celda computacional se evalúa de manera similar a una sección transversal y se procesa previamente en tablas detalladas de propiedades hidráulicas (elevación versus - perímetro mojado, área, rugosidad, etc.). El flujo que se mueve a través de la cara (entre celdas) se basa en estos datos detallados. Esto permite al modelador utilizar celdas computacionales más grandes, sin perder demasiados detalles del terreno subyacente que gobierna el movimiento del flujo. Además, la ubicación de las caras de las celdas a lo largo de la parte superior de las características del terreno de control (carreteras, terreno elevado, muros, etc.) puede mejorar aún más los cálculos hidráulicos utilizando menos celdas en general. El efecto neto de las celdas más grandes es un menor número de cálculos, lo que significa tiempos de ejecución mucho más rápidos.

A continuación, se muestra una lista de las características que complementan la aplicación del modelo de HEC-RAS 6.7:

- Precipitación espacial e infiltración para áreas 2D, almacenamiento y tramos de ríos 1D. Puente hidráulico dentro de áreas de flujo 2D. Esta opción permite diseñar un puente dentro de un área de flujo 2D. Herramientas de edición HECRAS Mapper para todas las funciones de HEC-RAS.
- Solucionador de volúmenes finitos 1D. Fuerzas de viento según HEC-RAS 1D y 2D. Mejoras en la velocidad computacional para 2D. Las nuevas bibliotecas DSS7 permiten: archivos de mayor tamaño; lecturas / escrituras más rápidas; Pasos de tiempo más pequeños (puede bajar a un paso de tiempo de 1 segundo para los hidrogramas DSS. Mejoras en las estaciones de bombeo en áreas 2D.
- Nuevo trazador de hidrógrafo. Visor de gráficos / animación 3D. Calculadora de ráster en HEC-RAS Mapper. Herramientas de modificación del terreno. Mejoras en las herramientas de generación de cuadrículas / mallas.
- Nuevo tipo de condiciones iniciales para áreas 2D. Solucionadores de matrices iterativos, para una velocidad computacional 2D mejorada. Nuevo solucionador 2D de ecuaciones de aguas poco profundas en HEC-RAS. Nuevos métodos de modelado de turbulencias. Opción de fluidos no newtonianos para 1D y 2D (es decir, modelado de flujo de lodo y escombros).
- Cálculos de transporte de sedimentos 2D (transporte, erosión y deposición para modelado 2D). Nuevas características de sedimentos 1D. Nuevos cálculos de la calidad del agua.

En general, la geometría que conforma el desarrollo de un modelo 2D, se elabora a partir del aplicativo RAS Mapper implícito dentro del modelo HEC RAS, el cual permite ingresar el terreno o superficie base para el desarrollo hidráulico, así como coberturas vegetales – n de Manning, secciones transversales o perfiles, capas activas para el transporte de sedimentos, entre otros. Es a partir de dicho aplicativo, que se revisan y extraen los resultados obtenidos por el modelo al implementar un análisis 2D.

ANÁLISIS FLUJOS TORRENCIALES EN HEC RAS (FLUJO DE LODOS Y FLUJOS DE ESCOMBROS)

El fenómeno de erosión en masa incluye el desprendimiento, transporte y deposición de grandes masas de suelo por acción del agua. Las masas en movimiento se comportan como un fluido, pero su comportamiento es diferente al de los flujos de sedimentos especialmente debido a la alta concentración de sólidos. A estos movimientos se les denomina genéricamente como flujos o avenidas torrenciales (Suárez, 2001).

El módulo de Lodo y Escombros de HEC-RAS utiliza *DebrisLib* (Floyd et al., 2019) para considerar las pérdidas internas que afectan a estos flujos de alta concentración y aplica modelos no newtonianos en HEC-RAS. Existe una variedad de enfoques para simular fluidos no newtonianos, incluyendo enfoques monofásicos y multifásicos. Las capacidades actuales de HEC-RAS utilizan enfoques monofásicos, que modelan el comportamiento del fluido con modelos reológicos (es decir,

relaciones tensión-deformación). HEC-RAS puede incorporar efectos no newtonianos en cualquier simulación de flujo inestable, tanto unidimensional como bidimensional.

Los términos, variables y parámetros del editor no newtoniano cambian según el método seleccionado. Seleccione primero el método no newtoniano para activar los campos y métodos correspondientes. El método predeterminado es "Supuestos Newtonianos", lo que significa que HEC-RAS utiliza las ecuaciones estándar de "agua clara" y no aplica ningún método no newtoniano.

Dentro del programa HEC RAS, pueden realizarse simulaciones de flujos de lodos o flujos de escombros a partir de los métodos de Bingham, O'Brien (cuadrática) y Herschel-Bulkley. En este procedimiento, también puede utilizarse el método *Only Bulking*, el cual no corresponde a un método de fluido no newtoniano y solo corresponde al incremento del volumen sin generar deformaciones en el fluido.

La ecuación de Bingham se aplica frecuentemente a flujos hiperconcentrados y flujos de lodo. En teoría, estos flujos de menor concentración se ajustan mejor al modelo lineal. Sin embargo, su formulación relativamente simple facilita su calibración. La menor cantidad de parámetros libres la hace menos vulnerable a problemas de equifinalidad. Por ello, se ha aplicado con éxito a flujos de detritos de mayor concentración en aplicaciones de laboratorio y de campo. El modelo de Bingham solo requiere dos datos de entrada: el límite elástico (la intersección de la relación tensión-deformación) y la viscosidad con sedimentos (la pendiente de la relación tensión-deformación).

En el análisis de avenidas torrenciales para la determinación de la amenaza por este fenómeno natural, también será utilizado el módulo de no newtonianos en HEC-RAS mediante el uso de parámetros referenciados en la literatura para condiciones sedimentológicas similares a la del territorio de interés, con el fin de permitir una adecuada representación de niveles y velocidades de una avenida torrencial. Este análisis hace parte del método de mayoración de los caudales líquidos como lo recomienda el Acuerdo Metropolitano 009 de 2012 – Código de Laderas y el POMCA, 2006, como incremento en el caudal líquido por la presencia de sólidos, también recomendación realizada en SGC, 2021, dentro del proceso de estimación de la amenaza por avenidas torrenciales.

3.1.2.2.4 Parámetros de entrada Modelo 2D

COEFICIENTE DE RUGOSIDAD

Los coeficientes de resistencia al flujo uniforme en canales de lecho rígido se encuentran tabulados en muchos libros clásicos de hidráulica (Chow, 1994). En canales de lecho móvil, además de la rugosidad que ofrecen las paredes y el lecho, es necesario considerar la rugosidad que ofrecen las formas del lecho (rizos, dunas, etc.). El coeficiente de rugosidad es un parámetro que depende básicamente de:

La profundidad de flujo (controlada por el caudal).

El sedimento transportado.

Los escombros flotantes.

El tamaño del material del lecho.

El tipo, extensión y distribución de la vegetación de las bancas.

La temperatura del agua.

En realidad, el coeficiente de rugosidad de Manning (n) es muy variable y depende de un cierto número de factores, como lo es la rugosidad del material superficial, las macro rugosidades del canal, la vegetación, el alineamiento del canal y las posibles obstrucciones (Chow, Maidment, & Mays, 1994). A partir del reconocimiento de varios factores primordiales que afectan el coeficiente de rugosidad, Chow (Chow, Maidment, & Mays, 1994) propone que se calcule según la expresión de Cowan (mencionado en Chow, 1994):

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot m \quad \text{Ecuación 66}$$

donde n_0 es un valor básico de n para un canal recto, uniforme y liso en los materiales naturales involucrados, n_1 es un valor que debe agregarse al n_0 para corregir el efecto de las rugosidades superficiales, n_2 es un valor para considerar las variaciones en forma y tamaño de la sección transversal del canal, n_3 es un valor para considerar las obstrucciones, n_4 es un valor para considerar la vegetación y las condiciones de flujo, y m es un factor de corrección de los efectos por meandros en el canal. Los valores apropiados de n_0 a n_4 y m pueden seleccionarse de la Tabla 8, de acuerdo con las condiciones dadas.

Tabla 14. Valores para el cálculo de los coeficientes de rugosidad de Manning (Chow et al., 1994).

Condiciones del Canal		Valores	
Material involucrado	Tierra	n_0	0,020
	Corte en roca		0,025
	Grava fina		0,024
	Grava gruesa		0,028
Grado de irregularidad	Suave	n_1	0,000
	Menor		0,005
	Moderado		0,010
	Severo		0,020
Variaciones de la sección transversal	Gradual	n_2	0,000
	Ocasionalmente alternante		0,005
	Frecuentemente alternante		0,010-0,015
Efecto relativo de las obstrucciones	Insignificante	n_3	0,000
	Menor		0,010-0,015
	Apreciable		0,020-0,030
	Severo		0,040-0,060

Condiciones del Canal		Valores	
Vegetación	Baja	n_4	0,005-0,010
	Media		0,010-0,025
	Alta		0,025-0,050
	Muy alta		0,050-0,100
Grado de los efectos por meandros	Menor	m	1.000
	Apreciable		1,15
	Severo		1,3

Fuente: Adaptado de Chow et al., 1994

Los valores n_0 seleccionados o calculados a partir de la ecuación de (Limerinos, 1970) por ejemplo, son para canales rectos de forma transversal casi uniforme. Las irregularidades del canal, la alineación, las obstrucciones, la vegetación y los meandros aumentan la rugosidad de un canal. El valor de n debe ajustarse en consecuencia agregando incrementos de rugosidad al valor base, n_0 , para cada condición que aumente la rugosidad. La Tabla 14, modificada de Aldridge y Garrett (1973), proporciona rangos de ajustes para los factores que afectan la rugosidad del canal para las condiciones prevalecientes del canal.

Se debe tener en cuenta la profundidad de flujo al seleccionar valores n para los canales. Si la profundidad del flujo es superficial en relación con el tamaño de los elementos de rugosidad, el valor n puede ser grande. El valor n disminuye a medida que aumenta la profundidad, excepto cuando las bancas de canales son mucho rugosas que el lecho (George et al, 1989).

Irregularidad n_1

Cuando la proporción de ancho a profundidad es pequeña, la rugosidad causada por las bancas erosionadas, los puntos de proyección y las raíces de árboles expuestas a lo largo de las bancas se deben explicar mediante ajustes bastante grandes. Chow (1959) y Benson y Dalrymple (1967) demostraron que las bancas severamente erosionadas pueden aumentar los valores de n hasta en 0.02. Es posible que se requieran ajustes mayores para bancas muy grandes e irregulares que tienen puntos de proyección.

Variaciones en la Sección del Canal n_2

El valor de n no se ve afectado significativamente por cambios relativamente grandes en la forma y el tamaño de las secciones transversales si los cambios son graduales y uniformes. Una mayor rugosidad está asociada con la alternancia de secciones transversales grandes y pequeñas y curvas pronunciadas, contracciones y desplazamiento lateral del canal de aguas bajas. El grado del efecto de los cambios en el tamaño del canal depende principalmente del número de alternancias de secciones grandes y pequeñas y, en segundo lugar, de la magnitud de los cambios.

Los efectos de los cambios bruscos pueden extenderse corriente abajo por varios metros. El valor n para un alcance por debajo de una perturbación puede requerir un ajuste. Un aumento máximo en n de 0.003 resultará de la cantidad usual de curvatura de la canal encontrada en los canales diseñados y en los alcances de los canales naturales utilizados para calcular la descarga (Benson y Dalrymple, 1967).

Obstrucciones n_3

Obstrucciones tales como troncos, tocones, cantos rodados, escombros, pilotes y pilares de puentes perturban el patrón de flujo en el canal y aumentan la rugosidad. La cantidad de aumento depende de la forma de la obstrucción; el tamaño de la obstrucción en relación con el de la sección transversal; y el número, disposición y espaciamiento de las obstrucciones. El efecto de las obstrucciones en el coeficiente de rugosidad es una función de la velocidad del flujo. Cuando la velocidad de flujo es alta, una obstrucción ejerce una esfera de influencia que es mucho más grande que la obstrucción porque la obstrucción afecta el patrón de flujo en distancias considerables en cada lado.

La esfera de influencia para velocidades que generalmente ocurren en canales que tienen pendientes suaves a moderadamente pronunciadas es de aproximadamente tres a cinco veces el ancho de la obstrucción. Varias obstrucciones pueden crear esferas de influencia superpuestas y pueden causar perturbaciones considerables, aunque las obstrucciones pueden ocupar solo una pequeña parte de la sección transversal del canal. Chow (1959) asignó valores de ajuste a cuatro niveles de obstrucción: insignificante, menor, apreciable y grave (Tabla 14).

Vegetación n_4

La medida en que la vegetación afecta n depende de la profundidad del flujo, el porcentaje del perímetro humedecido cubierto por la vegetación, la densidad de la vegetación debajo de la línea de agua alta, el grado en que la vegetación es aplanada por el agua alta y la alineación de la vegetación en relación con el flujo. Las filas de vegetación que son paralelas al flujo pueden tener menos efecto que las filas de vegetación que son perpendiculares al flujo.

Los valores de ajuste dados en la Tabla 14 se aplican a los canales restringidos que son de ancho estrecho. En los canales anchos que tienen una relación de profundidad a ancho pequeña y que no hay vegetación en el lecho, el efecto de la vegetación en bancas es pequeño, y el ajuste máximo es de aproximadamente 0.005. Si el canal es relativamente estrecho y tiene bancas escarpadas cubiertas por una densa vegetación que cuelga sobre el canal, el ajuste máximo es de aproximadamente 0.03.

Meandros m

El grado de meandro, m , depende de la relación de la longitud total del canal serpenteante en el alcance que se considera a la longitud recta del alcance del canal. El meandro se considera

menor para relaciones de 1.0 a 1.2, apreciable para relaciones de 1.2 a 1.5, y severo para relaciones de 1.5 y mayores. Según Chow (1959), los meandros pueden aumentar los valores de n hasta en un 30 por ciento cuando el flujo está confinado dentro de un canal de corriente. El ajuste del meandro debe considerarse solo cuando el flujo se limita al canal. Puede haber muy poco flujo en un canal serpenteante cuando hay flujo en la llanura de inundación.

El parámetro del coeficiente de rugosidad de Manning corresponde a un valor dentro de la ecuación que representa el comportamiento hidráulico de una masa de agua a través de un canal natural o artificial, y donde la superficie de dicho canal genera una resistencia al tránsito del flujo. Algunos autores (Jarrett, 1984) han indicado que el coeficiente de Manning puede variar de acuerdo con el volumen de agua que transita por la superficie del canal, por lo que, para un mismo tramo de río, el coeficiente de Manning puede variar entre los caudales máximos y caudales medios (o mínimos).

Esta explicación se debe a que para caudales menores (medios y mínimos), las geoformas tales como dunas, risos, saltos y pozos, así como la misma vegetación, pueden generar una alta resistencia al flujo ya que el mismo no cuenta con profundidades importantes ni velocidad de desplazamiento representativa y por ello, la rugosidad relativa del fondo del canal representa valores mayores en el coeficiente de Manning. Para el caso de una creciente, donde la profundidad del flujo es mayor al igual que la velocidad, la rugosidad relativa se disminuye reduciendo así el valor del coeficiente de rugosidad de Manning. Estos aspectos pueden ser consultados en (Jarrett, 1984). Dentro del presente capítulo se determinará el coeficiente de rugosidad de Manning para la evaluación hidráulica de las crecientes, información que será validada en la calibración del modelo hidráulico HEC – RAS.

CREACIÓN DE CAPAS DE COBERTURA TERRESTRE, VALORES n DE MANNING Y % DE IMPERMEABILIDAD

Se puede crear una capa de cobertura terrestre que varíe espacialmente en RAS Mapper y luego asociarla con un conjunto de datos de geometría específico. Una vez que se crea un conjunto de datos de cobertura terrestre, se puede especificar los valores n de Manning que se utilizarán para cada tipo de cobertura terrestre. Además, se puede crear sus propios polígonos de clasificación de cobertura terrestre (polígonos definidos), en los que puede anular las capas de cobertura terrestre base dentro de ese polígono y definir un nuevo tipo de cobertura terrestre. Los polígonos de clasificación definidos se utilizan a menudo para áreas de canales.

La creación de clasificaciones de cobertura terrestre definidas permite crear un buen conjunto de valores n base de Manning para estos polígonos de clasificación definidos. Se puede dibujar más de un polígono y darle el mismo nombre. Sin embargo, solo se puede establecer un valor n de Manning para cada polígono de clasificación de cobertura terrestre definido. Entonces, si los valores n de Manning deben ser diferentes, entonces los polígonos deben tener nombres diferentes. También se pueden especificar el porcentaje de impermeabilidad para cada uno de los tipos de cobertura

terrestre. El porcentaje de impermeabilidad es opcional y solo es necesario si está modelando la precipitación y la infiltración.

CONDICIONES DE FRONTERA Y CONDICIONES INICIALES – ÁREAS 2D

Análisis 1D

~~Como requisito para implementar la modelación hidráulica, se introducen las condiciones de frontera en el software HEC - RAS (puede ser la curva de calibración de una sección transversal, la pendiente normal del perfil de flujo o los niveles impuestos aguas abajo de las secciones en estudio por un control de flujo):~~

~~En condiciones de flujo subcrítico sólo es necesario la condición de frontera en el tramo final del río; por el contrario, si se realiza la simulación para flujo supercrítico la condición de frontera debe definirse en el tramo inicial de la corriente. Finalmente, cuando se considera que el flujo es mixto, ambas condiciones de frontera (aguas arriba y abajo) deben ser definidas. El modelo HEC-RAS v 6.7 permite la incorporación de cuatro (4) tipos de condiciones de frontera, según se mencionan a continuación:~~

- ~~● Elevación de la superficie del agua conocida: para esta condición debe definirse el valor de la cota de superficie del agua para cada uno de los perfiles que se quiere simular.~~
- ~~● Profundidad crítica: cuando este tipo de condición de frontera es definido, no es necesario incluir ningún otro tipo de información al modelo, ya que el programa estimará la profundidad crítica para cada uno de los perfiles simulados, y los usará como condición de frontera.~~
- ~~● Profundidad normal: para este tipo de condición de frontera, es necesario definir la pendiente de la línea de energía que será utilizada para estimar la profundidad normal en esa ubicación; luego, la profundidad normal de cada perfil será estimada con base en la pendiente definida. Si la pendiente de la línea de energía se desconoce, es posible aproximarla considerando que ésta es igual a la pendiente de la superficie del agua o a la pendiente del fondo del canal.~~
- ~~● Curva de caudal: con esta condición de frontera es necesario definir una curva de elevación vs caudal. Para cada perfil, la elevación es interpolada de la curva para cada condición de flujo dado.~~

Análisis 2D

Las condiciones de Frontera consisten en condiciones de límite externas a lo largo del perímetro del área 2D, condiciones de límite interno y condiciones de límite global (datos meteorológicos) que se aplican a todo el modelo (es decir, precipitación, viento, etc.). Hay cuatro tipos de condiciones de límite externas que se pueden vincular directamente a los límites de las áreas de flujo 2D, estos son (Hidrograma de flujo, Hidrograma de etapa, Profundidad normal, Curva de calibración).

Las condiciones de límite de profundidad normal y curva de calibración solo se pueden usar en ubicaciones donde el flujo dejará un área de flujo 2D. Las condiciones de límite del hidrograma de flujo y de etapa se pueden utilizar para introducir o sacar flujo de un área de flujo 2D. Para un hidrograma de flujo, los valores de flujo positivo enviarán flujo a un área de flujo 2D y los valores de flujo negativos sacarán el flujo de un área 2D. Para el hidrograma de etapa, las etapas más altas que el suelo o la superficie del agua en un área de flujo 2D enviarán flujo hacia adentro, y las etapas más bajas que la superficie del agua en el área de flujo 2D enviarán flujo hacia afuera. Si una celda está seca y la condición de límite de la etapa es menor que la elevación mínima de la celda del área de flujo 2D, el flujo no se transferirá.

Hay dos tipos de condiciones de contorno interno que se pueden utilizar en HEC-RAS (Hidrograma de flujo, Precipitación). La condición de límite de precipitación se puede aplicar directamente a cualquier área de flujo 2D como una serie de tiempo de excesos de lluvia. Este método es limitante porque aplica la misma precipitación espacialmente a toda el área de flujo 2D.

Las condiciones de contorno globales son condiciones de contorno que se aplican a todo el modelo. Los tipos de condiciones de contorno globales actuales son (Precipitación, Evapotranspiración, Viento). Los nuevos métodos para ingresar las condiciones de los límites del viento y la precipitación global pueden ser en forma de datos cuadriculados o datos de medición puntual. Si se utilizan datos de forma puntuales, entonces la información se interpola entre estos utilizando varios métodos opcionales.

Para realizar el cálculo hidráulico dentro del modelo HEC RAS v 6.7, y mediante una solución con áreas 2D, es necesario realizar la simulación de forma Unsteady Flow – Flujo no permanente, lo que conlleva a ingresar los caudales de diseño en forma de un hidrograma, donde se deberá contar con un dato de caudal y un tiempo dado, información que se amplía a continuación.

Hidrograma de flujo

Un hidrograma de flujo se usa generalmente para llevar el flujo a un área de flujo 2D; sin embargo, también se puede utilizar para extraer caudal (valores de caudal negativos). Los datos necesarios para este tipo de condición de contorno son: Hidrograma de flujo (descarga, Q , en función del tiempo), Pendiente de energía (para calcular la profundidad normal). La pendiente de energía se utiliza para calcular una profundidad normal a partir del caudal dado y los datos de la sección transversal (datos del terreno subyacente) a lo largo de la línea de condición de límite para cada paso de tiempo computacional. Luego se calcula una distribución de flujo en la sección transversal (basada en la superficie del agua de profundidad normal y el transporte en la sección transversal debajo de la línea de Condición de Límite 2D) y esta distribución de flujo se usa para distribuir apropiadamente el flujo a las celdas a lo largo de la condición de límite. línea que está mojada. En cualquier paso de tiempo dado, solo una

parte de la línea de condición de límite puede estar mojada, por lo que solo las celdas en las que la elevación de la superficie del agua es más alta que el terreno de la cara del límite exterior recibirá agua. Sin embargo, si la superficie del agua de profundidad normal calculada es más alta que todos los datos de elevación de la cara límite a lo largo de la línea de condición de límite, todas las celdas recibirán agua según un enfoque de ponderación de transporte.

Profundidad normal

La condición límite de profundidad normal solo se puede utilizar para sacar el flujo de un área de flujo 2D. Cuando se usa la condición de límite de profundidad normal, se requiere el ingreso de una pendiente de fricción para esa área, que también se requiere para una ubicación de sección transversal 1D. La pendiente de fricción se puede basar en la pendiente del terreno en las proximidades de la línea de condición de límite del área de flujo 2D. La Pendiente de Fricción se usa dentro de la ecuación de Manning para calcular una elevación de la superficie del agua de Profundidad Normal para cada flujo dado, basado en la sección transversal debajo de la línea de Condición de Límite 2D. Al igual que el límite del hidrograma de etapa, el límite de profundidad normal se calcula por celda.

MÉTODO DE SIMULACIÓN Y TIEMPO COMPUTACIONAL

HEC-RAS tiene la capacidad de realizar análisis de flujo inestable bidimensional con las ecuaciones de aguas poco profundas (SWE) o las ecuaciones de onda de difusión (DWE). HEC-RAS tiene tres conjuntos de ecuaciones que se pueden usar para resolver el flujo que se mueve sobre la malla computacional, las ecuaciones de onda de difusión; las ecuaciones originales de aguas poco profundas (SWE-ELM, que significa ecuaciones de aguas poco profundas, método euleriano-lagrangiano); y una nueva solución de ecuaciones de aguas poco profundas que es más conservadora en el momento (SWE-EM, que significa ecuaciones de aguas poco profundas, método euleriano). El SWE también tiene opciones para modelar turbulencias y efectos Coriolis.

Un enfoque general es utilizar las ecuaciones de onda de difusión mientras se desarrolla el modelo y se resuelven todos los problemas (a menos que ya se sepa que se requieren las ecuaciones completas de Saint Venant para el conjunto de datos que se modela). Para el análisis realizado, se realizó la modelación a partir de las ecuaciones originales de aguas poco profundas SWE-ELM.

En general, las ecuaciones de la onda de difusión son más indulgentes numéricamente que el SWE. Esto significa que se pueden usar pasos de tiempo más grandes con las ecuaciones de onda de difusión (que con el SWE) y aun así obtener soluciones numéricamente estables y precisas. Las siguientes son pautas para elegir un intervalo de cálculo para las ecuaciones de aguas poco profundas y las ecuaciones de onda de difusión:

Aguas Poco Profundadas (SWE-ELM):

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (con max } C=3.0) \quad \text{Ecuación 67}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta X}{V} \text{ (con } C=1.0) \quad \text{Ecuación 68}$$

Donde C=Numero Courant

V= Velocidad onda de flujo (pie/s)

ΔT =Tiempo computacional (s)

ΔX =Promedio tamaño celda (pie)

Aguas Poco Profundadas (SWE-EM):

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \leq 1.0 \text{ (con max } C=1.0) \quad \text{Ecuación 69}$$

$$\Delta T = \frac{\Delta X}{V} \text{ (con } C=1.0) \quad \text{Ecuación 70}$$

Ecuación Onda de Difusión:

$$C = \frac{V \Delta T}{\Delta X} \leq 2.0 \text{ (con max } C=5.0) \quad \text{Ecuación 71}$$

$$\Delta T = \frac{2\Delta X}{V} \text{ (con } C=1.0) \quad \text{Ecuación 72}$$

El programa permite definir el máximo y mínimo valor de Courant C considerando el tiempo a utilizar como base en la computación, esto con el fin de mejorar los resultados para corrientes. Este tipo de procedimiento permite contar con mayor estabilidad numérica en el modelo hidráulico y así, generar un tránsito de flujo continuo y sin pérdida de masa.

3.1.2.2.5 Calibración del Modelo Hidráulico

Es importante al momento de realizar una modelación hidráulica de un río en particular, calibrar el modelo implementado y así evaluar la capacidad del software para representar las condiciones reales de la corriente analizada. Bajo las condiciones de caudal de diseño, rugosidad del canal y condiciones de entrada al modelo hidráulico, se verificó las alturas alcanzadas de la lámina de agua y así evaluar el concepto de banca llena (Posada L. , 1994).

Asimismo, indica que el caudal que representa la banca llena, es decir, aquel que ocupa el canal principal de la corriente corresponde a un caudal con periodo de retorno que oscila entre 1,5 años y 2,33 años, por lo cual se evalúa la altura de la lámina de agua alcanzada para el caudal con periodo de retorno de 2.33 años a través del canal de las corrientes.

3.1.2.2.6 Cálculo de Velocidad y Alturas de Lámina de Agua

Como principales resultados de los análisis hidráulicos a realizar se presentan los cambios en velocidad, profundidad, número de Froude, niveles máximos de inundación, y zonas afectadas por dicha situación. Así se podrá construir la mancha de inundación asociada a cada quebrada en estudio. Adicionalmente, teniendo en cuenta las velocidades del flujo, evidencias en campo y análisis geológicos de cada tramo, se puede asociar zonas susceptibles a inundaciones o avenidas torrenciales.

Esta información se complementa con resultados numéricos y sus respectivos niveles alcanzados por cada uno de los caudales obtenidos en el estudio hidrológico, de acuerdo con los diferentes análisis realizados, sea a partir de un modelo unidimensional o bidimensional, según las características topográficas y geomorfológicas de cada sitio estudiado.

3.1.2.3 Zonificación de la amenaza

Para el análisis de la amenaza por inundaciones se utiliza la metodología elaborada por La Agencia Federal para Manejo de Emergencias de los Estados Unidos, que hace parte de la guía denominada “*Guidance for Flood Risk Analysis and Mapping*” del año 2014, la cual sirve para la implementación eficaz y eficiente del estándar de análisis de riesgo de inundación y su respectivo mapeo. En esta categoriza la amenaza por el efecto combinado de la profundidad y la velocidad del flujo, en Bajo, Medio, Alto, Muy Alto y Riesgo Extremo (IDEAM, 2017).

Para elaborar el mapa de amenaza por inundación, se utilizan unas reglas adicionales al multiplicar la velocidad por la profundidad, teniendo en cuenta los límites superiores de la profundidad y la

velocidad para cada categoría de amenaza. El IDEAM, 2017 presenta la siguiente categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad; sin embargo, se pueden usar otras categorías (Tabla 15).

Tabla 15. Tabla de categorización simplificada de la amenaza como el producto de la velocidad por la profundidad.

Categoría de severidad de inundación	Rango de profundidad * velocidad (pies²/seg)	Rango de profundidad * velocidad (m²/seg)
Baja	<2.2	<0.2
Media	2.2 – 5.4	0.2 – 0.5
Alta	5.4 – 16.1	0.5 – 1.5
Muy Alta	16.1 – 26.9	1.5 – 2.5
Extrema	>26.9	>2.5

Fuente: Adaptado IDEAM, 2017.

Para el caso de interés, esta categorización se ajustará de acuerdo con el Decreto 1077 de 2015 en amenaza alta, media y baja, utilizando los rangos <0.2; de 0.2 a 0.5; y >0.5 respectivamente (las categorías muy alto y extremo se encuentran contenidas en la categoría de amenaza alta). Como resultado de los análisis hidrológicos, modelamiento hidráulico, se zonificarán las diferentes áreas en zonas con amenaza alta, zonas con amenaza media y zonas con amenaza baja. Para el presente análisis se utilizará la mancha de inundación con periodo de retorno de 100 años.

Para la definición de la amenaza por avenidas torrenciales, se toma la metodología propuesta por el SGC en la Guía metodológica para zonificación de amenaza por avenidas torrenciales del año 2019, en donde se plantea la valoración del mismo a partir de la combinación de dos criterios, el primero de ellos correspondiente al valor de IDF y el segundo el valor de probabilidad o TR, todos ellos obtenidos de las curvas de amenaza, tal y como se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 16. Tabla de decisión para la definición de la amenaza por avenida torrencial

IDF	Nivel de amenaza		
IDF ≥ 50	Alta	Alta	Alta
1 < IDF < 50	Alta	Media	Media
IDF ≤ 1	Alta	Media	Baja
TR	25 años	100 años	500 años

Fuente: Universidad EAFIT, 2025

3.1.2.4 Zonificación de la amenaza por inundación en afluentes con evidencia de eventos que no fueron objeto de modelación hidráulica priorizada

3.1.2.4.1 Justificación y alcance

La zonificación de amenaza por inundación en el territorio del Distrito de Medellín se sustenta de manera principal en modelaciones hidráulicas, en concordancia con los lineamientos establecidos en el artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015, que compiló el artículo 9 del Decreto 1807 de 2014. No obstante, la red hídrica del Distrito comprende una diversidad de afluentes y drenajes en los cuales la modelación hidráulica detallada no resulta técnicamente viable en el marco de un estudio básico, debido a la escala del análisis, la limitada disponibilidad de información hidrológica e hidráulica, o las condiciones físicas particulares del cauce, tales como tramos en cobertura hidráulica u ocupados en su sección por construcciones irregulares.

Con el propósito de asegurar la cobertura integral de la zonificación de amenaza de inundación en el territorio, condición habilitante para la revisión del Plan de Ordenamiento Territorial conforme al Decreto 1077 de 2015, se adoptó una jerarquía metodológica fundamentada en el principio de considerar información con mayor soporte técnico disponible. Dicho principio reconoce que los distintos tramos del territorio cuentan con niveles heterogéneos de información técnica y, en consecuencia, demandan métodos diferenciados que preserven el rigor de la categorización de amenaza bajo umbrales comparables y consistentes con el marco normativo vigente.

El presente capítulo establece el procedimiento técnico aplicado para la determinación de la amenaza por inundación en aquellos afluentes y drenajes para los cuales se cuenta con evidencia histórica de ocurrencia de eventos de inundación, registrada a través de la base de datos del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) y de la red de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), y que no fueron objeto de modelación hidráulica priorizada en el Estudio Básico de Amenazas del Distrito.

3.1.2.4.2 Identificación de zonas de interés a partir de información histórica y de monitoreo

Como insumo previo a la aplicación de la jerarquía metodológica, se identificaron las zonas de interés del territorio mediante la integración de dos fuentes institucionales de información.

En primer lugar, se consultó la base de datos de evaluaciones técnicas del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD) del Distrito de Medellín, en la cual se registran los sitios donde se han presentado eventos de inundación documentados. Estos registros constituyen evidencia histórica de ocurrencia del fenómeno y permiten identificar los tramos del territorio en los cuales la amenaza se ha manifestado de forma efectiva.

En segundo lugar, se incorporó la red de sensores de nivel instalados por el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá (SIATA), red que en numerosos casos coincide con puntos previamente priorizados por el DAGRD. La instalación de instrumentación en estos puntos responde a la identificación técnica previa de condiciones de amenaza que justificaron la implementación de sistemas de monitoreo y alerta temprana.

Resulta pertinente precisar que ambas fuentes constituyen evidencia histórica y operativa de zonas críticas, y no una metodología de zonificación de amenaza en sí mismas. Su función dentro del procedimiento consiste en priorizar las zonas de interés sobre las cuales debe aplicarse, con el mayor rigor posible, alguno de los métodos de zonificación descritos en la jerarquía metodológica desarrollada en el numeral siguiente.

En concordancia con el procedimiento descrito, es importante señalar que en el análisis se identificaron algunos puntos reportados por el DAGRD y el SIATA que no fueron incorporados a la zonificación de amenaza, debido a que actualmente se adelantan obras orientadas a garantizar el manejo hidráulico adecuado de dichas zonas. Un ejemplo representativo corresponde a la quebrada La Chorrera, en el corregimiento de San Antonio de Prado, sector que presenta reportes de eventos de inundación durante la temporada de lluvias del año anterior (2025) y en el cual se ejecutan, en la actualidad, obras de mitigación bajo la figura de urgencia manifiesta declarada por la Administración Distrital.

Cabe mencionar que este ajuste metodológico se sustenta en el reconocimiento técnico de que la amenaza por inundación constituye un fenómeno dinámico, cuya configuración espacial y temporal se ve modificada de forma continua por las transformaciones del territorio, la variabilidad climática y la intervención antrópica de los cauces. En consecuencia, la zonificación de la amenaza no puede limitarse a los resultados de la modelación hidráulica priorizada, sino que debe incorporar de manera explícita aquellos sectores del territorio en los cuales existe registro documentado de eventos históricos de inundación con recurrencia actual, conforme a la evidencia consolidada por el Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres y por la red de monitoreo del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá. Esta incorporación garantiza que la zonificación refleje no solo el comportamiento hidráulico teórico de los cauces, sino también la manifestación efectiva del fenómeno en el territorio, en coherencia con el principio de considerar información con mayor soporte técnico disponible, y con la naturaleza dinámica de la gestión del riesgo establecida en la Ley 1523 de 2012.

3.1.2.4.3 Jerarquía metodológica para la determinación de la amenaza

Para cada tramo de afluente o drenaje con evidencia de eventos de inundación que no fue priorizado en la modelación hidráulica principal del Estudio Básico de Amenazas, se aplicó la metodológica que se describe a continuación, ordenada en función de la jerarquía técnica decreciente. La selección del método aplicado a cada tramo quedó documentada en la geodatabase del estudio, lo que garantiza la trazabilidad integral del procedimiento.

Se analizan los sectores donde fueron reportados eventos de inundación considerando los siguientes niveles:

Nivel 1. Estudios Básicos de Amenaza y estudios de detalle existentes

En primer lugar se verificó la cobertura del tramo por las modelaciones hidráulicas contenidas en el Estudio Básico de Amenazas del Distrito de Medellín, que constituye la referencia técnica más actualizada para el ámbito distrital, así como por los estudios de detalle realizados a la fecha en el marco de procesos de revisión, licenciamiento o gestión del riesgo, siempre que cumplan los requisitos técnicos del artículo 2.2.2.1.3.2.2.5 del Decreto 1077 de 2015, sobre análisis detallado de amenaza por inundación.

En estos tramos, la zonificación se adoptó directamente de los respectivos estudios, con sus categorías de amenaza alta, media y baja establecidos en la normativa, considerando el período de retorno de cien años como umbral característico para la categoría de amenaza alta.

Nivel 2. Modelaciones hidráulicas del Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá

En aquellos tramos en los cuales el SIATA dispone de modelaciones hidráulicas con representación de profundidad y velocidad de flujo, el equipo técnico adelantó una verificación orientada a evaluar el potencial técnico de la instrumentación instalada y la consistencia de la información generada, con el propósito de validar su incorporación como insumo directo para la zonificación. Las modelaciones referidas, desarrolladas por el SIATA en el marco de su función institucional de monitoreo y alerta temprana, constituyen un producto técnico equivalente en método al del Nivel 1 en aquellas zonas donde se evidencia la amenaza, diferenciado únicamente por su fuente institucional y por su cobertura focalizada en los puntos prioritarios para el sistema de alerta. Es preciso señalar que el SIATA dispone de este tipo de modelaciones únicamente en aquellos puntos en los cuales la información topográfica, hidrológica y operativa lo permite, por cuanto se ha estimado metodológicamente preferible disponer de información observacional verificada antes que extender la modelación a sitios con información insuficiente. En consecuencia, en los puntos donde el SIATA cuenta solamente con instrumentación de nivel y no con modelación, dicha información se trata

como evidencia histórica, y la zonificación se efectúa mediante los métodos de los Niveles 3, 4 o 5, según corresponda.

Nivel 3. Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas

En los tramos no cubiertos por los niveles de detalle previamente definidos, se empleó como referencia la información hidrológica e hidráulica contenida en los Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas (PIOM) vigentes para las microcuencas del Distrito, elaborados mediante convenios con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

Para la incorporación de esta información se desarrolló un proceso de homologación técnica orientado a garantizar la compatibilidad entre las categorías de amenaza definidas en los PIOM y aquellas establecidas en los Estudios Básicos de Amenaza (EBA) del Distrito. Dicho proceso consistió en verificar la equivalencia funcional entre las metodologías empleadas en ambos estudios, considerando que los EBA adoptan un criterio de intensidad hidráulica basado en la relación velocidad–profundidad del flujo ($V \times H$), mientras que los PIOM delimitan las categorías de amenaza principalmente a partir de manchas de inundación asociadas a caudales correspondientes a períodos de retorno de 100 y 500 años.

Si bien los enfoques metodológicos difieren en el parámetro hidráulico utilizado para la categorización, ambos permiten identificar y delimitar espacialmente condiciones de susceptibilidad por inundación y establecer categorías jerárquicas de amenaza para efectos de planificación territorial. En este sentido, se verificó que la categoría de “amenaza moderada” definida en los PIOM es técnicamente homologable con la categoría de “amenaza media” establecida en los EBA, dado que ambas representan condiciones intermedias de afectación y peligrosidad hidráulica.

Cabe precisar que el Decreto 1077 de 2015 no establece la obligación de utilizar una metodología única ni criterios hidráulicos específicos para la zonificación de amenaza por inundación, sino que exige que los estudios desarrollen una delimitación técnicamente sustentada de las categorías de amenaza alta, media y baja, con base en análisis hidrológicos, hidráulicos, geomorfológicos e históricos. Por tanto, las metodologías implementadas tanto en los PIOM como en los EBA se consideran compatibles dentro del marco normativo vigente, permitiendo la articulación y empalme cartográfico de las capas de zonificación sin inconsistencias conceptuales ni restricciones técnicas para su utilización en instrumentos de ordenamiento territorial.

Nivel 4. Método geomorfológico complementado con caudales del Estudio Básico de Amenazas

En los tramos para los cuales no se dispuso de información proveniente de los niveles anteriores se aplicó un análisis geomorfológico fluvial, complementado con los caudales hidrológicos obtenidos

en los estudios básicos de la cuenca. Este método se fundamenta en la admisibilidad expresa de los enfoques geomorfológicos para la zonificación de amenaza por inundación, prevista en el numeral 3 del artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015, que establece como métodos válidos los hidrológico-hidráulicos, los geomorfológicos y los histórico-geomorfológicos. El método geomorfológico reconoce que la geomorfología fluvial constituye un registro físico de la dinámica histórica del cauce y, por tanto, un indicador robusto de las zonas susceptibles a inundación.

Para este procedimiento, se desarrolló un análisis a escala de cuenca fundamentado en la delimitación hidrológica y en la estimación de caudales máximos asociados a diferentes períodos de retorno, conforme a los resultados consolidados en los estudios básicos. La estimación de las manchas de inundación a escala de cuenca se efectuó a partir de los caudales máximos correspondientes a los períodos de retorno de 10, 100 y 500 años, lo cual permite caracterizar el comportamiento del cauce ante eventos de frecuencia alta, intermedia y baja, y respaldar la categorización de la amenaza en sus niveles bajo, medio y alto.

Las manchas de inundación se zonifican a partir del descriptor geomorfológico HAND (*Height Above Nearest Drainage*), el cual consiste en una normalización hidrológica del Modelo Digital de Elevación (DEM), basada en el cálculo de la distancia vertical relativa entre cada celda del terreno y el drenaje hidráulicamente conectado más cercano, siguiendo las direcciones de flujo de la red de drenaje. El descriptor geomorfológico HAND se calcula en asociación a niveles de inundación definido por curvas de calibración, las cuales relacionan nivel del agua con caudal.

La obtención del HAND parte de la red de drenaje de la cuenca, el mapa de direcciones de flujo y el DEM. Los dos primeros mapas permiten identificar para cualquier celda de la cuenca cuál es su celda de destino en la red de drenaje y a partir de esta identificación se calcula la elevación relativa de determinada celda como la diferencia entre la elevación de esta y la elevación de la celda de destino ubicada sobre el canal.

A partir de la dirección de flujo y de la red de drenaje derivadas del Modelo Digital de Elevación (DEM), el algoritmo identifica el drenaje hidráulicamente conectado a cada celda del terreno y calcula la diferencia vertical entre la elevación de dicha celda y la elevación del cauce asociado. El resultado es un raster HAND que representa alturas relativas respecto al drenaje, permitiendo identificar áreas topográficamente bajas y potencialmente susceptibles a inundación.

El descriptor requiere de una curva de calibración de geometría hidráulica para estimar la profundidad de flujo en cada sección según el caudal que tenga la misma. Se utiliza una regionalización de geometría hidráulica que sea aplicable a las condiciones hidrológicas de la zona de estudio. Esta regionalización aporta los coeficientes de la curva de calibración que relaciona el calado (profundidad) del flujo con el caudal.

Para la zona de estudio se utiliza la regionalización de geometría hidráulica desarrollada por (Posada M. y., 2002) para ríos de montaña a través del análisis de diferentes bancos de datos en todo el país. La expresión para la curva de calibración viene dada por:

$$H = 0.517 Q^{0.335}$$

Con el fin de definir los diferentes niveles de amenaza, se establecen de la siguiente manera las zonas inundables para diferentes períodos de retorno, con relación a la probabilidad de ocurrencia tanto para inundación:

- Amenaza baja, asociada al período de retorno de 500 años
- Amenaza media, asociada al período de retorno de 100 años
- Amenaza alta, asociada al período de retorno de 10 años.

La selección de los períodos de retorno se fundamenta en criterios técnicos consolidados en la práctica hidrológica nacional e internacional, en concordancia con la facultad otorgada al consultor por el artículo 2.2.2.1.3.2.1.2 del Decreto 1077 de 2015 para definirlos en función de la información disponible. El período de retorno de 10 años, asociado a la amenaza alta, corresponde a eventos frecuentes con probabilidad anual de excedencia del 10%, que se materializan de manera recurrente durante la vida útil de la infraestructura urbana. El período de retorno de 100 años, asociado a la amenaza media, constituye el estándar técnico internacional para la delimitación de la llanura de inundación con fines de planeación territorial, con probabilidad anual de excedencia del 1%. El período de retorno de 500 años, asociado a la amenaza baja, delimita la extensión máxima razonable bajo escenarios hidrometeorológicos extraordinarios, con probabilidad anual de excedencia del 0,2%.

Nivel 5. Zonificación POT 2014 y Tramos de cauce en cobertura hidráulica.

Finalmente, en los tramos de quebrada que no aplicaban los anteriores análisis, se complementó la zonificación con aquella que fue la incorporada en la cartografía del POT 2014, cuyo principio fue el criterio geomorfológico según se señala en el Documento Técnico de Soporte de este instrumento de planificación.

Ahora bien, en sectores del cauce en los cuales el alineamiento de la quebrada se encuentra en cobertura hidráulica, no resulta técnicamente viable aplicar los métodos descritos en los numerales precedentes, ni desarrollar modelación hidráulica con la información disponible en la escala de un estudio básico. Para estos tramos se adoptó la siguiente regla técnica: toda quebrada canalizada, embovedada o soterrada se categoriza por defecto como amenaza alta por inundación. Este análisis

contempló insumo la base de datos geográfica denominada “Tquebradas”, y la ortofoto del Distrito de Medellín 2024, para verificar estos alineamientos de las coberturas hidráulicas objeto de consulta.

Esta base de datos geográfica “Tquebradas”, generada por la Secretaría de Medio Ambiente fue el consolidado de información mediante levantamientos por zonas del Distrito, incorporando capas temáticas como drenajes, geología, puntos críticos, estructuras hidráulicas y demás elementos asociados a los tramos de quebrada que incluyeron obras ejecutadas sobre los cauces. Como resultado, se publicó el “Segundo Levantamiento Integrado de Subcuencas Hidrográficas del Municipio de Medellín”, constituyéndose esta geodatabase en el principal instrumento técnico de la Secretaría para la gestión de la red hídrica, al contener información relevante sobre longitudes de tramos, materiales, secciones hidráulicas y demás características asociadas.

Se señala que, en los anteriores niveles, se pudo incluir este asunto de coberturas hidráulicas de acuerdo con la configuración o naturaleza del cauce.

3.1.2.4.4 Consideraciones sobre la dinámica antrópica del territorio

La metodología adoptada reconoce de manera explícita que las transformaciones antrópicas del territorio (procesos de urbanización, impermeabilización del suelo, intervención de cauces, modificación de coberturas y ocupación de llanuras de inundación, entre otras) modifican la dinámica de la amenaza por inundación y, en consecuencia, demandan una revisión periódica de la zonificación. La integración de la información proveniente del DAGRD y del SIATA como insumos de priorización responde precisamente a esta condición, por cuanto dichos sistemas registran de forma continua los puntos en los cuales la amenaza se manifiesta efectivamente en el territorio, lo cual constituye un mecanismo permanente de retroalimentación de la zonificación.

En consecuencia, la zonificación de amenaza por inundación debe entenderse como un instrumento dinámico, sujeto a actualización en el marco de las revisiones ordinarias y excepcionales del Plan de Ordenamiento Territorial, conforme a la nueva evidencia generada por los sistemas de monitoreo, los estudios de detalle posteriores y los eventos hidrometeorológicos que se materialicen en el territorio.

3.1.2.4.5 Trazabilidad en la geodatabase

Con el propósito de garantizar la trazabilidad técnica del procedimiento, la geodatabase de la zonificación de amenaza por inundación incorpora, para cada polígono de amenaza, un conjunto de campos de metadatos que documenta el método aplicado conforme a la jerarquía descrita (Niveles 1 a 5), la fuente específica de información empleada «Estudio Básico de Amenazas, estudio de detalle, modelación del SIATA, Plan Integral de Ordenamiento y Manejo de Microcuencas, análisis

geomorfológico o regla de tramo soterrado», la fecha de la información fuente y, cuando resulte aplicable, el período de retorno asociado, así como las observaciones técnicas relevantes para el tramo correspondiente.

Este registro permite la auditoría técnica del procedimiento, la identificación de los tramos prioritarios para la realización de futuros estudios de detalle, y la actualización trazable de la zonificación en función de nueva información.

4 METODOLOGÍA PARA DELIMITACIÓN DE ÁREAS CON CONDICIÓN DE AMENAZA Y ÁREAS CON CONDICIÓN DE RIESGO

Las Áreas con Condición de Amenaza (ACA), son las zonas o áreas del territorio municipal zonificadas como de amenaza alta y media en las que se establezca en la revisión o expedición de un nuevo POT la necesidad de clasificarlas como suelo urbano, de expansión urbana, rural suburbano o centros poblados rurales para permitir su desarrollo (Decreto 1077 de 2015).

La delimitación de las zonas con condición de amenaza se llevó a cabo a partir del mapa final de amenaza por fenómeno (movimientos en masa, inundación y avenida torrencial), se realizó la intersección de las zonas de amenaza alta y media con los polígonos de zonas sin construcciones (zonas verdes) y apoyados de la ortofoto del distrito del año 2024, a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente se depuran los polígonos aislados que cubren un área inferior a 525 m2.

Para realizar la codificación de las áreas en condición de amenaza se realiza el cruce con la clasificación del suelo y la división político-administrativa (códigos de barrios y veredas según DAP). El código se compone de una estructura alfanumérica que se compone de 5 a 6 elementos según el fenómeno:

[Fenómeno] + [clasificación del suelo] + [Tipo] + [Comuna] + [Barrio/Vereda] + [Consecutivo]

Fenómeno: Solo aplica para Inundación (I) y Avenida Torrencial (T). Si es Movimiento en Masa, este espacio queda vacío.

Clasificación del suelo: la sigla según la siguiente clasificación

UR Suelo urbano

CG Suelo urbano de cabecera corregimental (Altavista, San Antonio de Prado, San Cristóbal)

SU Suelo suburbano

EX Suelo de expansión

RR Suelo rural

Tipo: Indica que corresponde a la amenaza (A)

Ubicación: Códigos oficiales de comuna y barrio/vereda.

Consecutivo: Número único del polígono

A continuación, se muestran ejemplos para un mismo sector (Corregimiento Altavista, Sector Central):

Tabla 17. Ejemplo codificación áreas con condición de amenaza (ACA) del Distrito de Medellín

Fenómeno	Código Generado
Movimiento en Masa	CGA_70_7005_7
Inundación	ICGA_70_7005_7
Avenida Torrencial	TCGA_70_7005_7

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Las Áreas con Condición de Riesgo (ACR), corresponden a las zonas o áreas del territorio municipal clasificadas como de amenaza alta que estén urbanizadas, ocupadas o edificadas, así como en las que se encuentren elementos del sistema vial, equipamientos (salud, educación, otros) e infraestructura de servicios públicos (Decreto 1077 de 2015).

La definición de las áreas en condición de riesgo se realiza con el cruce de la amenaza en categoría alta por fenómeno y con las áreas identificadas con construcciones (Apoyados con imágenes áreas 2024 del distrito, la base catastral y eliminando los espacios verdes urbanos), a este resultado se le superponen y eliminan los polígonos con estudio de detalle, zona de alto riesgo no mitigables y algunos polígonos con obras estructurales de mitigación definidas por el Departamento Administrativo de planeación (DAP) y el departamento administrativo de gestión de riesgo de desastres DAGRD. Finalmente se depuran los polígonos aislados que cubren un área inferior a 525 m².

La codificación del riesgo sigue la misma lógica que la amenaza, con la diferencia de que en el **paso 3**, el tipo corresponde a Riesgo (**R**)

La codificación se estructura de la siguiente manera para áreas en condición de riesgo por movimientos en masa si se fuera para la cabecera corregimental del corregimiento Altavista, sector central:

Tabla 18. Ejemplo de codificación áreas con condición de riesgo (ACR) del Distrito de Medellín

Fenómeno	Código Generado
Movimiento en Masa	CGR_70_7005_7
Inundación	ICGR_70_7005_7
Avenida Torrencial	TCGR_70_7005_7

Fuente: Universidad EAFIT, 2025.

Las áreas con condición de amenaza y condición de riesgo se definieron para cada una de las clases de suelo (urbano, suburbano y expansión) y para el suelo rural solo se delimitaron áreas con condición de riesgo.

5 BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo Metropolitano 009 del 2012. *Directrices y lineamientos para la elaboración de estudios geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidrogeológicos y geotécnicos para intervenciones en zonas de ladera*. Universidad Nacional de Colombia, Universidad EAFIT y Universidad de Medellín, Medellín.

Alvioli, M., & Baum, R. L. (2016). Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. *Environmental Modelling & Software*, 122-135.

Alzate Llano, M. (2015). Análisis de precipitaciones máximas como factor detonante para la amenaza por movimientos en masa en el municipio de Santa Rosa de Cabal, Risaralda. Manizales, Colombia: Universidad de Manizales.

Área Metropolitana Del Valle De Aburrá – AMVA. (2007). *Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado*.

Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2002). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.

Baum, R. L., Savage, W. Z., & Godt, J. W. (2008). TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. Reston, EUA: U.S. Geological Survey.

Campo, J. M., Múnera, J. C. (1997). *Determinación de Tiempos de Concentración y Coeficientes de Escorrentía para Algunas Cuencas de Antioquia*. [Tesis de Pregrado. Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. 148p]

Carrara, A., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (1995). GIS technology in mapping landslide hazard. En A. Carrara, & F. Guzzetti, *Geographical Information Systems in Assessing Natural Hazards* (págs. 135-175). Dordrecht, Países Bajos: Springer.

Carvajal, J. (2012). *Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.

Chow, V. T. (1992). *Hidráulica de Canales Abiertos*. McGraw-Hill, Bogotá, Colombia. 667 p.

Chow, V. T.; Maidment, D. R., Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Bogotá, McGraw-Hill, 583 p.

Clark, C. O. (1945). *Storage and the Unit Hydrograph*. Proc. Amer. Soc. Engs. Vol 69. P 1333 – 1360.

Corominas, J., Guzzetti, F., Lan, H., Macciotta, R., Marunteranu, C., McDougall, S., & Strom, A. (2023). Revisiting landslide risk terms: IAEG commission C-37 working group on landslide risk nomenclature. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*.

Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio. (2015). Decreto Número 1077 de 2015.

Deere, D.U., Patton F.D. (1979). *Slope stability in residual soils*. En Proc., Fourth Pan american Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Puerto Rico. Vol. 1, Pág. 87-170.

Del Toro, N. (2013). *Bases y criterios de diseño de canales con flujo escalonado y sujetos a aireación natural*. Quito, Ecuador.

Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2005). *Revista hidrometeorológica de Empresas Públicas de Medellín*. Departamento de Hidrometría e Instrumentación de EPM.

Empresas Públicas de Medellín - EPM. (2009). *Guía para el diseño Hidráulico de Redes de Alcantarillado*. Medellín

Gabet, E. J., y T. Dunne. (2003). *Sediment detachment by rainpower*. WaterResour. Res., 39(1), 1002.

Gardner, W. R. (1958). Some steady-state solutions of the unsaturated moisture flow equation with application to evaporation from a water table. Soil Science, 228-232.

IDEAM. (2013). Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua. 2013. Bogotá, D.C.

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales- IDEAM. (2014). *Modelación Hidrológica. Amenaza por inundaciones*. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/amenazas-inundacion>. Fecha consulta: 09/01/2018

Instituto Nacional de Vías -INVÍAS (2006a). *Estudio e investigación del estado actual de las obras de la red nacional de carreteras*. Convenio interadministrativo 058703. Manual para la inspección visual de pavimentos flexibles. Bogotá: Invías-UNAL.

Jibson, R. W. (2011). Methods for assessing the stability of slopes during earthquakes—A retrospective. *Engineering Geology*, 122(1-2):43–50

Leroi, E. (1997). Landslide risk mapping. Problems, limitations and developments. En D. Cruden, Landslide Risk Assessment. Londres, Reino Unido: Routledge.

Maza, J.A. (1987). *Ingeniería Hidráulica*.

Maza, J.A., García, M. (1994). *Manual de Ingeniería de Ríos*. Comisión Nacional del Agua, México D.F., 1994.

Ministerio De Ambiente, Vivienda Y Desarrollo Territorial - MAVDT. (2010). NSR-10, Norma Sismo Resistente, R. C. D. C. S. 2010. Bogotá.

Montoya-Araque, E. A., & Montoya-Noguera, S. (2023). Sensitivity Analysis of a Physically Based Model to Assess Rainfall-Triggered Shallow Landslides. *Geotechnical and Geological Engineering*, 2797-2814.

Montoya-Araque, E. A., Lopez-Caballero, F., and Montoya-Noguera, S. (2024b). Using fragility curves in the probabilistic spatial assessment of permanent displacements of slopes. In Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), Milan, Italy.

Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., and Lopez-Caballero, F. (2024a). An open-source application software for spatial prediction of permanent displacements in earthquake-induced landslides by the Newmark sliding block method: pyNewmarkDisp. *Environmental Modelling & Software*, 173:105942.

Montoya-Araque, E. A., Montoya-Noguera, S., Lopez-Caballero, F., and Gatti, F. (2025). Numerical earthquake-induced landslide hazard assessment at regional scale in the Colombian Andes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 195: 109370.

Ordoñez Carmona, O., Valencia Marín, M., González Iregui, H., Cañola Herrera, E., Ruiz, M., Rendón Ramírez, A. (2005). *Generalidades del sistema de fallas de Romeral en las cercanías a Medellín*.

Ordoñez, J.I. (2005). *El régimen de los ríos aluviales y sus implicaciones sobre la socavación general*. Segundo Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos.

Posada, J. E. (1998). *Determinación del Coeficiente de Rugosidad en Canales Naturales*. [Trabajo Dirigido de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas]. Medellín. 74p.

Posada, L. E. (1994). Transporte de Sedimentos. [Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín].

Rathje, E. M. (2025). Evolution of Approaches to Evaluate the Seismic Performance of Earth Slopes. *Indian Geotechnical Journal*

Rivas, y Soto (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, Año XLIII, Volumen 53(1) Enero-junio, 2009, pp. 33-4.

Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2015). Guía metodológica para estudios de Amenaza, Vulnerabilidad y Riesgo por movimientos en masa, escala detallada. Colección Guías y Manuales. 179p.

Servicio Geológico Colombiano - SGC. (2021). Guía metodológica para zonificación de amenazas por avenidas torrenciales. Colección Guías y Manuales. 240p.

SGC. (2016). Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa. Bogotá, D.C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

SGC. (2017). Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1: 25.000. Bogotá, D. C., Colombia: Servicio Geológico Colombiano.

Smith y Vélez. (1997). *Hidrología de Antioquia*. Secretaria de Obras Públicas del Municipio de Medellín y Universidad Nacional de Colombia. Medellín.

Snyder, F. (1938). *Synthetic unit hydrographs*. Trans Am Geophysics Union, 19, 447–54

Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis, and zonation. En A. K. Turner, & R. L. Schuster, *Landslides, investigation and mitigation* (págs. 129-177). Washington, D.C., EUA: National Academy Press.

Suárez D, J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales, Colombia*. Universidad Industrial de Santander, pp. 168.

Tarboton, D. G. (1997). *A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*, p 309 - 319

Témez, J. R. (1978). *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. España: Dirección General de Carreteras-MOPU.

Thiery, Y., Terrier, M., Colas, B., Fressard, M., Maquaire, O., Grandjean, G., & Gourdier, S. (2020). Improvement of landslide hazard assessments for regulatory zoning in France: STATE-OF-THE-ART perspectives and considerations. *International Journal of Disaster Risk Reduction*.

Turner. H.M., y Burdoin, A. J. (1941). *The flood hydrograph*. Journal of the Boston Society of Civil Engineers, vol 28, no 3, p 232 – 281

U.S Army Corps of Engineers – Hydrologic Engineering Center. (2016). *HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual*.

U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002a). *HEC-RAS river*

U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2002b). *HEC-RAS*

U.S Army Corps Of Engineers – Hydrologic Engineering enter. (2010). *HEC-RAS*

Universidad Nacional De Colombia - UNALMED, Área Metropolitana Del Valle De Aburrá - AMVA, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA y Corporación Autónoma Regional Rionegro y Nare - CORNARE. (2007). *Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río Aburrá*.

Universidad Nacional De Colombia, Corporación Autónoma Regional del Centro De Antioquia - CORANTIOQUIA, Instituto Mí Río. (2003). *Metodología para la formulación de Planes Integrales de Ordenamiento y Manejo de Cuencas (PIOM)*

Universidad Nacional De Colombia, sede Medellín – UNALMED. (2010). HidroSIG 4.0. Manual de Usuario. Recuperado de <https://minas.medellin.unal.edu.co/departamentos/geocienciasymedioambiente/hidrosig/es/hidrosig-4-0.html>. Fecha consulta: 09/01/2018

van Westen, C. J. (1993). Application of Geographic Information Systems to landslide hazard zonation. Enshede, Países Bajos: International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences (ITC).

van Westen, C. J., Rengers, N., & Soeters, R. (2003). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 399-419.

van Westen, C. J., van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation - why is it still so difficult? *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 167-184.

Vélez, J.J., y Botero, A. (2010). *Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental*.