

FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR AVENIDAS TORRENCIALES



Grupo de Investigación

Grupo de Estudios Ambientales Aplicados (GEAA)

Grupo de Conservación Bioprospección y Desarrollo Sostenible (COBIDES)

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente - ECAPMA



FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO POR AVENIDAS TORRENCIALES

Autores:

Jessica Paola Páez Pedraza
Denisse Viviana Cortés Castillo

UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA – UNAD

Jaime Alberto Leal Afanador

Rector

Constanza Abadía García

Vicerrectora académica y de investigación

Leonardo Yunda Perlaza

Vicerrector de medios y mediaciones pedagógicas

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres

Vicerrector de desarrollo regional y proyección comunitaria

Édgar Guillermo Rodríguez Díaz

Vicerrector de servicios a aspirantes, estudiantes y egresados

Julialba Ángel Osorio

Vicerrectora de inclusión social para el desarrollo regional y la proyección comunitaria

Leonardo Evemeleth Sánchez Torres

Vicerrector de relaciones intersistémicas e internacionales

Myriam Leonor Torres

Decana Escuela de Ciencias de la Salud

Clara Esperanza Pedraza Goyeneche

Decana Escuela de Ciencias de la Educación

Alba Luz Serrano Rubiano

Decana Escuela de Ciencias Jurídicas y Políticas

Martha Viviana Vargas Galindo

Decana Escuela de Ciencias Sociales, Artes y Humanidades

Claudio Camilo González Clavijo

Decano Escuela de Ciencias Básicas, Tecnología e Ingeniería

Jordano Salamanca Bastidas

Decano Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

Sandra Rocío Mondragón

Decana Escuela de Ciencias Administrativas, Contables, Económicas y de Negocios

Fundamentos básicos para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales

Autores:

Jessica Paola Páez Pedraza
Denisse Viviana Cortés Castillo

Grupo de Investigación: Grupo de Estudios Ambientales Aplicados (GEAA)
Grupo de Conservación Bioprospección y
Desarrollo Sostenible (COBIDES)

363.34

Páez Pedraza, Jessica Paola

P127

Fundamentos básicos para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales / Jessica Paola Páez Pedraza, Denisse Viviana Cortés Castillo -- [1.a. ed.]. Bogotá: Sello Editorial UNAD/2020. (Grupos de investigación: Grupo de Estudios Ambientales Aplicados (GEAA) – Grupo de Conservación, Bioprospección y Desarrollo Sostenible (COBIDES) - Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y de Medio Ambiente -ECAPMA-)

ISBN: 978-958-651-798-0

e-ISBN: 978-958-651-792-8

1. Evaluación de riesgos 2. Movimiento en masa 3. Prevención de desastres 4. Amenazas ambientales I. Páez Pedraza, Jessica Paola II. Cortés Castillo, Denisse Viviana

ISBN: 978-958-651-798-0

e-ISBN: 978-958-651-792-8

Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente

©Editorial

Sello Editorial UNAD

Universidad Nacional Abierta y a Distancia

Calle 14 sur No. 14-23

Bogotá, D.C.

Agosto de 2020.

Corrección de textos: Angie Sánchez Wilchez

Diseño de Portada: Shadya López

Diagramación: Natalia HerreraFarfán

Impresión: Hipertexto - Netizen

Esta obra está bajo una licencia Creative Commons - Atribución – No comercial – Sin Derivar 4.0 internacional.
https://co.creativecommons.org/?page_id=13.



CONTENIDO

Reseña del libro	13
Reseña de los autores	14
Presentación	15
Agradecimientos	17
Introducción	18
Capítulo 1	
Generalidades	21
1.1 Las avenidas torrenciales	23
1.2 Mecanismos detonantes de avenidas torrenciales	25
1.3 Tipos de flujos	26
1.4 Tipos de fluidos y reologías	41
1.5 Análisis de riesgo	51
Capítulo 2	
Análisis geoespacial de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales	57
2.1 inventario de eventos históricos	60
2.2 Caracterización fisiográfica de la cuenca	72
2.3 Caracterización climática de la cuenca	100
2.4 Metodologías para el análisis de susceptibilidad	105
2.5 Metodologías para el análisis de factores detonantes y probabilidad de ocurrencia	133
2.6 Análisis de amenaza	146

Capítulo 3

Modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales	149
3.1 Modelación hidrológica lluvia–escorrentía	159
3.2 Ejemplo modelación hidrológica – quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	188
3.3 Modelación de mecanismos detonantes – deslizamientos generados por lluvias	203
3.4 Modelación de mecanismos detonantes–rotura de presas	216
3.5 Modelación de mecanismos detonantes–procesos <i>in-channel</i>	223
3.6 Modelación de mecanismos detonantes–incorporación de carga de lavado	224
3.7 Ejemplo modelación de mecanismos detonantes–quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	237
3.8 Ejemplo generación de hidrogramas líquidos y sólidos–quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	259
3.9 Modelación hidráulica de la propagación de la avenida y calibración de la reología	263
3.10 Ejemplo modelación hidráulica–quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	271
3.11 Generación del mapa de amenaza	281

Capítulo 4

Análisis de vulnerabilidad y riesgo	285
4.1 Análisis de vulnerabilidad	287
4.2 Análisis de riesgo	304

Referencias

306

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparación valle de inundación del río Taruca antes y después de la avenida torrencial del 2017	19
Figura 2. Representación de un flujo de lodos	28
Figura 3. Comparación de un flujo de lodo y uno no viscoso	29
Figura 4. Depósitos laterales formados en los flujos de lodos por elevación en las curvas	29
Figura 5. Esquema de flujo hiperconcentrado	30
Figura 6. Representación flujo de detritos	32
Figura 7. Flotación de grandes bloques en flujos de detritos	32
Figura 8. Diagrama de fases de flujos de escombros y deslizamientos	34
Figura 9. Clasificación de los flujos y deslizamientos de acuerdo con la fracción sólida y el tipo de material	35
Figura 10. Clasificación de los deslizamientos y flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos	37
Figura 11. Representación del perfil de velocidades de un fluido	41
Figura 12. Tipos de fluidos newtonianos y no newtonianos	43
Figura 13. Mapa mental general para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales	54
Figura 14. Pasos a seguir para análisis geoespacial de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales	59
Figura 15. Fuentes de información para inventario de eventos históricos	60
Figura 16. Depósitos laterales formados en los flujos de lodos por elevación en las curvas	62
Figura 17. Erosión activa y procesos de remoción en masa cuenca alta Quebrada Liboriana, Salgar, Antioquia	64
Figura 18. Depósitos y migración del canal quebrada La Liboriana, Salgar, Antioquia	65
Figura 19. Depósitos en forma de barras laterales en las curvas y ensanchamiento del canal en quebrada La Liboriana, Salgar, Antioquia	66
Figura 20. Erosión activa y procesos de remoción en masa cuenca alta quebrada La negra, Útica, Cundinamarca	67
Figura 21. Ensanchamiento del canal quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	68
Figura 22. Depósitos laterales y migración del canal quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca	68
Figura 23. Erosión activa y procesos de remoción en masa río Sangoyaco y quebrada Taruca, Mocoa – Putumayo	69
Figura 24. Ensanchamiento del canal río Sangoyaco, Mocoa – Putumayo	69
Figura 25. Depósitos río Sangoyaco y migración del canal río Mocoa, Mocoa – Putumayo	70
Figura 26. Infografía pasos básicos para desarrollar cartografía social	71
Figura 27. Orden de corrientes método de Horton – Strahler	90
Figura 28. Esquema metodología de análisis multivariado con jerarquías analíticas de Saaty	105
Figura 29. Ejemplo de un nivel de jerarquía para análisis de variables	111
Figura 30. Ejemplo de dos niveles de jerarquía para análisis de variables	112
Figura 31. Comparación de funciones sigmoides y tangente hiperbólica	114

Figura 32. Comparación de diferentes normalizaciones para valores positivos de las variables	116
Figura 33. Estructura árbol de clasificación	125
Figura 34. Metodología para construcción de árboles de clasificación para avenidas torrenciales	126
Figura 35. Ejemplo homogeneidad/pureza de un nodo	127
Figura 36. Ejemplo selección del punto de partición de un nodo	129
Figura 37. Regresión logística	132
Figura 38. Metodologías para el análisis de factores detonantes	134
Figura 39. Metodología para determinar umbrales empíricos de lluvia detonante de deslizamientos	136
Figura 40. Ejemplo identificación de umbrales de precipitación detonante de deslizamientos	137
Figura 41. Metodología para determinar umbrales empíricos de lluvia detonante de avenidas torrenciales	139
Figura 42. Ejemplo umbrales de lluvia detonante de avenidas torrenciales	140
Figura 43. Metodología para determinación de amenaza de deslizamientos por aumento del nivel freático	142
Figura 45. Pasos a seguir para modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales	152
Figura 46. Pasos a seguir para modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales	153
Figura 47. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación hidrológica	154
Figura 48. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación de mecanismos detonantes	155
Figura 49. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Generación de hidrogramas de avenida torrencial	156
Figura 50. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación hidráulica de propagación de la avenida y calibración de la reología	157
Figura 51. Clasificación de modelos hidrológicos/hidráulicos	160
Figura 52. Diagrama de flujo modelación lluvia–escorrentía	162
Figura 53. Representación gráfica de métodos de generación de escorrentía	163
Figura 54. Esquema balance hídrico en el suelo TOPMODEL	164
Figura 55. Esquema de tanques modelo SMA	171
Figura 57. Principales drenajes quebrada La Negra	190
Figura 58. Subcuenca quebrada La Negra	191
Figura 59. Polígonos de Thiessen subcuenca río Negro	193
Figura 60. Precipitación y evaporación cuenca quebrada La Negra (8 de abril de 1987 – 31 de diciembre de 1989)	196
Figura 61. Caudales estimados para calibración quebrada La Negra (8 de abril de 1987 – 31 de diciembre de 1989)	197
Figura 62. Índice topográfico de humedad quebrada La Negra	199
Figura 63. Ajuste a la función objetivo para cada parámetro TOPMODEL	201
Figura 64. Sensibilidad regional de los parámetros TOPMODEL	202
Figura 65. Modelación de mecanismos detonantes - deslizamientos generados por lluvia	205

Figura 66. Diagrama de flujo modelación mecanismos detonantes–rotura de presas	218
Figura 67. Mapa geológico cuenca quebrada La Negra	241
Figura 68. Mapa inventario de deslizamientos cuenca quebrada La Negra	244
Figura 69. Mapa de estabilidad para condiciones de humedad medias cuenca quebrada La Negra	247
Figura 70. Mapa de estabilidad para las condiciones de humedad antecedente al evento de avenida torrencial del 17 de noviembre de 1988 cuenca quebrada La Negra	248
Figura 71. Geometría para cálculo de profundidad de represamientos	252
Figura 72. Ubicación posibles embalses generados en la quebrada La Papaya	253
Figura 73. Hidrograma de rotura presa quebrada La Papaya	258
Figura 74. Hidrograma de rotura de presa quebrada La Papaya transitado hasta la desembocadura con quebrada La Negra	259
Figura 75. Hidrograma triangular del SCS	260
Figura 76. Deslizamientos que potencialmente aportan sedimentos al flujo	262
Figura 77. Hidrogramas sintéticos de agua y avenida torrencial subcuenca quebrada La Negra	263
Figura 78. Diagrama de flujo modelación hidráulica y calibración de la reología	266
Figura 79. Diagrama de flujo modelación hidráulica y calibración de la reología	267
Figura 80. Hidrograma transitado hasta el fin del tramo 1	272
Figura 81. Hidrograma de avenida torrencial a transitar en el tramo 2	273
Figura 82. Comparación de profundidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 2$ horas	277
Figura 83. Comparación de profundidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 3$ horas	278
Figura 84. Comparación de velocidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 2$ horas	279
Figura 85. Comparación de velocidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 3$ horas	280
Figura 86. Metodología de POMCAS basado en Modelos de índices e indicadores	288
Figura 87. Dimensiones e indicadores para el análisis de la vulnerabilidad	291
Figura 88. Evaluación de vulnerabilidad en el caso Salgar	293
Figura 89. Análisis de vulnerabilidad en centros urbanos – PREDES	295
Figura 90. Análisis retrospectivo de inundaciones ocurridas	297
Figura 91. Evaluación de vulnerabilidad para POMCAS	298
Figura 92. Indicadores de vulnerabilidad en la jurisdicción CONARE	299
Figura 93. Factores y componentes de la vulnerabilidad	301
Figura 94. Elementos de la vulnerabilidad en organizaciones	302
Figura 95. Análisis de la vulnerabilidad para sector urbano	303

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Definiciones de avenida torrencial	23
Tabla 2. Denominaciones de las avenidas torrenciales en diferentes países	25
Tabla 3. Clasificación de los flujos de lodos según O'Brien y Julien	36
Tabla 4. Clasificación de los flujos de acuerdo con el tipo de sedimento y la pendiente del canal	38
Tabla 5. Clasificación de los flujos de acuerdo con tipo de material y contenido de humedad	39
Tabla 6. Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes	40
Tabla 7. Recomendación de modelo reológico para cada tipo de fluido	51
Tabla 8. Leyenda Corine Land Cover para análisis de susceptibilidad por movimientos, masa y avenidas torrenciales	73
Tabla 9. Unidades geológicas superficiales (UGS)	76
Tabla 10. Subunidades indicativas de procesos de remoción en masa y procesos tipo avenida torrencial	78
Tabla 11. Clasificación de formas fluviales asociadas a inundaciones y avenidas torrenciales	84
Tabla 12. Relieve de acuerdo con la pendiente media	88
Tabla 13. Descripción por rangos índice de compacidad K_c	91
Tabla 14. Descripción por rangos Factor de forma K_f	91
Tabla 15. Descripción rangos relación de elongación	92
Tabla 16. Relaciones para categorizar el índice morfométrico	96
Tabla 18. Categorías del índice de variabilidad	99
Tabla 19. Clasificación del índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)	99
Tabla 20. Relación de las variables fisiográficas con la generación de avenidas torrenciales	106
Tabla 21. Escala de comparación por pares de Saaty	117
Tabla 22. Ejemplo comparación pareada variables fisiográficas	118
Tabla 23. Ejemplo cálculo pesos de las variables	119
Tabla 24. Ejemplo cálculo lamda	120
Tabla 25. Ejemplo cálculo de lamda máx	120
Tabla 26. R.I en función del orden de la matriz	121
Tabla 27. Umbrales para la razón de consistencia	122
Tabla 28. Ejemplo clasificación de eventos históricos para análisis de amenaza	135
Tabla 29. Categorización de la amenaza de acuerdo con el FS	146
Tabla 30. Parámetros TOPMODEL	167
Tabla 31. Comparación de modelos hidrológicos	185
Tabla 32. Coeficiente del tanque evaporímetro tipo A	194
Tabla 33. Rangos de calibración parámetros TOPMODEL	200
Tabla 34. Resultados 17 de noviembre de 1988 para las 5 mejores simulaciones	202
Tabla 35. Clasificación de estabilidad en el modelo SHALSTAB	208
Tabla 36. Clasificación de la susceptibilidad con modelo SHALSTAB	209
Tabla 37. Clasificación de estabilidad modelo de taludes infinitos	211

Tabla 38. Índices de estructura y permeabilidad por textura	227
Tabla 39. Factor K de la USLE en ton/ha	228
Tabla 40. Factor NN	229
Tabla 41. Factor LS para diferentes pendientes y longitudes de pendiente	230
Tabla 42. Factor de cobertura vegetal C_3	234
Tabla 43. Factor C por tipo de cultivo	234
Tabla 44. Factor C por tipo de labranza	235
Tabla 45. Factor P para cultivos a nivel	236
Tabla 46. Factor P para cultivos en fajas	236
Tabla 47. Factor P para diferentes prácticas agrícolas	237
Tabla 48. Caracterización unidades geológicas cuenca quebrada La Negra	239
Tabla 49. Parámetros calibrados SINMAP	242
Tabla 50. Clasificación estabilidad modelo SINMAP	245
Tabla 51. Relaciones área-volumen para cada unidad geológica	250
Tabla 52. Descripción parámetros BREACH	254
Tabla 53. Área y ancho vs altura embalse	257
Tabla 54. Comparación de modelos hidráulicos para avenidas torrenciales	270
Tabla 55. Resultados de la calibración de los parámetros reológicos	274
Tabla 56. Profundidades medidas vs simuladas en el valle de inundación	275
Tabla 57. RSME para los modelos reológicos seleccionados	276
Tabla 58. Matriz de categorización de la intensidad y amenaza por avenidas torrenciales	282
Tabla 59. Categorías del índice de vulnerabilidad en la metodología empleada en POMCAS	289
Tabla 60. Rangos de vulnerabilidad en la metodología basada en dimensiones	292
Tabla 61. Propuesta de clasificación del riesgo	304

RESEÑA DEL LIBRO

Las avenidas torrenciales son fenómenos naturales súbitos y altamente destructivos que han generado grandes pérdidas económicas, humanas y de infraestructura en nuestro país, por lo que debe establecerse como una prioridad la adecuada planificación territorial y gestión del riesgo ante estos eventos.

Este libro resultado del proyecto de investigación ECAPMAPIE012019 titulado “Planeamiento de una metodología integral para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales a escala de cuenca en Colombia”, pretende dar orientaciones teóricas y metodológicas desde el entendimiento de las características de estos fenómenos naturales, el análisis geoespacial y la modelación del recurso hídrico para abordar adecuadamente la gestión del riesgo por avenidas torrenciales.

RESEÑA DE LOS AUTORES

Jessica Paola Páez Pedraza

Ingeniera Ambiental de la Universidad de los Andes, Magíster en Ingeniería Civil - Manejo Sostenible de los Recursos Hídricos e Hidroinformática de la Universidad de los Andes.

Docente e investigadora de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Áreas de investigación: gestión y evaluación del riesgo por avenidas torrenciales e inundaciones, ecohidrología, hidrometeorología, cambio climático, hidráulica fluvial y sedimentología, calidad del agua.

Ingeniera consultora: modelación hidrológica e hidráulica en Planes de Ordenamiento del Recurso Hídrico y reglamentación de corrientes.

Denisse Viviana Cortés Castillo

Licenciada en Biología de la Universidad Pedagógica Nacional, Magíster y Doctora en Ciencias Biológicas con énfasis en Biodiversidad y Conservación de la Universidad Nacional de Colombia.

Investigadora asociada de la Universidad Nacional de Colombia (2012-2016). Docente e investigadora de la Escuela de Ciencias Agrícolas, Pecuarias y del Medio Ambiente de la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD).

Líder del Grupo de Estudios Ambientales Aplicados (GEAA).

Áreas de investigación: biodiversidad y conservación, dendrología y botánica, riesgo por avenidas torrenciales, ecohidrología, cambio climático, calidad del agua a partir de bioindicadores.

Ingeniera consultora: estudios de calidad del agua a partir de bioindicadores ambientales.

PRESENTACIÓN

Las avenidas torrenciales se constituyen como uno de los desastres naturales de mayor importancia en nuestro país debido a la alta susceptibilidad del territorio por sus características de relieve y al establecimiento de poblaciones en zonas de depósito o valles de inundación, es por ello que la evaluación del riesgo es una herramienta fundamental para la planificación territorial y para una efectiva protección de vidas humanas e infraestructura económica y social. Sin embargo, a pesar de la alta frecuencia y el poder destructivo de estos eventos es un fenómeno natural poco estudiado en nuestro país y en el mundo; solo hasta hace muy pocos años se empezaron a desarrollar estudios de riesgo teniendo en cuenta este componente.

Es por ello que en la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) iniciamos el desarrollo del proyecto de investigación ECAPMAPIE012019 titulado “Planteamiento de una metodología integral para la evaluación de amenaza por avenidas torrenciales a escala de cuenca en Colombia”, en la búsqueda de consolidar un acervo conceptual y metodológico robusto para el análisis y modelación de los eventos de avenida torrencial; siendo este libro el producto del proyecto de investigación.

El texto pretende presentar fundamentos teóricos y metodológicos básicos para el análisis de susceptibilidad, amenaza, vulnerabilidad y riesgo por avenidas torrenciales, apoyado en la revisión bibliográfica exhaustiva de más de 100 estudios de diversa índole (Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas [POMCAS], estudios de riesgo, artículos científicos, tesis de posgrado, guías técnicas, entre otros) relacionados con el análisis y la modelación de estos fenómenos, sumado a algunas recomendaciones desde la experiencia de las autoras en la gestión integral del recurso hídrico desde la academia y la consultoría.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos especialmente a la Universidad Nacional Abierta y a Distancia (UNAD) por permitirnos desarrollar el proyecto de investigación del cual hace parte este libro y por el apoyo en todo el proceso de los grupos de investigación Grupo de Estudios Ambientales Aplicados (GEAA) y Grupo de Conservación, Bioprospección y Desarrollo Sostenible (COBIDES).

Agradecemos al profesor titular del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de los Andes, Mario Díaz-Granados Ortiz, por sus valiosas enseñanzas tanto a nivel profesional como personal y por habernos inspirado para ser profesionales íntegros y trabajar arduamente día a día por la gestión sostenible del recurso hídrico en nuestro país.

Finalmente, agradecemos a la Universidad Nacional de Colombia y al Servicio Geológico Colombiano por la información de la cuenca de la Quebrada La Negra, la cual fue utilizada para el desarrollo del caso de estudio de ejemplo.

INTRODUCCIÓN

Las avenidas torrenciales en nuestro país han generado miles de pérdidas de vidas humanas, damnificados y daños en infraestructura y cultivos. Basta con nombrar algunas de las mayores tragedias como Armero en 1985, la cual dejó más de 25 000 víctimas mortales (Noticias Caracol, 2018), la avenida torrencial en el río Tapartó, Antioquia, en 1993, la cual dejó 120 muertos, o algunas de las más recientes como la quebrada La Líboriana, en el municipio de Salgar, la cual dejó 80 fallecidos y 120 desaparecidos (Crecen los afectados por avalancha en Salgar, 2015) o la tragedia de Mocoa que destruyó gran parte del casco urbano del municipio y dejó al menos 200 fallecidos. Es ante este panorama que la gestión del riesgo debe ser una prioridad en nuestro país, apoyada en una adecuada planificación territorial.

Este libro pretende dar orientaciones teóricas y metodológicas que permitan generar herramientas de toma de decisión para la planificación territorial y la adecuada gestión del riesgo en las cuencas más susceptibles, para, de esta forma, evitar a futuro que estos fenómenos naturales se sigan llevando vidas humanas y continúen generando daños irreparables.

“Las tragedias ocasionadas por avenidas torrenciales pueden ser evitadas si se cuenta con una adecuada planificación territorial apoyada en una rigurosa evaluación y zonificación del riesgo”.

Jessica Paola Páez Pedraza
Denisse Viviana Cortés Castillo

Figura 1. Comparación valle de inundación del río Taruca antes y después de la avenida torrencial del 2017



Nota: a) Valle de inundación quebrada Taruca, Mocoa – Putumayo en 2001, se presentan pocas construcciones en la ribera de la quebrada. b) Valle de inundación quebrada Taruca en el 2013 completamente urbanizado (barrios no formalizados). c) Quebrada Taruca se desborda y deposita sedimentos de gran tamaño en la avenida torrencial de 2017 generando una de las mayores tragedias por avenidas torrenciales en Colombia.

Fuente: Google Earth.



CAPÍTULO

GENERALIDADES



Jessica Paola Páez Pedraza

1.1 LAS AVENIDAS TORRENCIALES

Dentro de la gestión del riesgo el análisis de eventos asociados a avenidas torrenciales es de suma importancia debido a que son fenómenos naturales altamente destructivos e impredecibles. Sin embargo, el estudio de este tipo de fenómenos se hace difícil debido a la naturaleza compleja del flujo, lo que lo hace susceptible a confusiones en su definición y modelación. A continuación, se presentan diferentes definiciones de este fenómeno natural, así como algunos de sus sinónimos o denominaciones en algunos países.

Tabla 1. Definiciones de avenida torrencial

Definición	Autor
Una avalancha es un movimiento en masa que se desplaza bruscamente por las laderas de una montaña, arrasando gran cantidad de material rocoso, vegetación y escombros. Pueden variar desde un pequeño flujo superficial hasta una gigantesca masa destructiva.	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2015).
Una avenida torrencial es un flujo violento de agua en una cuenca, a veces reportado como creciente (súbita, rápida), o como torrente. Se aplica cuando en los reportes aparece como 'avalancha', cuando la avenida transporta troncos de árboles o abundantes sedimentos desde finos hasta bloques de roca. Pueden ser generados por lluvias, por ruptura de represamientos o por abundantes deslizamientos sobre una cuenca.	Sistema de inventario de desastres-DesInventar (Velásques y Rosales, 1999, p. 117).
Una avenida torrencial es un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (índice de plasticidad menor que 5 %), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada. Es uno de los movimientos en masa más peligrosos debido a sus características de ocurrencia súbita, altas velocidades y grandes distancias de viaje.	Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo (2017, p. 39).

Definición	Autor
<p>Las avenidas torrenciales son crecidas repentinas producto de fuertes precipitaciones que causan aumentos rápidos del nivel de agua de los ríos y quebradas de alta pendiente. Estas crecientes pueden ser acompañadas por flujo de sedimentos de acuerdo con las condiciones de la cuenca. Debido a sus características pueden causar grandes daños en infraestructura y pérdida de vidas humanas (adaptado de Grupo de Estándares para Movimientos en Masa [GEMMA], 2007).</p>	<p>Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático (IDIGER, 2016).</p>
<p>Las avenidas torrenciales corresponden a crecientes súbitas en cauces de montaña, con descargas pico de gran magnitud, producidas por tormentas severas generalmente de limitada extensión en área.</p>	<p>Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM, 2013).</p>
<p>Una avalancha se refiere a una masa grande de una materia que se desprende por una vertiente, precipitándose por ella.</p>	<p>Real Academia de la Lengua Española (RAE, 2020).</p>

Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con las definiciones de la tabla 1, a lo largo de este documento se tomará la definición del sistema de inventario de desastres DesInventar, ya que esta tiene en cuenta las características más importantes de estos fenómenos: son súbitos y rápidos, pueden transportar altas cantidades de sedimentos, pueden arrastrar troncos y tienen múltiples causas detonantes, entre las más frecuentes los deslizamientos por lluvias intensas.

Adicionalmente, las avenidas torrenciales tienen diferentes denominaciones de acuerdo con el país, por lo cual pueden tomarse como sinónimos aquellos que se presenta en la tabla 2.

Tabla 2. Denominaciones de las avenidas torrenciales en diferentes países

Denominación	País
Avalanchas	Colombia
Huaycos	Perú
Riadas	Bolivia
Lahares	Indonesia
Flujos de detritos o escombros	España

Fuente: Suárez (2009).

1.2 MECANISMOS DETONANTES DE AVENIDAS TORRENCIALES

Para que se desencadene un evento de avenida torrenciales se tienen que cumplir algunas características geológicas e hidrológicas, entre ellas lluvias intensas, suficiente disponibilidad y aporte de sedimentos por parte de la cuenca y un relieve escapado (Hsu et al., 2010). Sin embargo, existen múltiples mecanismos detonantes de una avenida torrenciales, los cuales en muchos casos actúan en conjunto, a continuación, se describen los más importantes.

1.2.1 DESLIZAMIENTOS DE TIERRA POR LLUVIAS INTENSAS

El mecanismo detonante más frecuente de las avenidas torrenciales es la generación de múltiples deslizamientos debido a lluvias intensas, estos se pueden producir por una única lluvia de gran magnitud o por periodos de lluvia prolongada después de épocas de sequía, lo que provoca la saturación del suelo y el desprendimiento de este, que en conjunto con la creciente súbita de agua genera un flujo con alto contenido de sedimentos.

Por otro lado, también se pueden generar deslizamientos de gran magnitud que pueden empezar a fluir en el cauce alcanzando altas velocidades, el flujo va aumentando su concentración de sedimentos a medida que va arrastrando los materiales que encuentra a su paso, generando un proceso de socavación lateral y de fondo (Suárez, 2001).

1.2.2 REPRESAMIENTO DE CAUCES

Este mecanismo actúa en combinación con otros, se genera cuando un deslizamiento de tierra produce una acumulación de agua durante varios días y se genera una presa natural, actuando como un pequeño embalse. Este represamiento se rompe súbitamente con una lluvia intensa y se genera la avenida torrencial (Suárez, 2001).

1.2.3 PROCESOS *IN-CHANNEL*

En zonas de muy alta pendiente durante un evento de lluvia muy fuerte se puede transportar gran cantidad de material de lecho, por encima del transporte de fondo normal (concentración de sedimentos mayor al 20 % en volumen), por lo cual, los procesos *in-channel* se refieren a estos procesos erosivos que generan socavación del canal y transporte de gran cantidad de material (Bateman y Medina, 2019).

1.2.4 SISMOS

Nuevamente este mecanismo está relacionado con la generación de deslizamientos, la ocurrencia de un evento sísmico de gran magnitud y poca profundidad de foco en conjunto con un el periodo de lluvias puede generar deslizamientos generalizados y a su vez la detonación de una avenida torrencial (Suárez, 2001).

1.2.5 DESHIELO DE NEVADOS Y FLUJOS PIROCLÁSTICOS

Los volcanes son altamente susceptibles a la generación de avenidas torrenciales, debido principalmente a su alta pendiente y estructura de capas inclinadas, por lo cual, durante una erupción volcánica, al depositarse los flujos piroclásticos sobre las laderas pueden generar flujos adicionales por las laderas activados por lluvias. Adicionalmente, los volcanes nevados pueden generar más fácilmente estos eventos debido a que las erupciones derriban la nieve generando flujos de lodos, este es el caso del evento ocurrido en Armero, Colombia, en 1985 (Suárez, 2001).

1.3 TIPOS DE FLUJOS

Dependiendo de las características de la avenida torrencial se pueden presentar diferentes tipos de flujos que a su vez presentan diferentes comportamientos, es de anotar

que los flujos de avenida torrencial deben diferenciarse claramente de las inundaciones, ya que estos pueden contener entre un 20 a 90 % de concentración de sedimentos en volumen, lo que hace que su comportamiento sea muy diferente a una inundación.

La principal diferencia entre los flujos se da por su concentración de sedimentos y por el tipo de sedimento (gravas, arenas, limos y arcillas). De acuerdo con esto, en cuencas con alto contenido de limos y arcillas se generan flujos de lodos, mientras que las cuencas con materiales más gruesos como arenas y gravas tienden a generar flujos de detritos o hiperconcentrados (Suárez, 2009).

1.3.1 FLUJOS DE LODO

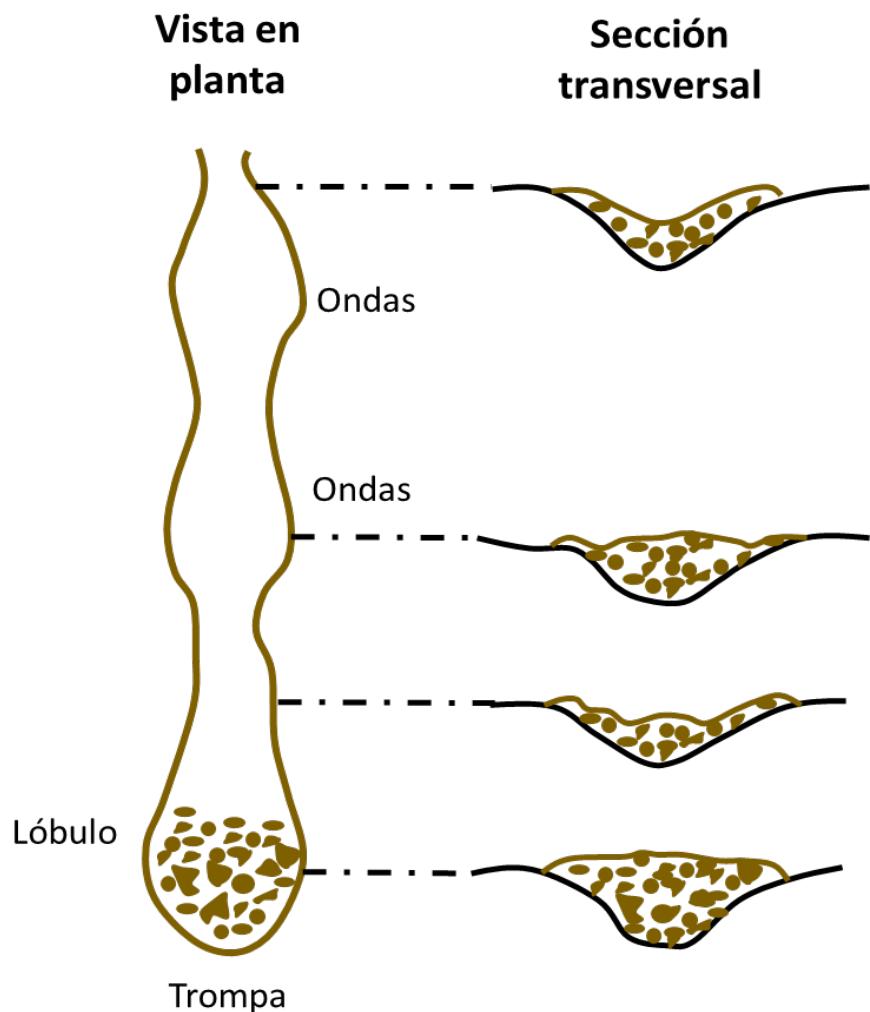
Los flujos de lodos se generan en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos de tipo limos y arcillas, sin embargo, estos flujos pueden también transportar grandes bloques de roca, debido a que a medida que aumenta la concentración de sedimentos estos se floculan rápidamente y la viscosidad aumenta formando cohesión en la mezcla.

Los flujos de lodos se caracterizan por tener pulsos intermitentes, desde 10 hasta cientos de ellos, a medida que se adhieren mayor cantidad de sedimentos el flujo se vuelve más viscoso y lento. Debido a la viscosidad del flujo estos tienden a elevarse en las curvas hasta alturas superiores a los 10 metros y generalmente el flujo es más alto, amplio y empinado en el frente generando una trompa.

Cuando el flujo se acumula se forman depósitos laterales alargados al lado del canal principal, paralelos al flujo, los cuales pueden tener forma de lengua. Durante la sedimentación no ocurre clasificación de los sedimentos, sino que el flujo se mueve como una sola masa (Suárez, 2009).

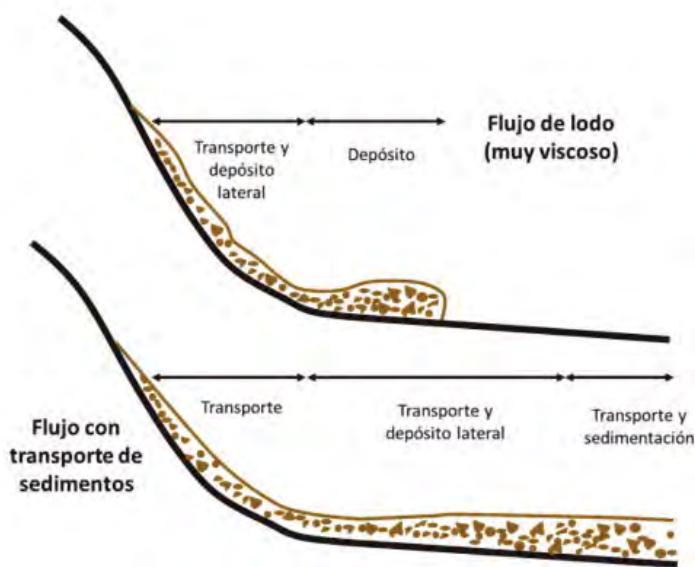
Los flujos de lodos se generan en cuencas con alta disponibilidad de sedimentos de tipo limos y arcillas, sin embargo, estos flujos pueden también transportar grandes bloques de roca.

Figura 2. Representación de un flujo de lodos



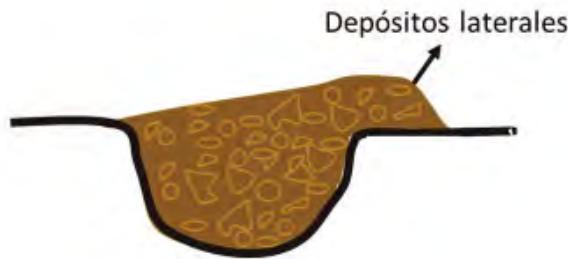
Fuente: adaptado de Johnson y Rodine (1984).

Figura 3. Comparación de un flujo de lodo y uno no viscoso



Fuente: adaptado de Johnson y Rodine (1984).

Figura 4. Depósitos laterales formados en los flujos de lodos por elevación en las curvas



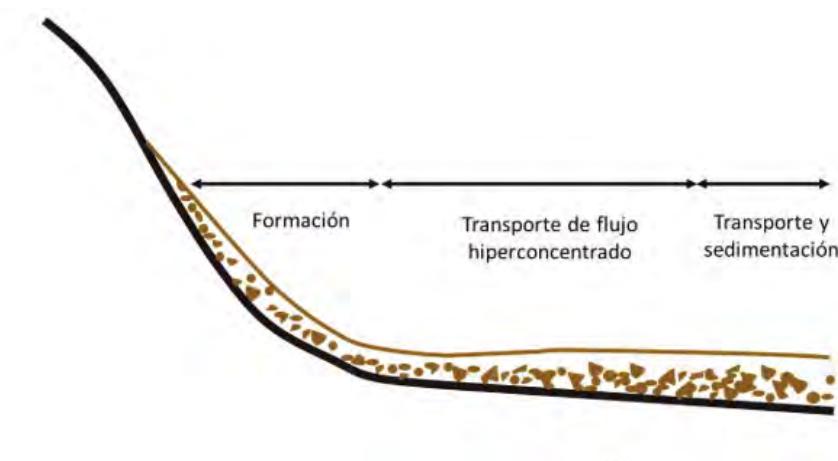
Fuente: adaptado de Johnson y Rodine (1984).

1.3.2 FLUJOS HIPERCONCENTRADOS

Los flujos hiperconcentrados pueden tener concentraciones de sedimentos mayores al 5 % y menores al 60 % en volumen; a diferencia de los flujos de lodos estos no son viscosos debido principalmente a la granulometría de los sedimentos, que es mucho más gruesa y que está compuesta por arenas, gravas cantos y bloques, lo que genera poca cohesión en la mezcla agua sedimento formando un flujo turbulento débil (Suárez, 2009).

En los flujos hiperconcentrados las partículas se mueven parcialmente como carga de fondo y parcialmente suspendida; y debido a que poseen cierto grado de plasticidad forman patrones de deformación a lo largo de la corriente. Cuando las partículas se van sedimentando, primero las más gruesas y luego las más finas, se forma un depósito clasificado de partículas (Suárez, 2001). En la figura 5 se presenta esquemáticamente un flujo hiperconcentrado granular.

Figura 5. Esquema de flujo hiperconcentrado



Fuente: adaptado de Suárez (2001).

1.3.3 FLUJOS DE DETRITOS O ESCOMBROS

Cuando en un flujo se aumenta la concentración de sedimentos por encima del 60 % en volumen se convierte en un flujo de detritos (*debris flow*) y la mezcla agua-sedimento se convierte en una pasta similar al concreto húmedo; esta mezcla es capaz de sostener en suspensión partículas del tamaño de gravas en bajas velocidades o incluso en condiciones estáticas. Sin embargo, si el cauce en el que se presenta el flujo de detritos es de muy alta pendiente el flujo puede alcanzar altas velocidades y transportar grandes bloques en suspensión (Suárez, 2009).

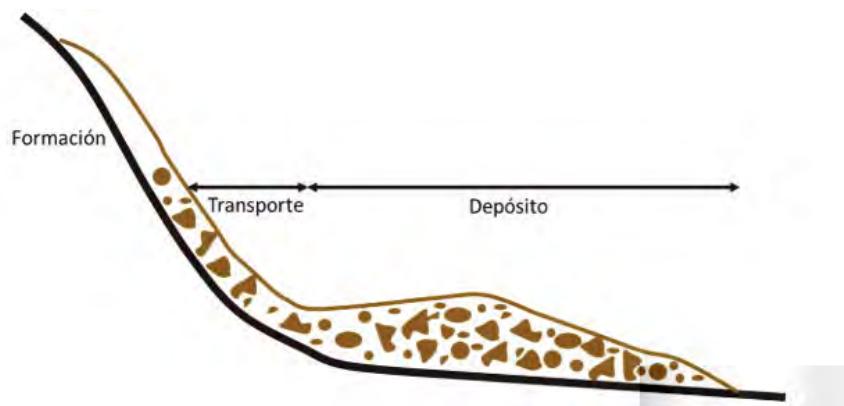
En los flujos de detritos los sedimentos controlan el flujo y puede relacionarse como un flujo “turbulento de granos”, el movimiento se produce por transferencia de momentum al colisionar las partículas o bloques que se mueven. A su vez, al generarse esta colisión de partículas existe un esfuerzo cortante interno y el flujo puede comportarse como un fluido no newtoniano dilatante.

El depósito del flujo se da cuando hay una disminución de la pendiente, aumento del ancho del canal o presencia de obstáculos que aumenten la resistencia del flujo y disminuyan su velocidad. A medida que se depositan los materiales se forman especies de diques que hacen levantar el flujo, como se muestra en la figura 6, lo cual fomenta aún más el proceso de depósito.

Cuando el cambio en el ancho del cauce o en la pendiente es muy fuerte, la velocidad disminuye drásticamente y se deposita la mayoría del material sólido, formando abanicos o barras de grandes bloques. Primero se depositan las partículas de mayor tamaño, mientras las partículas finas tratan de recorrer una distancia mayor antes de producirse la sedimentación (Suárez, 2001).

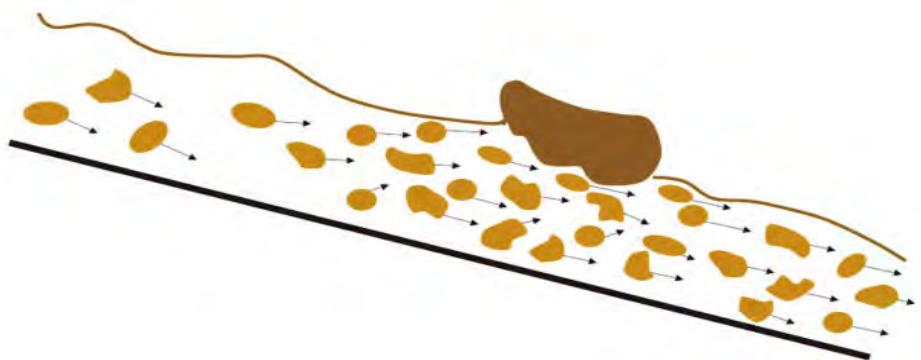
Cuando el cambio en el ancho del cauce o en la pendiente es muy fuerte, la velocidad disminuye drásticamente y se deposita la mayoría del material sólido, formando abanicos o barras de grandes bloques.

Figura 6. Representación flujo de detritos



Fuente: adaptado de Suárez (2009).

Figura 7. Flotación de grandes bloques en flujos de detritos



Nota: el bloque viaja a menor velocidad que el resto del flujo

Fuente: adaptado de Suárez (2009).

1.3.4 CLASIFICACIÓN DE LOS FLUJOS POR TIPO Y CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS

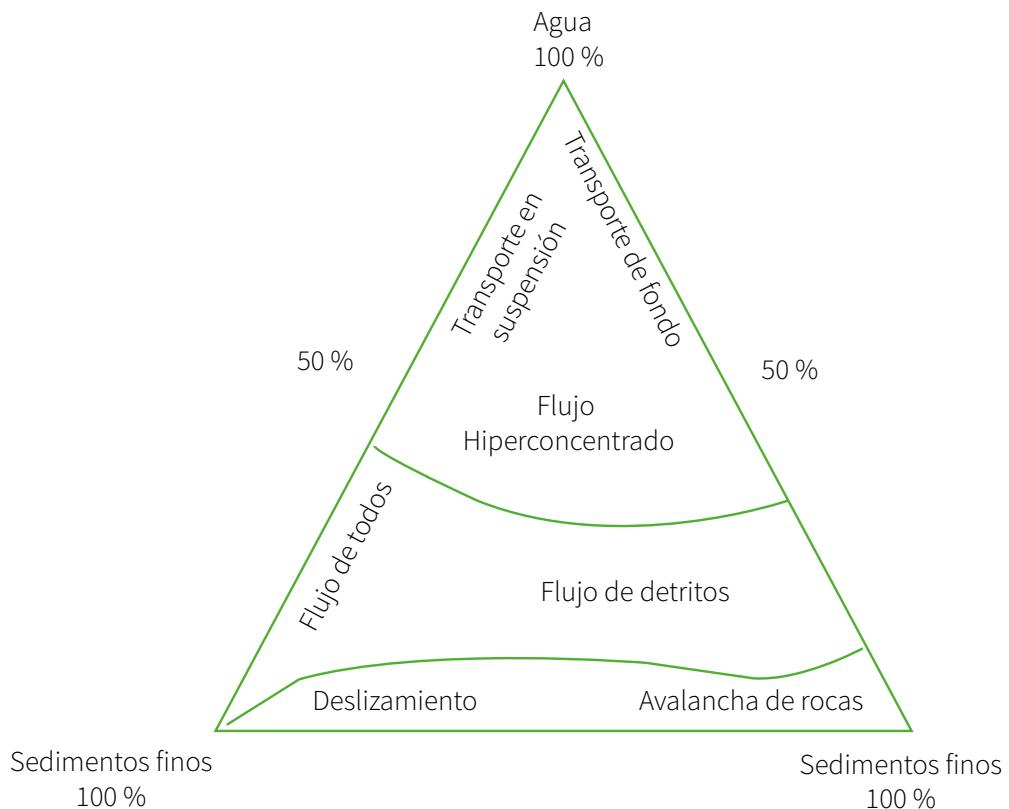
Como se ha indicado anteriormente cada tipo de flujo tiene características diferentes, por lo cual a la hora de realizar una evaluación del riesgo por estos eventos es importante tener una noción inicial de cuál es el tipo de flujo que se puede presentar en la zona de estudio, ya que esto va a influir en su comportamiento y en los posibles daños provocados.

El tipo de flujo no depende únicamente de la concentración de sedimentos, sino también del tipo de sedimento. A mayor cantidad de sedimentos finos con concentraciones superiores al 20 % se puede estar generando un flujo de lodos, mientras que si el tipo de sedimento predominante es del tipo gravas o arenas se puede generar un flujo hiperconcentrado o un flujo de detritos; a mayor concentración de sedimentos más se va a asemejar a un fujo de detritos, mientras que para concentraciones superiores al 70 – 80 % en volumen ya se podría estar hablando de avalanchas de rocas o de deslizamientos de tierra.

Existen varias herramientas como diagramas y tablas que permiten realizar un acercamiento al tipo de flujo, teniendo en cuenta la concentración y tipo de sedimentos. Entre ellos se encuentran los diagramas de fases los cuales son similares a un triángulo textural, en ellos en uno de los vértices se encuentra el contenido de agua y en los otros dos el tipo de sedimento, sea fino o grueso. Algunos de estos diagramas tienen en cuenta los flujos de lodo, mientras que otros únicamente los flujos hiperconcentrados y de detritos.

En la figura 8 se presenta el diagrama de fases de Rickenmann (2016) quien lo modificó basado en el original de Phillips y Davis (1991). En este diagrama se observa que para concentraciones superiores al 50 – 60 % se tiene un flujo de detritos o de lodos, mientras que para concentraciones inferiores puede comportarse bien sea como agua con transporte de sedimentos o como un flujo hiperconcentrado. Así mismo, se presenta en la figura 9 el diagrama de Coussot y Meunier (1996), el cual clasifica los flujos de acuerdo con el tipo de material, sea granular o cohesivo, y la cantidad de agua y sedimentos, así como la velocidad del flujo.

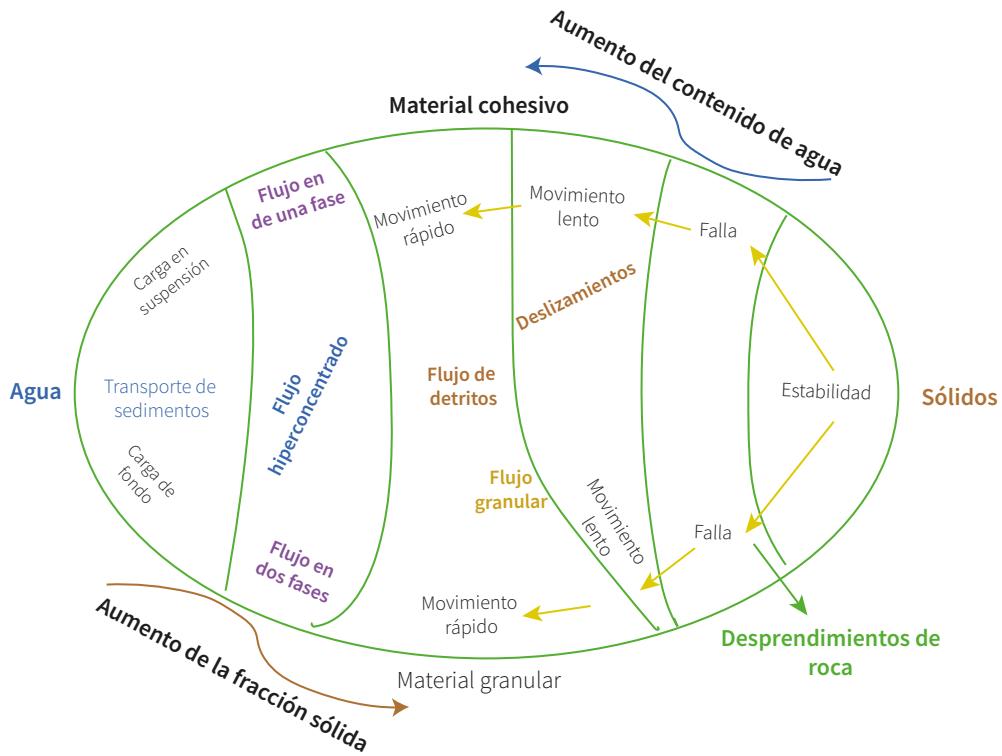
Figura 8. Diagrama de fases de flujos de escombros y deslizamientos



Fuente: adaptado de Rickenmann (2016).

En este diagrama se observa que para concentraciones superiores al 50 – 60 % se tiene un flujo de detritos o de lodos, mientras que para concentraciones inferiores puede comportarse bien sea como agua con transporte de sedimentos o como un flujo hiperconcentrado.

Figura 9. Clasificación de los flujos y deslizamientos de acuerdo con la fracción sólida y el tipo de material



Fuente: adaptado de Coussot y Meunier (1996).

Por su parte, O'Brien y Julien (1997) estudiaron los flujos de lodos y encontraron algunas características relevantes de estos de acuerdo con la concentración de sedimentos (en su mayoría finos) como se presenta en la tabla 3. Sin embargo, en el 2000 O'Brien, desarrollador del modelo FLO-2D, uno de los primeros modelos hidráulicos que permiten realizar modelación de flujos de avenida torrencial, modificó esta clasificación de tal forma que el tipo de flujo dependiera directamente de la concentración de sedimentos en volumen y en peso, clasificación modificada también por Suárez (2009) de tal forma que se incluyeran los flujos hiperconcentrados y los flujos de detritos, como se observa en la figura 10. Suárez (2009) también presenta una clasificación

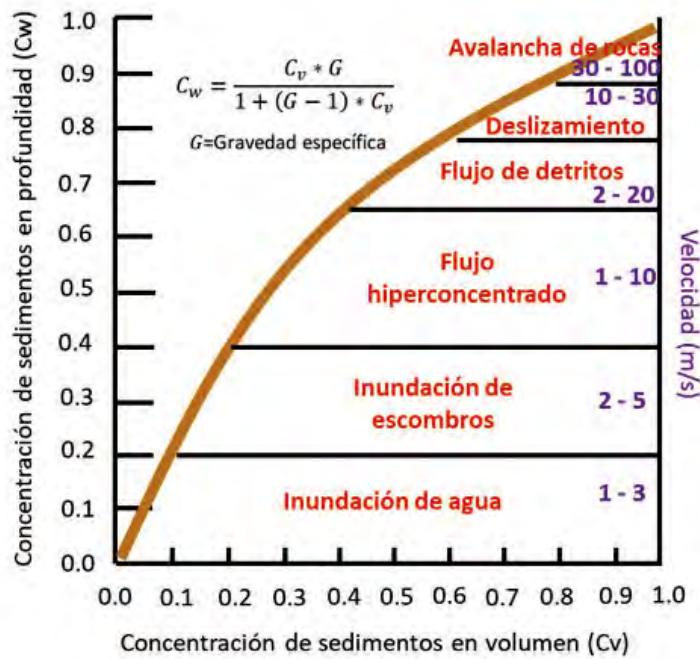
que tiene en cuenta, adicionalmente, la pendiente del canal, como se observa en la tabla 4.

Tabla 3. Clasificación de los flujos de lodos según O'Brien y Julien

Tipo de flujo	Concentración de sedimentos		Características
	En volumen	En peso	
Deslizamiento	0,65 – 0,80	0,83 – 0,91	No fluye, falla por deslizamiento de bloques.
	0,55 – 0,65	0,76 – 0,83	Falla por deslizamiento de bloques con deformación interna durante el deslizamiento; repto lento ante de la falla.
Flujo de lodos	0,48 – 0,55	0,72 – 0,76	Flujo de lodos lento con repto sostenido; deformación plástica bajo su propio peso; cohesivo, no fluye en superficie plana.
	0,45 – 0,48	0,69 – 0,72	Fluye en superficie plana, flujo cohesivo.
Crecida de lodo	0,40 – 0,48	0,65 – 0,69	El flujo se mezcla fácilmente, en la deformación muestra características de un fluido, se extiende en superficie horizontal pero la superficie del fluido mantiene cierta inclinación; asentamiento de partículas grandes; con aparición de ondas que se disipan rápidamente.
	0,35 – 0,40	0,59 – 0,65	Marcado asentamiento de gravas, desparrame casi total en superficie horizontal; aparecen dos fases fluidas en la superficie líquida, las ondas viajan en superficie.
	0,3 – 0,35	0,54 – 0,59	Separación del agua en superficie, las ondas viajan fácilmente, la mayoría de grava y arena se ha asentado y se mueve como carga de fondo.
Crecida de agua	0,2 – 0,30	0,54 – 0,41	Acción distinta de la onda, superficie fluida, todas las partículas descansan sobre el lecho en condiciones estáticas.
	<0,20	<0,41	Crecida de agua convencional con carga en suspensión y arrastre de fondo.

Fuente: O'Brien y Julien (1997).

Figura 10. Clasificación de los deslizamientos y flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos



Fuente: adaptado de Suárez (2009).

Existen varias herramientas como diagramas y tablas que permiten realizar un acercamiento al tipo de flujo, teniendo en cuenta la concentración y tipo de sedimentos.

Tabla 4. Clasificación de los flujos de acuerdo con el tipo de sedimento y la pendiente del canal

Características sedimentos	Concentración sedimentos (Kg/m ³)	Pendiente del canal (%)				
		>100	100 – 50	50 – 20	20 – 10	10 – 5
Más del 20 % del peso total de los sedimentos son partículas finas	<90		Flujo hiperconcentrado		Flujo de lodo	
	>90			Flujo de lodo		
	<300			Flujo hiperconcentrado		
Menos del 20 % del peso total de los sedimentos son partículas finas	300 – 600	Flujo turbulento de escombros (<i>debris flow</i>)		Flujo hiperconcentrado		
	600 - 900			Flujo turbulento de escombros (<i>debris flow</i>)		
	>900			Flujo laminar de escombros		

Fuente: Suárez (2009).

Finalmente, Hungr et al. (2001) presentan una clasificación de acuerdo con el tipo de material, el contenido de humedad y la escala de velocidad para deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes (1996), como se observa en la tabla 5.

Es de aclarar, que estas herramientas son únicamente aproximaciones que permiten conocer el tipo de flujo que se producirá en un cauce basado en un profundo conocimiento de la geología de la cuenca y materiales del cauce, sin embargo, en lo posible se deben estudiar eventos históricos para determinar con mayor certeza el tipo de flujo y así mis-

mo la escogencia de la reología más adecuada para describir su comportamiento.

Tabla 5. Clasificación de los flujos de acuerdo con tipo de material y contenido de humedad

Material	Contenido de humedad	Condición especial	Velocidad	Denominación
Limo, arena, grava y derrubios	Seco, húmedo o saturado	No hay exceso de presión intersticial. Volumen limitado	Varias	Flujo de arenas no licuables
Limo, arena, derrubios y roca débil (alta porosidad)	Saturado en la superficie de rotura	Material licuable. Contenido de humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo deslizante o fluidización de arenas
Arcilla sensitiva	En o por encima del límite líquido	Licuefacción <i>in situ</i> . Humedad constante	Extremadamente rápida	Flujo deslizante o fluidización de arcillas
Turba	Saturado	Exceso de presión intersticial	Lenta a muy rápida	Flujo de turbas
Arcilla o tierra	Cercano al límite plástico	Movimiento lento. Flujo rígido sin deformación cortante	Menor que rápida	Flujo de tierra (alud)
Derrubios	Saturado	Incremento en el contenido de humedad	Extremadamente rápida	Flujo de detritos
Lodo	En o por encima del límite líquido	Flujo de derrubios de granos finos	Mayor que muy rápida	Flujo de lodo
Derrubios	Presencia de agua libre	Descarga del mismo orden de una avenida o crecida	Extremadamente rápida	Torrente de detritos

Material	Contenido de humedad	Condición especial	Velocidad	Denominación
Derrubios	Parcial o totalmente saturado	Canal no consolidado. Relativamente superficial, fuerte pendiente	Extremadamente rápida	Avalancha de detritos
Roca fragmentada	Principalmente seco	Roca intacta en el origen	Extremadamente rápida	Avalancha de rocas

Fuente: Hungr et al. (2001).

Tabla 6. Escala de velocidades de deslizamientos propuesta por Cruden y Varnes

Descripción	Velocidad
Extremadamente rápida	>5 m/s
Muy rápida	0,05 – 5 m/s
Rápida	0,05 m/s – 1,8 m/h
Moderada	1,8 m/h – 13 m/mes
Lenta	13 m/mes – 1,6 m/año
Muy lenta	1,6 m/año – 16 mm/año
Extremadamente lenta	<16 mm/año

Fuente: Cruden y Varnes (1996).

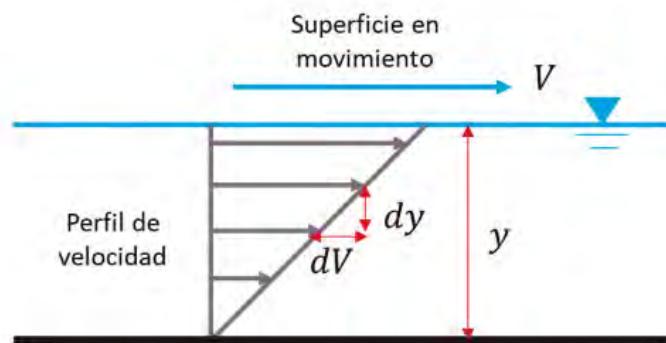
1.4 TIPOS DE FLUIDOS Y REOLOGÍAS

La reología se refiere a la rama de la física que estudia la viscosidad, plasticidad y elasticidad de la materia, los modelos reológicos permiten describir el comportamiento de los fluidos. El más utilizado es la ley de viscosidad de Newton, en la cual la fuerza ejercida para deformar el fluido o esfuerzo cortante depende linealmente de la velocidad de deformación, este es el modelo utilizado para el agua. Sin embargo, existen otros tipos de fluidos que no siguen esta ley, estos se denominan fluidos no newtonianos, para los cuales se describe su comportamiento utilizando componentes adicionales del esfuerzo cortante.

El esfuerzo cortante se puede definir como la fuerza requerida para deslizar una capa de área unitaria de una sustancia o fluido sobre otra, por lo cual es una fuerza por unidad de área. Cuando se ejerce esta fuerza el fluido genera una resistencia, esta resistencia al movimiento de un fluido o velocidad de deformación se denomina viscosidad, la proporcionalidad entre la deformación del fluido y el esfuerzo cortante aplicado se denomina viscosidad dinámica o absoluta y se representa con la letra μ para los fluidos newtonianos, para los cuales mantiene un valor constante y η para los fluidos no newtonianos para los cuales es un valor variable (Mott, 2015).

En un fluido en contacto con una superficie el esfuerzo cortante va a disminuir conforme se acerque más a la superficie, por lo que la velocidad de la superficie va a ser mayor a la del fondo, ya que se está ejerciendo una menor resistencia, como se observa en la figura 11.

Figura 11. Representación del perfil de velocidades de un fluido



Fuente: elaboración propia.

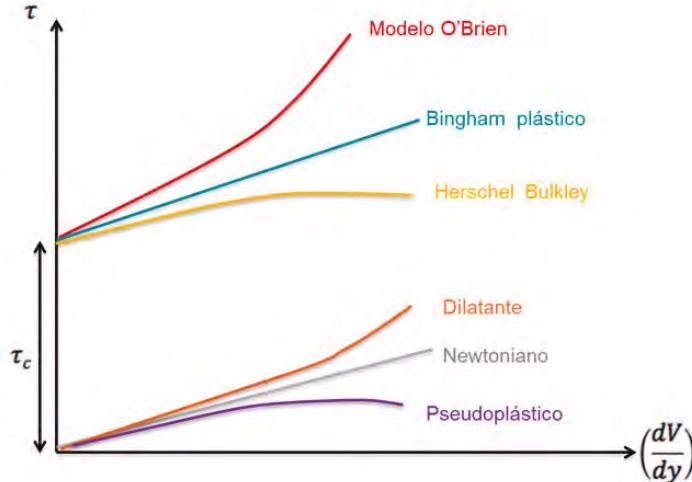
En algunos casos los flujos de avenida torrencial pueden ser modelados con la ley de viscosidad de Newton, es decir como si se tratara únicamente agua con transporte de sedimentos; sin embargo, cuando se tienen altas concentraciones de sedimentos lo más recomendable es modelar estos flujos como fluidos no newtonianos, ya que, dependiendo de la cantidad y tipo de sedimento, el flujo puede convertirse en un fluido viscoso en el cual existen más partículas en constante choque que agua.

Si bien no existe un límite claro entre lo que podríamos denominar fluidos viscosos y fluidos no viscosos, de forma general se puede decir que los fluidos que tienen menor viscosidad que la del agua corresponden a fluidos móviles, mientras que aquellos que tienen una mayor viscosidad se denominan fluidos viscosos. De acuerdo con lo anterior, para efectos de este documento se denominarán fluidos viscosos a aquellos que tienen una viscosidad superior a la del agua debido a su alto contenido de sedimentos finos y se comportan como una sola masa, es decir son de una fase, mientras que aquellos fluidos que tienen una moderada o baja concentración de sedimentos finos y una viscosidad similar a la del agua, presentan dos fases agua – sedimento y corresponden a fluidos no viscosos.

Sin embargo, es de aclarar que esto puede ser muy variable y no existen límites claros que determinen el punto de transición entre fluidos viscosos y no viscosos sobre todo cuando se habla de flujos hiperconcentrados, por lo cual es importante que al escoger la reología se tengan en cuenta varios modelos de fluido y se seleccione el que más se ajuste a las condiciones particulares de la cuenca.

Los modelos de fluidos no newtonianos más utilizados para la modelación de avenidas torrenciales son el tipo Bingham, los fluidos pseudoplásticos y los fluidos dilatantes. Los fluidos tipo Bingham son viscosos y requieren de un esfuerzo cortante mínimo para que inicien su fluidez, mientras que los fluidos pseudoplásticos son aquellos que fluyen más fácilmente cuanto mayor sea el esfuerzo cortante, al contrario, los fluidos dilatantes fluyen más difícilmente cuanto mayor sea el esfuerzo cortante. En la figura 12 se observa el comportamiento de los diferentes tipos de fluidos en función del esfuerzo cortante aplicado.

Figura 12. Tipos de fluidos newtonianos y no newtonianos



Fuente: elaboración propia.

1.4.1 FLUIDOS NEWTONIANOS

Los fluidos newtonianos como su nombre lo indica siguen la ley de viscosidad de Newton, por lo cual existe una relación lineal entre la viscosidad y el esfuerzo cortante, para estos fluidos la viscosidad es constante y es el modelo utilizado para los flujos de agua.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

Donde:

τ = Esfuerzo cortante

μ = Viscosidad dinámica

v = Velocidad

y = Profundidad

Los flujos hiperconcentrados también pueden ser modelados como fluidos newtonianos, sin embargo, debido a la alta concentración de sedimentos y choques entre las partículas hay mayor disipación de energía potencial (Suárez, 2009), por lo cual, si se quiere utilizar este modelo para las avenidas torrenciales se debe aumentar el coeficiente de Manning a valores mucho mayores a los comúnmente utilizados, ese n de pseudo-Manning puede oscilar entre 0,08 – 0,14. En China, se utiliza la siguiente relación para calcular el n de pseudo-Manning, donde h corresponde a la profundidad del flujo:

$$n = 0,035 * h^{0,34}$$

1.4.2 FLUIDOS NO NEWTONIANOS

Los fluidos no newtonianos pueden ser representados sumando cinco componentes de esfuerzos cortantes, los esfuerzos incluidos en la ecuación dependen del tipo de fluido, sea turbulento, pseudoplástico, Bingham o dilatante, como se muestra a continuación.

$$\tau = \tau_o + \tau_{mc} + \tau_v + \tau_t + \tau_d$$

Donde:

τ_c = Esfuerzo de cedencia

τ_o = Esfuerzo límite cohesivo

τ_{mc} = Esfuerzo Mohr –Coulomb

τ_v = Esfuerzo cortante viscoso

τ_t = Esfuerzo cortante turbulento

τ_d = Esfuerzo cortante dispersivo

$$\tau = \tau_c + \eta \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

$$\tau_c = \tau_o + \tau_{mc}$$

$$\tau_t + \tau_d = C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

C = Coeficiente turbulento dispersivo

η = Viscosidad dinámica aparente

1.4.2.1 Modelo Bingham

Los fluidos Bingham son del tipo viscoso y se comportan como un sólido hasta que se sobrepasa un esfuerzo cortante mínimo o esfuerzo de cedencia. A partir de ese momento la relación entre deformación y esfuerzo cortante puede ser lineal como en los fluidos newtonianos o similar a los fluidos pseudoplásticos o dilatantes. En estos fluidos las fuerzas de Van der Waals producen una atracción mutua entre partículas que las inmoviliza hasta que se produce un esfuerzo cortante mínimo. Adicionalmente, estos fluidos pueden fluir en superficies planas, mientras que los no viscosos pueden fluir únicamente con la existencia de una pendiente. El modelo Bingham fue introducido por Bingham y Green (1919) y la ecuación que lo describe es la siguiente.

$$\tau = \tau_o + \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

1.4.2.2 Modelo de Herschel Bulkley

El modelo de Herscher y Bulkely (1962) es muy similar al Bingham y también requiere de un esfuerzo cortante mínimo para empezar a fluir, en este último k se reemplaza por la viscosidad dinámica y $n=1$. Este modelo puede ser utilizado para representar lodos bajo un amplio rango de granulometrías.

$$\tau = \tau_o + k \left(\frac{dv}{dy} \right)^n$$

k = Factor de consistencia

n = Índice de flujo

El coeficiente k permite representar la viscosidad o espesamiento del fluido, mientras que n indica el grado con el cual el fluido se está adelgazando o espesando, estos son parámetros que deben ser calibrados.

1.4.2.3 Modelos de fluidos dilatantes

En los fluidos dilatantes la viscosidad se hace mayor a medida que aumenta el esfuerzo cortante, hasta que llega a un punto en que esta toma un valor constante, es decir hay mayor resistencia al flujo para mayores esfuerzos cortantes (Ibarrola, 2015), la ecuación que describe el modelo general de fluidos dilatantes es la siguiente.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) + c \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

De acuerdo con Takahashi (1991), el flujo de detritos está compuesto por una fase líquida y una sólida, por lo cual derivó ecuaciones de conservación de *momentum* para cada fase y sumó las ecuaciones de las dos fases, los esfuerzos de colisión entre partículas y los esfuerzos en el flujo intersticial, debidos a la turbulencia y viscosidad, para generar su modelo de flujo dilatante (Suárez, 2009).

1.4.2.4 Modelo cuadrático de O'Brien

Por otra parte, se encuentra el modelo cuadrático de O'Brien y Julien (1985), este modelo incluye todos los componentes de esfuerzo cortante, y los parámetros de viscosidad y esfuerzo de cedencia dependen de la concentración de sedimentos, es similar al modelo Bingham, pero con un comportamiento dilatante.

$$\tau = \tau_c + \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) + C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

$$\mu = \alpha_1 * e^{\beta_1 c}$$

$$\tau_c = \tau_o + \tau_{mc}$$

$$\tau_c = \alpha_2 * e^{\beta_2 [c]}$$

$$C = \rho_m l_m + f(\rho_m, c) d_s^2$$

Donde:

$\alpha_1, \alpha_2, \beta_1, \beta_2$ = Coeficientes que dependen del tipo de sedimento

c = Concentración de sedimentos

P_m = Densidad de la mezcla

l_m = Longitud de mezcla

d_s = Diámetro medio de los sedimentos

1.4.2.5 Modelo de Bagnold

(Bagnold, 1954) desarrolló un modelo de fluido dilatante en el cual diferencia tres tipos de flujos que dependen del diámetro, la densidad y la concentración de los sedimen-

tos: un régimen macroviscoso, régimen transicional y régimen granular inercial, los cuales se pueden determinar mediante el número de Bagnold, de la siguiente forma:

$$B_a = \frac{\lambda^{\frac{1}{2}} * \rho_s * c^2 \left(\frac{dv}{dy} \right)}{\mu}$$

$$\lambda = \frac{1}{\left(\frac{C_0}{C} \right)^{\frac{1}{3}} - 1}$$

Donde:

c = Diámetro de la partícula

C = Concentración en volumen de sólidos (debe ser menor a $0,9 * C_0$)

C_0 = Máxima concentración posible (en partículas esféricas 0,74 y en materiales granulares 0,65)

$\frac{dv}{dy}$ = Velocidad de deformación

μ = Viscosidad dinámica

ρ_s = Densidad de las partículas sólidas

Por lo tanto, se tiene una ecuación que describe el esfuerzo cortante en función de la deformación del fluido para cada régimen así:

$B_a < 40 \rightarrow \text{Régimen macroviscoso}$

$40 \leq B_a \leq 450 \rightarrow \text{Régimen de transición}$

$B_a > 40 \rightarrow \text{Régimen granular inercial}$

Régimen macroviscoso:

$$\tau = a_v * \lambda^{\frac{3}{2}} * \mu \left(\frac{dV}{dy} \right) * \operatorname{sen}(\alpha_1)$$

$$a_v = 3,75; \alpha_1 \cong 37^\circ$$

Régimen granular inercial:

$$\tau = a_i * \rho_s * \lambda^2 * c^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 * \sin(\alpha_1)$$

$$a_i = 0,042 \text{ para } \lambda < 14; a_i = 0,24 \text{ para } 14 < \lambda < 17; \alpha_1 \cong 17^\circ$$

Donde:

a_v, a_i = Constante experimental

α_1 = Ángulo de fricción dinámico (diferente al ángulo de fricción interna)

1.4.2.6 Modelo de Takahashi

El modelo de Takahashi (1978) se basa en el de Bagnold, pero introduciendo modificaciones en el parámetro a_i , además se incorpora una ecuación que permite calcular el valor de α_1 , la cual es función de la concentración de sedimentos y es válida para concentraciones mayores al 30 %, este es el modelo más utilizado en Japón.

Régimen granular inercial:

$$\tau = a_i * \rho_s * \lambda^2 * c^2 \left(\frac{dV}{dy} \right)^2 * \sin(\alpha_1)$$

$$\tan(\alpha_1) = \left(\frac{C_0}{C} \right)^{\frac{1}{3}} \tan(\phi)$$

ϕ = Ángulo de fricción interna del flujo

$$0,35 \leq a_i \leq 0,5$$

1.4.2.7 de Mohr – Coulomb

El modelo de Mohr – Coulomb fue propuesto por Jonhson (1970) basado en el modelo de Coulomb, que es utilizado para movimiento de suelos, y combinándolo con una modificación del modelo Bingham.

En este modelo el esfuerzo cortante depende de un esfuerzo mínimo o esfuerzo de cedencia (C) y del ángulo de fricción interna del material. Para los suelos el ángulo de fricción interna se relaciona con el ángulo de reposo o ángulo máximo posible para el cual un material va a permanecer en reposo sin deslizarse. Sin embargo, para el caso de las avenidas torrenciales este ángulo corresponde al ángulo del terreno para el cual el flujo empieza a frenarse y depositarse.

En este modelo el esfuerzo de cedencia depende de la cohesión de las partículas, definida como la adherencia entre partículas producida por fuerzas intragranulares.

$$\tau = C + \sigma_n \tan\phi$$

$$\tau_{mc} = C$$

Donde:

C= Cohesión

σ_n = Esfuerzo normal

ϕ = Ángulo de fricción interna

En 1970 Johanson propuso que el esfuerzo cortante total debía ser definido como una combinación del esfuerzo de Coulomb y el esfuerzo viscoso, resultando el modelo viscoso de Mohr – Coulomb:

$$\tau = C + \sigma_n \tan\phi + \mu \left(\frac{dv}{dy} \right)$$

1.4.2.8 de Voellmy

Este modelo fue desarrollado por Voellmy (1955) para avalanchas de nieve y Körner (1976) lo implementó para avalanchas de roca. Tiene en cuenta el coeficiente de fricción (C_z), la densidad del flujo y el ángulo de fricción interna (ϕ)

$$\tau = g\rho \left(h \cos(\theta) \tan(\phi) + \left(\frac{V}{C_z} \right)^2 \right)$$

1.4.2.9 de fluido pseudoplástico

En los fluidos pseudoplásticos la viscosidad medida por la pendiente de la curva de deformación decrece con el incremento del esfuerzo cortante hasta alcanzar un valor asintótico constante (Ibarrola, 2015); a mayor velocidad de corte menor viscosidad y a menor velocidad de corte mayor viscosidad. Teniendo en cuenta lo anterior, un fluido pseudoplástico fluye más fácilmente cuanto mayor sea el esfuerzo cortante. Este tipo de modelo de fluidos no es utilizado comúnmente en la modelación de avenidas torrenciales.

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dy} \right) - C \left(\frac{dv}{dy} \right)^2$$

1.4.3 Selección del modelo reológico de acuerdo con el tipo de flujo

Como se indicó en numerales anteriores, el comportamiento de cada tipo de flujo es diferente de acuerdo con la concentración y tipo de sedimento, por lo cual es importante escoger adecuadamente el modelo reológico adecuado para describir el comportamiento del flujo. De acuerdo con lo anterior, es de aclarar que existen modelos reológicos específicos para los flujos viscosos, como los Bingham y aquellos que tienen en cuenta un esfuerzo cortante de cedencia y modelos para flujos turbulentos no viscosos como los de Takahashi o Voellmy.

De tal forma, que de manera general podríamos decir que los flujos de lodos corresponden a fluidos viscosos, mientras que los flujos de detritos son fluidos turbulentos no viscosos; sin embargo, cuando la concentración de sedimentos es superior al 85 – 90 % el flujo de detritos se convierte en laminar y puede llegar a tener un comportamiento viscoso.

En medio de los dos flujos anteriormente mencionados, se encuentran los flujos hiperconcentrados granulares, los cuales pueden ser viscosos o no viscosos dependiendo de la concentración de sedimentos finos, ese tipo de flujos cuando no son viscosos pueden ser descritos con el modelo tradicional de Manning, sin embargo, para estos casos se debe incorporar un valor de ***n*** de Manning muy superior al valor tradicional para flujos de agua, de tal forma que se tenga en cuenta la disipación de energía por el choque entre las partículas. De acuerdo con lo anterior, en la tabla 7 se presentan los modelos reológicos recomendados para cada tipo de flujo.

Tabla 7. Recomendación de modelo reológico para cada tipo de fluido

Tipo de flujo	Modelo reológico recomendado
Flujo de lodos (viscoso)	Bingham / Herschel Bulkley/ O'Brien
Flujo hiperconcentrado granular (viscoso)	Bingham/ O'Brien
Flujo hiperconcentrado granular (no viscoso)	Manning/ Bagnold / Voellmy
Flujo turbulento de detritos (no viscoso)	Bagnold /Takahashi /Mohr – Coulomb /Voellmy
Flujo laminar de detritos (viscoso)	Bingham/ O'Brien

Fuente: modificado de Chien y Wan (1999) y Takahashi (1991).

1.5 ANÁLISIS DE RIESGO

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012 el análisis de riesgo:

implica la consideración de las causas y fuentes del riesgo, sus consecuencias y la probabilidad de que dichas consecuencias puedan ocurrir. Es el modelo mediante el cual se relaciona la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos, con el fin de determinar los posibles efectos sociales, económicos y ambientales y sus probabilidades. Se estima el valor de los daños y las pérdidas potenciales y se compara con criterios de seguridad establecidos, con el propósito de definir los tipos de intervención y alcance de la reducción del riesgo y preparación para la respuesta y recuperación.

Por lo cual, el análisis de riesgo incluye determinar la amenaza y la vulnerabilidad de los elementos expuestos; en el caso de las avenidas torrenciales la amenaza sería la probabilidad de ocurrencia de un evento y su magnitud, mientras que la vulnerabilidad tendría en cuenta la fragilidad de las comunidades expuestas a esta posible amenaza.

1.5.1 AMENAZA

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012 la amenaza se constituye como un peligro latente de que un evento físico de origen natural, o 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.

La amenaza debe describirse en términos de la magnitud o intensidad y la frecuencia de ocurrencia. Para las avenidas torrenciales, la magnitud se puede expresar de forma cualitativa (recomendable a escala regional) en términos de alta, media o baja o cuantitativa (recomendada a escala local) como una medida del tamaño del evento (área inundada, volumen del flujo, profundidad de inundación) e intensidad (velocidad), mientras que para la frecuencia puede ser asignado un periodo de retorno (Servicio Geológico Colombiano [SGC], 2017).

1.5.2 SUSCEPTIBILIDAD

La definición de susceptibilidad puede tomarse de dos formas de acuerdo con qué variable se esté analizando, por un lado cuando se realiza el análisis de vulnerabilidad generalmente este se refiere a la susceptibilidad por la exposición, en este sentido la susceptibilidad se refiere a la fragilidad del elemento expuesto. Por otra parte, cuando se realiza el análisis de amenaza nos referimos a susceptibilidad del territorio como las condiciones de este que pueden o no ser propicias para la generación de un evento amenazante. Para los efectos de este documento únicamente nos referiremos a susceptibilidad para el análisis de la amenaza y a fragilidad para el análisis de vulnerabilidad.

De acuerdo con lo anterior, la susceptibilidad se determina únicamente bajo el análisis de factores intrínsecos o condicionantes del terreno, además de factores climáticos de la zona de estudio que pueden aportar al aumento o disminución de la amenaza. Para el análisis de avenidas torrenciales la susceptibilidad corresponde a aspectos físicos de la cuenca como la geología, geomorfología, pendientes, y cobertura vegetal que van a ser condicionantes a la hora de determinar si una cuenca tiene tendencia a presentar eventos de avenida torrencial y cuál sería su intensidad, así mismo su probabilidad de ocurrencia se puede describir por medio de los factores detonantes como la lluvia y el periodo de retorno asociado a los umbrales que detonan los eventos.

1.5.3 VULNERABILIDAD

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012 la vulnerabilidad se refiere a la:

fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos.

La vulnerabilidad puede ser entendida como la combinación de la fragilidad del territorio o comunidad afectada con la exposición de los elementos amenazados.

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Fragilidad} * \text{Exposición}$$

1.5.4 RIESGO DE DESASTRES

De acuerdo con la Ley 1523 de 2012:

corresponde a los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad.

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad}$$

Figura 13. Mapa mental general para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales



Fuente: elaboración propia.

La definición de susceptibilidad puede tomarse de dos formas de acuerdo con qué variable se esté analizando, por un lado cuando se realiza el análisis de vulnerabilidad generalmente este se refiere a la susceptibilidad por la exposición, en este sentido la susceptibilidad se refiere a la fragilidad del elemento expuesto.



CAPÍTULO

ANÁLISIS GEOESPACIAL DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES



Jessica Paola Páez Pedraza

El análisis de avenidas torrenciales puede tener varios enfoques, entre ellos está el análisis geoespacial el cual es un análisis poco detallado que puede utilizarse para grandes áreas, por ejemplo, en el suelo rural o en cuencas muy extensas. Así mismo este análisis puede ser un paso preliminar antes de la modelación, ya que el análisis geoespacial permite priorizar cuencas para el desarrollo de modelación detallada, así mismo muchos insumos de este análisis son de utilidad para un análisis más complejo. En la figura 14 se presenta el paso a paso para desarrollar el análisis geoespacial.

Figura 14. Pasos a seguir para análisis geoespacial de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales

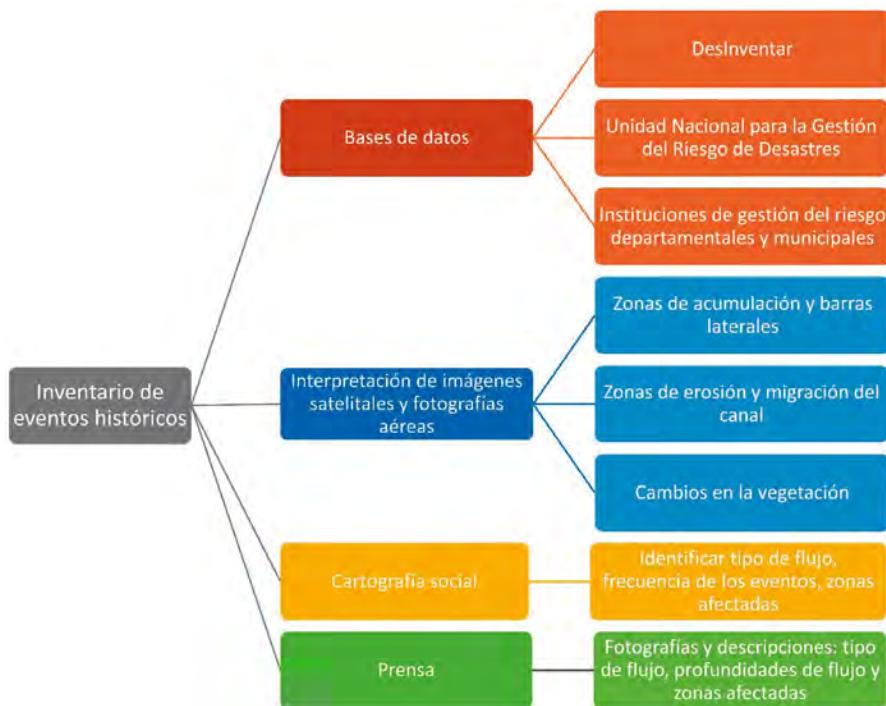
1	Inventario de Eventos Históricos <ul style="list-style-type: none"> • El inventario de eventos históricos debe realizarse a partir de bases de datos y no oficiales, • Se debe complementar y corroborar con otras fuentes de información
2	Caracterización fisiográfica de la cuenca <ul style="list-style-type: none"> • Caracterización de variables fisiográficas relevantes como geología, geomorfología, cobertura vegetal, entre otras. • Algunos parámetros morfométricos puede indicar mayor fragilidad intrínsica de la cuenca para generar eventos de avenida, así como procesos de remoción en masa.
3	Caracterización climática de la cuenca <ul style="list-style-type: none"> • Análisis de régimen de precipitación, así como eventos máximos y mínimos. • Análisis de otras variables climáticas.
4	Análisis de susceptibilidad <ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar una metodología para evaluar la susceptibilidad. En su mayoría en cuenta parámetros fisiográficos y morfométricos. • Algunas metodologías incluyen métodos de ponderación de los parámetros y otros tienen en cuenta un análisis de los eventos históricos en relación con estos
5	Análisis de factores detonantes y evaluación de la amenaza <p>Dependiendo de la metodología seleccionada para el análisis de susceptibilidad, se puede estimar la amenaza como una combinación de la susceptibilidad con uno o más de los siguientes aspectos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Inventario de eventos históricos • Umbrales de precipitación que detonan eventos de remoción en masa

Fuente: elaboración propia.

2.1 INVENTARIO DE EVENTOS HISTÓRICOS

El inventario de eventos históricos es un proceso fundamental para la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales, ya que permite tener una idea de la frecuencia de ocurrencia de los eventos, priorizar las cuencas que han tenido eventos históricos de gran magnitud y calibrar tanto los análisis básicos o regionales y los modelos hidráulicos de simulación detallada. En la figura 15 se presentan las principales fuentes de información para el análisis de eventos históricos.

Figura 15. Fuentes de información para inventario de eventos históricos



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 BASES DE DATOS

La fuente primaria de información de eventos históricos corresponde a las bases de datos de desastres o atención de emergencias. Se cuenta con la herramienta DesInventar la cual se constituye como “un desarrollo conceptual y metodológico sobre los desastres de todas las magnitudes y sobre diversidad de entornos: locales, nacionales

y regionales” (Grupo de investigación OSSO y LA RED, 2009, p. 4), este es un sistema de recolección de información de inventario de desastres, donde se registra información sobre las características y efectos de diferentes tipos de desastres (Grupo de investigación OSSO y LA RED, 2009). Las fuentes de información de los eventos registrados en DesInventar son de diversa índole, siendo las principales la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, las Corporaciones Autónomas Regionales, las instituciones para la gestión del riesgo de desastres departamentales y municipales y la prensa.

Es de aclarar que DesInventar cuenta con registros de eventos tipo “avenida torrencial”, sin embargo, la revisión no se debe quedar exclusivamente en las bases de datos de este tipo de eventos, ya que en revisiones realizadas por las autoras se observa que en algunos casos en la base de datos de atención de emergencias de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres se reporta un evento como creciente súbita y en DesInventar se reporta este mismo como “inundación” y en otros casos como “avenida torrencial”.

Adicionalmente, se observa que en algunos casos se han reportado eventos como “inundación”, sin embargo, por las características de la cuenca o información de otras fuentes es probable que se tratara de un evento de “avenida torrencial”, esto sucede debido a que cuando la concentración de sedimentos no es tan alta como para presentarse un flujo de detritos las personas que realizan los reportes o la comunidad en general pueden confundir el evento con una inundación rápida.

De acuerdo con lo anterior, cuando se realice la recolección de información de las bases de datos es importante revisar cuidadosamente también los eventos reportados como inundaciones o crecientes súbitas ya que pueden tratarse en realidad de avenidas torrenciales. En lo posible se debe corroborar la información con otras fuentes y complementarla con cartografía social y revisión de fotografías del evento.

2.1.2 INTERPRETACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES Y FOTOGRAFÍAS AÉREAS

La interpretación de imágenes satelitales o de fotografías aéreas se realiza con el fin de identificar indicadores de eventos de avenida torrencial, adicionalmente tiene los siguientes propósitos:

- Dar una idea inicial de qué cauces pueden producir eventos de avenida torrencial
- Identificar eventos de avenida torrencial que no han sido registrados en las bases de datos

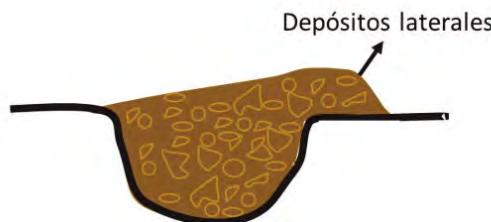
- Identificar zonas que tienden a generar procesos erosivos y de remoción en masa
- Identificar zonas de depósito
- Dar una idea de la magnitud de los eventos de avenida torrencial

¿Qué buscar en las fotografías aéreas e imágenes satelitales?

Los eventos de avenida torrencial dejan marcas que pueden ser fácilmente distinguibles mediante fotografías aéreas, estas marcas están relacionadas con cicatrices de procesos erosivos y zonas de acumulación de sedimentos, especialmente cuando se trata de cuencas con materiales gruesos. A continuación, se presentan las variables que son indicadores de avenidas torrenciales:

- Depósitos o zonas de acumulación.
- Zonas de erosión profunda: indicadores de deslizamientos o procesos *in-channel*.
- Barras laterales: debido a la elevación del flujo en las curvas se forman barras laterales de material depositado como se observa en la figura 16.
- Cambios y daños en la vegetación: el paso de sedimentos gruesos puede dañar la vegetación circundante.
- Ensanchamiento o migración del canal principal: indica procesos erosivos y de sedimentación dentro del propio canal.

Figura 16. Depósitos laterales formados en los flujos de lodos por elevación en las curvas



Fuente: adaptado de Jonhson y Rodine (1984).

Es necesario mencionar que es más fácil encontrar estos indicadores en cuencas donde se dan eventos tipo flujo hiperconcentrado o flujo de detritos, ya que mediante la

imagen satelital es posible observar los sedimentos gruesos, sin embargo, en el caso de los flujos de lodos puede ser difícil distinguir cuando se presenta un evento mediante fotografías aéreas, a excepción de las zonas de erosión o marcas de deslizamientos que pueden ser visualizadas más fácilmente.

¿Cómo hacer la fotointerpretación de imágenes satelitales y fotografías aéreas?

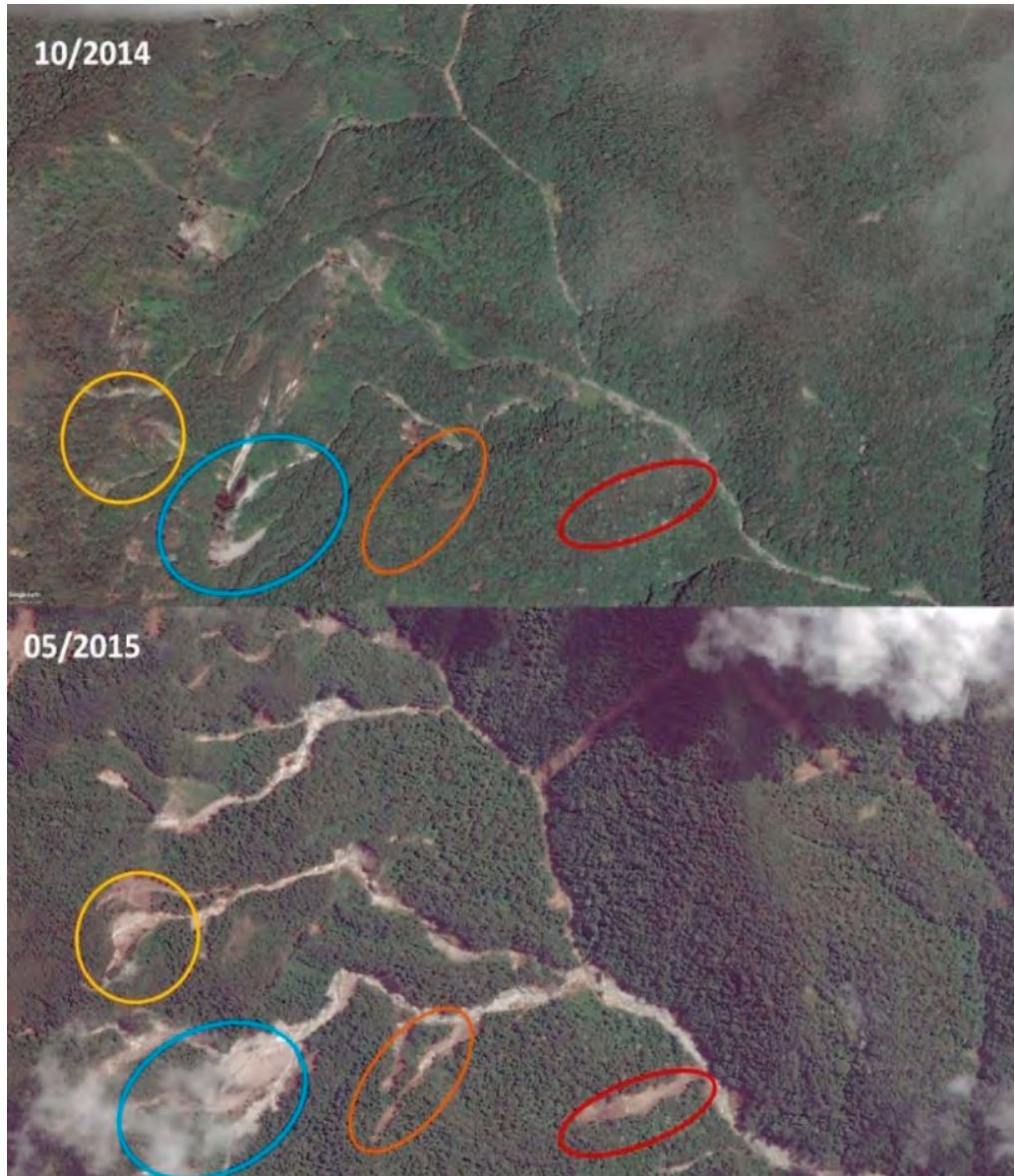
- **Observación simple de imágenes digitales:** puede realizarse una observación sencilla de imágenes satelitales o con herramientas como *Google Earth*. También pueden ser comparados con cartografía y curvas de nivel o realizar montajes de las fotografías sobre modelos tridimensionales del terreno para visualizar mejor el relieve.
- **Interpretación de fotografías aéreas mediante estereoscopio:** para este análisis se utilizan dos imágenes de una misma zona tomadas desde diferentes ángulos o posiciones, las fotografías se disponen por separado y se observan a la vez por medio de un estereoscopio, de esta forma se obtiene una visión tridimensional del relieve. Normalmente, este análisis se realiza con fotografías impresas de vuelos, sin embargo, ya hay posibilidad de adquirir imágenes de algunos sensores remotos que pueden ser analizadas estereoscópicamente.

A continuación, se presentan 3 ejemplos de observación simple con *Google Earth* en busca de indicadores de eventos de avenida torrencial.

- **Ejemplo 1: quebrada La Liboriana – Salgar, Antioquia**

El primer ejemplo corresponde la quebrada La Liboriana en el municipio de Salgar, Antioquia, el evento más reciente que se generó en ese cauce fue el 18 de mayo de 2015 y probablemente la cuenca tiende a generar eventos de tipo flujo hiperconcentrado.

Figura 17. Erosión activa y procesos de remoción en masa cuenca alta Quebrada Liboriana, Salgar, Antioquia



Fuente: Google Earth.

Figura 18. Depósitos y migración del canal quebrada La Liboriana, Salgar, Antioquia



Fuente: Google Earth.

Figura 19. Depósitos en forma de barras laterales en las curvas y ensanchamiento del canal en quebrada La Liboriana, Salgar, Antioquia



Fuente: Google Earth.

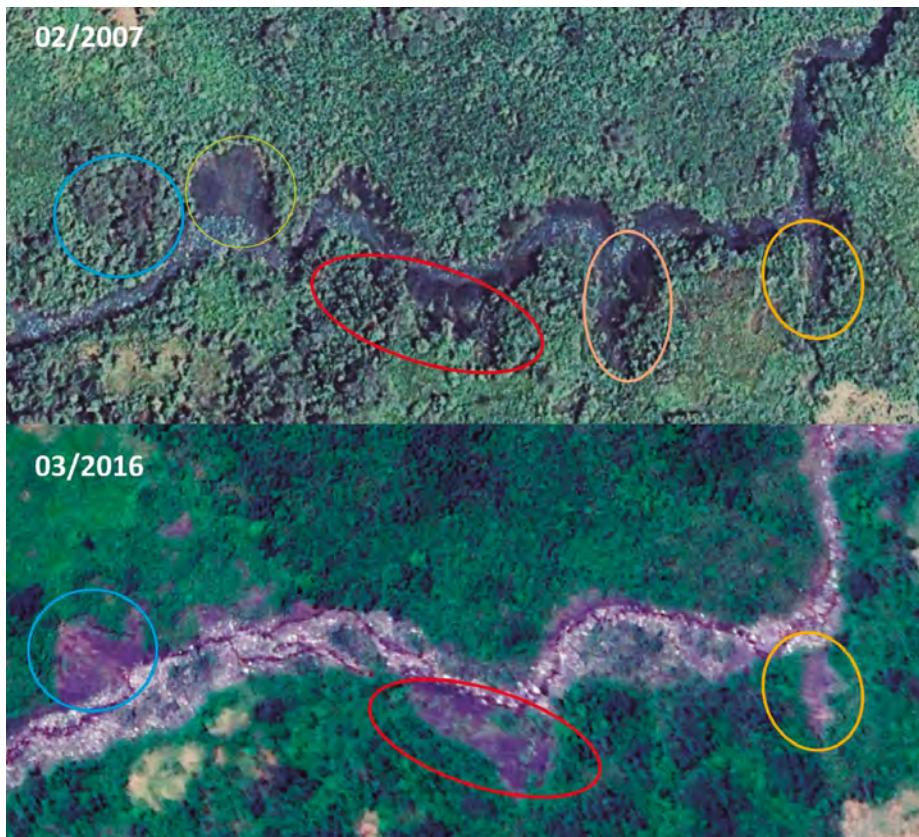
- **Ejemplo 2: quebrada La Negra - Útica, Cundinamarca**

El segundo ejemplo corresponde a la quebrada La Negra en el municipio de Útica, Cundinamarca, el evento más reciente que se generó en este cauce fue el 18 de abril de 2011. En esta cuenca se generan eventos de tipo flujo de lodos en los cuales la mayoría de los sedimentos son finos, tipo limos y arcillas, sin embargo, puede transportar rocas suspendidas.

En las imágenes se observa una clara diferencia en el material parental de la cuenca, el cual corresponde a rocas sedimentarias con texturas limoarcillosas en contraste con

los ejemplos 1 y 3 que corresponden a areniscas y gravas.

Figura 20. Erosión activa y procesos de remoción en masa cuenca alta quebrada La negra, Útica, Cundinamarca



Los eventos de avenida torrencial dejan marcas que pueden ser fácilmente distinguibles mediante fotografías aéreas, estas marcas están relacionadas con cicatrices de procesos erosivos y zonas de acumulación de sedimentos

Fuente: Google Earth.

Figura 21. Ensanchamiento del canal quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca



Fuente: Google Earth.

Figura 22. Depósitos laterales y migración del canal quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca



Fuente: Google Earth.

- **Ejemplo 3: quebrada Taruca, río Sangoyaco - Mocoa, Putumayo**

El tercer ejemplo corresponde la quebrada Taruca y el Río Sangoyaco en el municipio de Mocoa, Putumayo, el evento más reciente que se generó en esos cauces fue el 31 de marzo de 2017. En esta cuenca se generan eventos de tipo flujo de detritos, en los cuales se transportan rocas de gran tamaño y sedimentos gruesos en su mayoría.

Figura 23. Erosión activa y procesos de remoción en masa río Sangoyaco y quebrada Taruca, Mocoa – Putumayo



Fuente: Google Earth.

Figura 24. Ensanchamiento del canal río Sangoyaco, Mocoa – Putumayo



Fuente: Google Earth.

Figura 25. Depósitos río Sangoyaco y migración del canal río Mocoa, Mocoa – Putumayo



Fuente: Google Earth.

2.1.3 CARTOGRAFÍA SOCIAL

La cartografía social es un método de investigación participativa, en el cual se construye la realidad con base en las experiencias de las personas, teniendo en cuenta su contexto socio-cultural; es un proceso de planificación territorial participativo, en el cual los propios habitantes repensan el territorio desde el mapa que realizan. El método consiste en generar grupos de trabajo con las comunidades de tal forma que estos identifiquen en un mapa las zonas afectadas por avenidas torrenciales y otros eventos, así como las características y frecuencia de los eventos históricos. Es importante, cuando se realice este ejercicio, aclarar muy bien a la comunidad las diferencias entre avenida torrenciales e inundación, así como sus características, de tal forma que se identifiquen más fácilmente los eventos. En la figura 26 se presenta una infografía con

los pasos básicos para realizar un ejercicio de cartografía social.

Figura 26. Infografía pasos básicos para desarrollar cartografía social



Fuente: elaboración propia.

2.2 CARACTERIZACIÓN FISIOGRÁFICA DE LA CUENCA

2.2.1 COBERTURA DE TIERRA

Los cambios en la cobertura de la tierra pueden ser condicionantes para la generación de procesos de remoción en masa que aporten sedimentos o generen represamientos en cauces de alta montaña y que a su vez desencadenen avenidas torrenciales. La cobertura de la tierra actúa en la estabilidad de taludes desde dos puntos de vista: en primer lugar, por los efectos mecánicos, debido al enraizamiento y anclaje del suelo a estratos subyacentes más estables y el control de la erosión hídrica y eólica; y, en segundo lugar, por el efecto hidrológico, debido a la interceptación de lluvia, la capacidad de infiltración, retención de humedad en el suelo y evapotranspiración (SGC, 2017).

Los mapas de cobertura de tierra se desarrollan mediante la metodología Corine Land Cover, la cual corresponde a una metodología que identifica la superficie de la tierra a partir de la interpretación de imágenes de sensores remotos. Esta metodología fue adaptada para Colombia por el IDEAM (2010) y abarca cinco grandes categorías: terrenos artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales, áreas húmedas y superficies de agua, las cuales a su vez se subdividen en varias categorías de nivel 2 hasta nivel 5 (SGC, 2017).

En consonancia con lo anterior, en la tabla 8 se presentan las categorías de cobertura de tierra que son utilizadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) para el análisis de susceptibilidad por movimientos en masa y que pueden ser utilizadas también para el análisis por avenidas torrenciales. Sin embargo, de acuerdo con el nivel de detalle y escala que se esté trabajando puede utilizarse la adaptación de la metodología Corine

Land Cover del IDEAM (2010) para analizar la cobertura de tierra de la cuenca de estudio.

Tabla 8. Leyenda Corine Land Cover para análisis de susceptibilidad por movimientos, masa y avenidas torrenciales

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Territorios artificializados	1.1 Zonas urbanizadas	
	1.2 Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	
	1.3 Zonas de extracción minera y escombreras	
Territorios agrícolas	2.1 Cultivos transitorios	
	2.2 Cultivos permanentes	
	Pastos	
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas	
Bosques y áreas seminaturales	3.1 Bosques	3.1.1 Natural
		3.1.2 Seminatural
		3.1.3 Plantación forestal
	3.2 Áreas con vegetación herbácea o arbustiva	3.2.1 Herbazal
		3.2.2 Arbustal
		3.2.3 Vegetación secundaria o en transición
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	3.3.2 Afloramientos rocosos
		3.3.3 Tierras desnudas y degradadas
		3.3.4 Zonas quemadas

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Áreas húmedas	4.1 Áreas húmedas continentales	
	5.1 Aguas continentales naturales	
5. Superficies de agua	5.2 Aguas continentales artificiales	
	5.3 Aguas marítimas	

Fuente: SGC (2017).

2.2.2 GEOLOGÍA

La geología también es un factor condicionante para la generación de movimientos en masa que a su vez desencadenan flujos de avenida torrencial, así mismo dependiendo de la litología de la cuenca y del lecho del cauce se van a generar flujos de tipo lodos, hiperconcentrados o detritos; por lo cual la caracterización de la geología es un elemento fundamental para el análisis de amenaza por avenidas torrenciales.

Los mapas geológicos utilizados para el análisis de amenaza por avenidas torrenciales deben incluir aspectos ingenieriles, los cuales muestran información sobre la distribución y las propiedades físicas y mecánicas del suelo, las rocas y el agua subterránea, entre ellos diferencian materiales entre suelos y rocas, definen espesores del suelo y características estructurales de la roca y caracterizan las propiedades mecánicas de los suelos (SGC, 2016).

Para la elaboración del mapa de geología inicialmente se deben clasificar los materiales de acuerdo con su origen en unidades geológicas superficiales (UGS); las UGS se refieren al material expuesto en la superficie del terreno y que conservan un mismo origen, características físicas y geomecánicas hasta algunas decenas de metros debajo de la superficie.

Las rocas se clasifican de acuerdo con su composición mineralógica, grado de meteorización, dureza, e índice de resistencia; mientras que los suelos se clasifican por su origen, composición mineralógica, clasificación genética, estructura, gradación, color, forma, composición de las partículas, grado de meteorización, consistencia, retención de humedad, densidad relativa, compacidad, entre otros (SGC, 2017). En la tabla 9 se presentan las unidades geológicas superficiales de acuerdo con la modificación realizada por el SGC (2017) para las unidades propuestas por Hermelin (1985).

Una vez se realiza la clasificación inicial por el origen de las UGS se debe complementar el mapa incluyendo las características litológicas y estratigráficas, así como las características geomecánicas básicas. Los criterios que deben incluirse en los mapas geológicos a utilizar son los siguientes:

- **Génesis:** clasificación de acuerdo con el origen (tabla 9).
- **Litología:** composición mineralógica (textura).
- **Propiedades ingenieriles:** dureza, resistencia, consistencia, condición de humedad, densidad relativa y compacidad.
- **Propiedades geomecánicas:** índices de calidad del macizo roco, índice geológico de resistencia.
- **Grado de meteorización:** descripción cualitativa de la meteorización y discontinuidades (suelo residual, descompuesto, roca meteorizada, saprolito fino, etc.).
- **Rasgos estructurales:** fallas, diaclasas, pliegues y fracturas.

Los mapas geológicos utilizados para el análisis de amenaza por avenidas torrenciales deben incluir aspectos ingenieriles, los cuales muestran información sobre la distribución y las propiedades físicas y mecánicas del suelo, las rocas y el agua subterránea.

Tabla 9. *Unidades geológicas superficiales (UGS)*

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
Roca	Roca inalterada	Roca dura Roca intermedia Roca blanda
	Derivadas de roca <i>in situ</i>	Suelo residual: saprolito grueso y sa- prolito fino
	Depósitos volcánicos primarios	Flujos piroclásticos, oleada piroclástica y caídas piroclásticas
	Depósitos volcánicos secundarios	Lahar y avalancha de escombros
Suelo	Suelo transportado	Aluviones recientes y de cauce activo
	Depósitos aluviales	Llanura aluvial Abanicos o conos alu- viales
		Terrazas aluviales Depósitos fluviotorren- ciales
	Depósitos lacustres y paludales	Suelos fluviolacustres Suelos paludales

Tipo de material	Origen de la UGS	Tipo de UGS
Suelo	Suelo transportado	Depósitos costeros Depósitos eólicos
		Deltas, barras y playas Dunas y médanos Loess
		Morrenas y tillitas Suelos fluvioglaciares
		Coluvial
		Depósitos de gravedad y ladera Flujos de lodo, tierra y escombros
		Talus, derrubios de pendiente Rellenos de basuras Rellenos de escombros
		Rellenos mixtos

Fuente:
SGC (2017).

2.2.3 GEOMORFOLOGÍA

El análisis geomorfológico es una de las herramientas fundamentales para la evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales, ya que estos eventos tienden a producirse en cuencas escarpadas con ciertas características como pendientes altas o formas achataadas, entre otras. Se deben analizar distintos aspectos como lo son la morfogénesis, la morfodinámica, tanto de la cuenca en lo que respecta a movimientos en masa, como del cauce en cuanto a procesos de dinámica fluvial y finalmente la morfometría, la cual mediante índices cuantitativos permite describir las formas del terreno.

2.2.3.1 Morfogénesis

La morfogénesis corresponde al origen de las geoformas y a su vez indica procesos de tipo endogenéticos y exogenéticos que dieron origen a esas. De acuerdo con lo anterior, se debe generar un mapa de geoformas que incluya la morfogénesis y la subunidad geomorfológica o geoformas para toda la cuenca de estudio. De acuerdo con la *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa a escala 1:25.000* (SGC, 2017) en la tabla 10 se presentan las geoformas que son indicativas de movimientos en masa y generación de avenidas torrenciales.

Tabla 10. Subunidades indicativas de procesos de remoción en masa y procesos tipo avenida torrencia

Morfogénesis	Subunidad geomorfológica	Indicativo
Morfoestructural	Cerro estructural	Movimientos en masa tipo caída
	Colina estructural	
	Escarpe de línea de falla	
	Escarpe de meseta estructural	
	Faceta triangular	
	Ladera contrapendiente	
	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	
	Ladera contrapendiente de sierra anticlinal	
	Ladera contrapendiente de sierra sinclinal	

Morfogénesis	Subunidad geomorfológica	Indicativo
Morfoestructural	Ladera de contrapendiente de cuesta	
	Ladera de contrapendiente de espinazo	
	Meseta estructural	
	Ladera estructural de sierra homoclinal	
	Ladera estructural de sierra anti-clinal	Movimientos en masa tipo caída
	Ladera estructural de sierra sin-clinal	
	Ladera estructural de cuesta	
	Ladera estructural de espinazo	
	Plancha	
	Sierra de barras estructurales	
Volcánico	Escarpe de flujo de lava	Movimientos en masa tipo caída
	Ladera volcánica	
	Cono lahárico	
	Escarpe de flujo lahárico aterrazado	Zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales
	Escarpe de flujo piroclástico aterrazado	
	Flujo lahárico aterrazado	

Morfogénesis	Subunidad geomorfológica	Indicativo
Volcánico	Flujo piroclástico aterrazado	
	Lóbulo de flujo lahárico	Zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales
	Lóbulo de flujo piroclástico	
	Cono flujos de detritos	
	Cono de talus	
	Cerro remanente o relicito	Movimientos en masa tipo caída
	Escarpe de erosión mayor	
	Escarpe de erosión menor	
	Escarpe facetado	
	Cono o lóbulo de flujo indiferenciado	
Denudacional	Lóbulo y cono de avalancha de detritos	Procesos tipo flujo o avenida torrenciales
	Lóbulo y cono de avalancha de rocas	
	Escarpe de abanico fluvial	Movimientos en masa tipo caída
	Escarpe de terraza de erosión	
	Albardones o dique natural	
Fluvial	Complejo de orillales	Zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales
	Planicie aluvial confinada	
	Plano o llanura de inundación	

Morfogénesis	Subunidad geomorfológica	Indicativo
Fluvial	Terraza de acumulación	
	Escarpe de terraza de acumulación	
	Terraza de acumulación subcreciente	Zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales
	Terraza de acumulación antigua	
	Plano anegadizo	
	Abanico aluvial	
	Abanico aluvial antiguo	
	Abanico aluvial subcreciente	
	Abanico aluvial actual	Procesos tipo flujo o avenida torrencia
	Abanico aluvial incisado	
Marino costero	Abanicos aluviales coalescentes no diferenciados	
	Cono de deyección	
Glacial	Acantilado	Movimientos en masa tipo caída
	Ladera contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	
	Ladera contrapendiente de sierra anticlinal glaciada	Movimientos en masa tipo caída
	Ladera contrapendiente de sierra sinclinal glaciada	

Morfogénesis	Subunidad geomorfológica	Indicativo
Glacial	Ladera contrapendiente de cuesta estructural glaciada	
	Ladera contrapendiente de espinazo glaciado	
	Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	Movimientos en masa tipo caída
	Ladera estructural de sierra anticlinal glaciada	
	Ladera de cuesta estructural glaciada	
	Ladera estructural de espinazo glaciado	
	Cono y lóbulo de gelifracción	
	Conos glaciofluviales	Zonas de aporte de sedimentos en avenidas torrenciales
Kárstico	Flujo volcánico glaciado	
	Escarpe cárstico	Movimientos en masa tipo caída
Antropogénico	Canteras	Movimientos en masa tipo caída
	Explotación minera	

Fuente: SGC (2017).

2.2.3.2 Morfodinámica de la cuenca

La morfodinámica estudia los procesos que afectan a las geoformas y corresponde a dinámicas exógenas relacionadas con el viento, el agua, la nieve y la gravedad. La morfodinámica permite identificar la evolución de procesos denudacionales como lo son procesos erosivos y de remoción en masa; así mismo permite clasificar estos movimientos. La clasificación general de los movimientos de remoción en masa se presenta a continuación:

- Caídas.
- Volcamientos.
- Deslizamientos rotacionales.
- Deslizamientos translacionales.
- Reptación.
- Propagación lateral.

Por otra parte, la erosión es un proceso de pérdida continua y selectiva de materiales ocasionada por agentes naturales como el agua, el deshielo de glaciares y el o antrópico. Los procesos erosivos se pueden clasificar de acuerdo con lo siguiente:

- Erosión laminar.
- Erosión en surcos.
- Barrancos.
- Cárcavas.
- Socavación.
- Tierras malas.
- Terracetas.
- Erosión eólica.
- Erosión glacial.
- Erosión kárstica.
- Erosión marina.

2.2.3.3 Morfodinámica y morfo evolución fluvial

Por otra parte, se puede describir la morfodinámica y morfoevolución de los cauces, la cual genera formas y patrones, algunas de ellas son indicativas de procesos de socavación, inundación y avenidas. En la tabla 11 se presentan las formas fluviales asociadas con inundaciones y avenidas torrenciales de acuerdo con Díez-Herrero et al. (2008).

Tabla 11. Clasificación de formas fluviales asociadas a inundaciones y avenidas torrenciales

Plano	Mesoforma	Microforma o acción
Patrón	Canales rectos	Canales por rectificación
	Canales meandriformes	Canales entrelazados
		Arcos de meandro movidos por
		Extensión
		Rotación
		Traslación
	Canales de avulsión	Arcos de meandro abandonados por
		Acortamiento
	Canales entrelazados	Estrangulamiento
		Canales de alto entrelazamiento
Perfil	Canales anastomosados	Canales de alto anastomosamiento
		Lechos planos
		Rápidos
	Irregular	Escalones
		Pozos y vados
		Pozos a pie de cascada
		Pozos escalonados

Plano	Mesoforma	Microforma o acción	
Sección transversal Formas erosivas	Macroformas ($>D_c$)	Canales internos o interiores	
		Cañones	
		Ensanchamiento de escarpes en bancos de orilla	
	Mesoformas $>(m)$	Pulidos y face-tados	Superficies pulidas
			Bloques facetados
		Sobre excavaciones	Semilunares
			Marmitas de gigante
	Microformas ($<m$)	Superficies armadas	
		Acanaladuras	
		Microfacetadas	
		Formas transversas	
		Marcas de flauta	
		Cavidades de arranque	
		Microestrías	
		Micromarmitas	
		Escarpes erosivos	

Plano	Mesoforma	Microforma o acción	
Formas deposicionales	Mesoformas (>dm) y macroformas (<Dm)	Rizaduras	
		Depósito lineal	Líneas de limo adheridas
			Bandas de flotantes
		Grietas de desecación	
		Barras y bancos	Laterales
			Longitudinales
			De meandro
			Longitudinales
			Transversales
			Semilunares
		Diques naturales	Lineales
			Digitados
			Cresta recta
		Dunas y mega rizaduras	Cresta ondulada
			Mantos y láminas
			Lóbulos, derribados y cordones
		Abanicos y conos	En abanico
			Elongados
			Confluencia de tributarios
			Desembocadura

Fuente: Díez-Herrero et al. (2008).

2.2.3.4 Morfometría

La morfometría es la parte de la geomorfología que analiza cuantitativamente la superficie, en términos de rasgos discretos y continuos de las formas del terreno (SGC, 2017). El relieve por su disposición y orientación puede generar situaciones meteorológicas que favorezcan precipitaciones intensas o abundantes, como es el caso de las cuencas bordeadas por zonas montañosas que generan efectos orográficos, estas cuencas tienden a generar más fácilmente eventos de avenidas torrenciales. Por otra parte, la disposición de la cuenca, como lo es su elongación y dirección, puede potenciar esa precipitación (Díez-Herrero et al., 2008).

Adicionalmente, la geomorfología de la cuenca en cuanto a su pendiente, elongación, compacidad, entre otros, influye en la transformación de lluvia en escorrentía, en el tiempo de concentración y por tanto en los hidrogramas de caudales, de tal forma que para unas mismas condiciones de lluvia una cuenca puede comportarse diferente a otra y producir o no eventos de avenida torrencial (Díez-Herrero et al., 2008). A continuación, se presentan los parámetros morfométricos más relevantes a la hora de analizar la susceptibilidad de una cuenca a las avenidas torrenciales.

2.2.4 ÁREA DE DRENAJE

El área de drenaje corresponde a la proyección horizontal del área que recolecta la escorrentía que llega a un cauce. El área de drenaje se delimita de acuerdo con los siguientes criterios (Ruiz y Torres, 2008).

- La divisoria de aguas debe cortar perpendicularmente las curvas de nivel.
- La divisoria de aguas debe pasar por los puntos de mayor nivel topográfico.
- La divisoria de aguas corta las curvas de nivel por la parte convexa de estas.
- La divisoria de aguas nunca puede cortar un drenaje, excepto en el punto de salida de la cuenca.

2.2.5 ELEVACIÓN MÁXIMA, MEDIA Y MÍNIMA

La elevación máxima corresponde a la cota más alta de la cuenca, la cual suele encontrarse cerca a la divisoria de aguas, la elevación media corresponde a la cota promedio de toda la cuenca en m.s.n.m., mientras que la elevación mínima corresponde a cota más baja de la cuenca, la cual suele encontrarse cerca a la desembocadura o confluencia con otro cauce o salida de la cuenca.

2.2.6 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

La pendiente media de la cuenca corresponde a la variación en la inclinación del terreno respecto a la horizontal, esta determina el comportamiento del movimiento del agua y su capacidad de erosión. Adicionalmente, la pendiente media del terreno incluye directamente en el tiempo de concentración y en el tiempo de formación de crecientes y avenidas. Las cuencas pueden clasificarse de acuerdo con la pendiente desde relieve plano a muy escarpado de acuerdo con lo presentado en la tabla 12.

Tabla 12. Relieve de acuerdo con la pendiente media

Pendiente media (%)	Relieve
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Medianamente accidentado
12 -20	Accidentado
20 – 35	Fuertemente accidentado
35 – 50	Muy fuertemente accidentado
50 – 75	Escarpado
>75	Muy escarpado

Fuente: Pérez (1979).

2.2.7 PENDIENTE MEDIA DEL CAUCE

La pendiente media del cauce principal se puede calcular con diferentes ecuaciones, aquí se presenta una de las más utilizadas, correspondiente al método de Taylor, en el cual se calcula la pendiente media ponderada de acuerdo con la pendiente y la longitud de varios tramos.

$$S_o = \left(\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right)^2$$

S_o = Pendiente media (**m/n**)

L = Longitud total del cauce (**m**)

L_i = Longitud del tramo (**m**)

S_i = Pendiente del tramo (**m**)

2.2.8 LONGITUD DE LA CORRIENTE Y LONGITUD MÁXIMA DE RECORRIDO

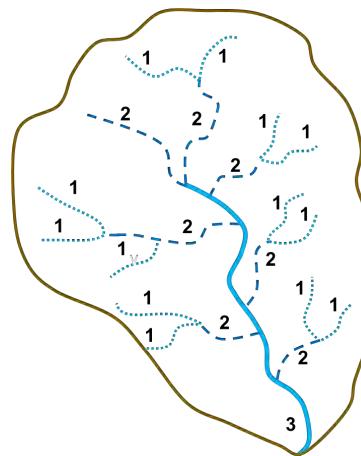
La longitud de la corriente corresponde a la longitud del cauce principal, mientras que la longitud máxima de recorrido corresponde a la máxima longitud que recorre una gota de agua hasta llegar a la desembocadura o salida de la cuenca, es decir la longitud más larga posible de recorrido, esta es utilizada para el cálculo del tiempo de concentración.

2.2.9 ORDEN DE CORRIENTE

El orden de corriente indica el grado de estructura de una red de drenaje, entre mayor sea el orden de la corriente más estructurada y definida será. Este parámetro también podría indicar la presencia de controles estructurales y mayor posibilidad de erosión o una cuenca más erosionada que también indicaría mayor antigüedad.

Uno de los métodos más utilizados es el de Horton – Strahler el cual indica que la corriente más pequeña que no tiene afluentes es de orden n y a medida que una corriente de orden n confluye con otra de orden n o de orden $n+1$ la corriente resultante será de orden $n+1$, como se observa en la figura 27.

Figura 27. Orden de corrientes método de Horton – Strahler



Fuente: elaboración propia.

2.2.10 DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje corresponde a la longitud total de los cauces de una cuenca y su área de drenaje.

$$D = \frac{L_T}{A_\Omega}$$

L_T = Longitud de corrientes

A_Ω = Área de la cuenca de orden Ω (Km^2)

2.2.11 ÍNDICE DE COMPACIDAD

El índice de compacidad o índice de Gravelius es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de igual área al de la cuenca. Este parámetro describe la geometría del área de drenaje y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración. Este parámetro toma valor de 1 para cuencas exactamente circulares y entre menor sea el volumen mayor será la tendencia a concentrar grandes cantidades de agua o en menores tiempos. Para este parámetro se definen tres categorías presentadas en la tabla 13.

$$K_c = \frac{\text{Perímetro}}{2\pi * \left(\frac{\text{Área}}{\pi}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Tabla 13. Descripción por rangos índice de compacidad K_c

Rango K_c	Descripción
1 – 1,25	Forma casi redonda a oval – redonda
1,25 – 1,5	Forma oval – oblonga
>1,5	Forma oval – oblonga a rectangular – oblonga

Fuente: elaboración propia.

2.2.12 FACTOR DE FORMA DE HORTON

Este factor indica que tan alargada es una cuenca y relaciona el área de drenaje con el cuadrado de la longitud máxima de recorrido. Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecientes y rápidas muy intensas o lentas y sostenidas.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

A = Área de la cuenca (**Km²**)

L = Longitud máxima de recorrido (**Km**)

Tabla 14. Descripción por rangos Factor de forma K_f

Rango K_f	Forma	Susceptibilidad a avenidas torrenciales
<1	Cuenca alargada	Baja

Rango K_f	Forma	Susceptibilidad a avenidas torrenciales
=1	Cuenca cuadrada	Media
>1	Cuenca achataada	Alta

Fuente: elaboración propia.

2.2.13 RELACIÓN DE ELONGACIÓN

La relación de elongación es la relación entre el diámetro de un círculo que tenga la misma superficie o área de drenaje de la cuenca y la longitud máxima de recorrido. Esta relación indica si la cuenca es completamente plana o si tiene zonas de relieve pronunciado.

$$Re = \frac{1.128\sqrt{A}}{L}$$

A = Área de la cuenca (Km^2)

L = Longitud máxima de recorrido (Km)

Tabla 15. Descripción rangos relación de elongación

Rango R_e	Descripción
0,8 - 1	Completamente plana
$\leq 0,8$	Partes de relieve pronunciado

Fuente: elaboración propia.

2.2.14 ÍNDICE DE MELTON

El índice de Melton corresponde a la relación entre máxima diferencia de alturas en la cuenca y el área de la cuenca, también se le denomina *ruggedness number* y es una forma de representar la pendiente media de la cuenca. Una cuenca tiende a ser torrencial si el índice de Melton es mayor a 0,5 (Melton, 1965).

$$\text{Índice de Melton} = \frac{H_{\max} - H_{\min}}{\sqrt{A}}$$

2.2.15 COEFICIENTE DE TORRENCIALIDAD

Este coeficiente corresponde a la relación entre el número de cauces de orden uno y el área de la cuenca, a mayor número de cauces y menor área mayor es la torrencialidad de la cuenca, debido a que el agua recorre cortas distancias hasta dirigirse a las corrientes principales y la velocidad de descarga es mayor (Romero y López, 1978).

$$C_t = \frac{N_t}{A}$$

A = Área de la cuenca (Km^2)

N_t = Número de corrientes de orden uno

2.2.16 RADIO DE LEMNISCATA

El radio de lemniscata es una proporción que indica que tan cerca se encuentra la forma de la cuenca a la de una lemniscata, la cual según Chorley (1957) es la forma ideal de una cuenca, la representación gráfica de esta curva genera una figura parecida al símbolo del infinito. Este radio es otra forma de representar la pendiente media de la cuenca.

$$\text{Radio de lemniscata} = \frac{L_b^2 * \pi}{4 A}$$

Donde:

L_b = Longitud de la cuenca

A = Área de la cuenca (Km^2)

2.2.17 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

El tiempo de concentración corresponde al tiempo en el cual toda la cuenca está aportando escorrentía de forma simultánea, es decir el tiempo que toma la gota más lejana en llegar a la salida de la cuenca. Este depende generalmente de la longitud máxima de recorrido y la pendiente, se espera que para este tiempo se presenten los caudales máximos. A continuación, se presentan algunas de las ecuaciones utilizadas

para el cálculo del tiempo de concentración.

Ecuación de Témez:

$$T_c = 0.3 \left(\frac{L}{S_o^{0.25}} \right)^{0.75}$$

Ecuación de Kirpich:

$$T_c = 0.066 \left(\frac{L}{S_o^{0.5}} \right)^{0.77}$$

Ecuación de Giandiotti:

$$T_c = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25.3\sqrt{L S_o}}$$

Ecuación de Ven T Chow:

$$T_c = 0.8773 \left(\frac{L_c^{1.5}}{\sqrt{C_m - C_b}} \right)^{0.64}$$

Donde:

T_c = Tiempo de concentración (hrs)

L = Máxima Longitud de recorrido (Km)

S_o = Pendiente media (m/m)

A = Área de la cuenca (Km²)

L_c = Longitud del cauce principal (m)

C_m = Máxima cota del cauce principal (msnm)

C_m = Mínima cota del cauce principal (msnm)

2.2.18 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD A EVENTOS TORRENCIALES (IVET)

El índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) es un índice generado por el IDEAM, el cual relaciona el índice morfométrico de torrecialidad y el índice de variabilidad de caudales y en realidad corresponde a un índice de susceptibilidad de la cuenca (ver definiciones en el numeral 1.5.2 del presente documento).

El índice morfométrico de torrecialidad se construye como una relación entre el índice de compacidad, la pendiente media de la cuenca y la densidad de drenaje, los cuales indican la forma como se concentra la escorrentía, así como la rapidez con la cual el agua y los sedimentos salen de la cuenca luego de un evento de lluvia (Rivas et al., 2009).

Para determinar este índice se asigna un valor de 1 a 5 a cada parámetro evaluado (densidad de drenaje, pendiente media de la cuenca y coeficiente de compacidad) y posteriormente se cruzan los valores para cada parámetro y se determina la categoría del índice morfométrico de torrecialidad, el cual es cualitativo de muy bajo a muy alto. En la tabla 16 se presentan las categorías para cada parámetro evaluado y en la tabla 17 las categorías de asignación del índice morfométrico de torrecialidad.

El índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) es un índice generado por el IDEAM, el cual relaciona el índice morfométrico de torrecialidad y el índice de variabilidad de caudales.

Tabla 16. Relaciones para categorizar el índice morfométrico

índice morfométrico	Escala	Área de la cuenca (km ²)	Categorías				
			1	2	3	4	5
Densidad de drenaje (km/km ²)	1:10000	<15	<1,5	1,51 – 2,0	2,01 – 2,50	2,51 – 3,00	>3,0
	1:25000	16 – 50	<1,2	1,21 – 1,80	1,81 – 2,00	2,01 – 2,50	>2,5
	1:100000	>50	<1,0	1,01 – 1,50	1,51 – 2,00	2,01 – 2,50	>2,5
Nombre categoría			Baja	Moderada	Moderada alta	Alta	Muy alta
Pendiente media de la cuenca (%)	1:10000	<15	<20	21 – 35	36 – 50	51 – 75	> 75
	1:100000	>50	<15	16 – 30	30 – 45	46 – 65	>65
	Nombre categoría		Accidentado	Fuerte	Muy fuerte	Escarpeado	Muy escarpado
Coeficiente de compacidad			<1 625	1,376 – 1,500	1,251 – 1,375	1,126 – 1,250	1,00 – 1,125
Nombre categoría		Oval – oblonga a rectangular – oblonga	Oval – redonda a oval – oblonga		Casi redonda a oval – redonda		

Fuente: Rivas et al. (2009).

Tabla 17. Categorías índice morfométrico de torrencialidad

		Pendiente media de la cuenca					Coeficiente de forma
		1	2	3	4	5	
Densidad de drenaje	1	111	121	131	141	151	1
	1	112	122	132	142	152	2
	1	113	123	133	143	153	3
	1	114	124	134	144	154	4
	1	115	125	135	145	155	5
Densidad de drenaje	2	211	221	231	241	251	1
	2	212	222	232	242	252	2
	2	213	223	233	243	253	3
	2	214	224	234	244	254	4
	2	215	225	235	245	255	5
Densidad de drenaje	3	311	321	331	341	351	1
	3	312	322	332	342	352	2
	3	313	323	333	343	353	3
	3	314	324	334	344	354	4
	3	315	325	335	345	355	5
Densidad de drenaje	4	411	421	431	441	451	1
	4	412	422	432	442	452	2

		Pendiente media de la cuenca					Coeficiente de forma	
		1	2	3	4	5		
Densidad de drenaje	5	413	423	433	443	453	3	
		414	424	434	444	454	4	
		415	425	435	445	455	5	
		511	521	531	541	551	1	
		512	522	532	542	552	2	
		513	523	533	543	553	3	
		514	524	534	544	554	4	
		515	525	535	545	555	5	
Muy baja		Baja			Moderada		Alta	
							Muy alta	

Fuente: Rivas et al. (2009).

Por otra parte, el índice de variabilidad representa el comportamiento de los caudales, determinando que una cuenca torrencial es aquella que presenta una mayor variabilidad o diferencia entre los caudales mínimos y máximos (IDEAM, 2013). Este índice se obtiene de la curva de duración de caudales y se puede expresar de la siguiente forma:

$$\text{Índice de variabilidad} = \frac{\log(Q_i) - \log(Q_f)}{\log(X_i) - \log(X_f)}$$

Q_i y Q_f corresponden a los caudales máximos y mínimos y X_i y X_f a los porcentajes de excedencia respectivos tomados de la curva de duración de caudales. Las categorías del índice de variabilidad se presentan en la tabla 18, mientras que las categorías del índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET) se presentan en tabla 19.

Tabla 18. Categorías del índice de variabilidad

Índice de variabilidad	Categoría
<10	Muy baja
10,1 – 37	Baja
37,1 – 47	Media
47,1 – 55	Alta
>55	Muy alta

Fuente: IDEAM (2013).

Tabla 19. Clasificación del índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)

Índice de variabilidad	Índice morfométrico de torrecialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Muy baja	Muy baja	Muy 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).

El IVET puedes ser utilizado como un paso inicial para determinar la susceptibilidad de una cuenca extensa y seleccionar las zonas con valores altos o muy altos para realizar un análisis un poco más detallado; o puede ser utilizado como una variable dentro del análisis multivariado de variables fisiográficas.

2.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA CUENCA

Los análisis estadísticos de la información hidroclimatológica permiten por un lado tener una línea base del comportamiento hidrológico de la cuenca de estudio y por otro lado desarrollar modelos matemáticos que asisten en la planeación y el manejo del recurso hídrico, así como modelos que permitan determinar factores detonantes de avenidas torrenciales.

Dentro de la caracterización climática se debe incluir una descripción de la variabilidad espacial y temporal de las variables climáticas, así como el análisis de diagramas de cajas y bigotes (*box-whisker*), los cuales permiten identificar valores anómalos, así como los percentiles entre los cuales se mueven las variables climáticas.

La fuente principal de información climática corresponde a estaciones en tierra del IDEAM y de las corporaciones ambientales, las cuales contienen series de registros continuos a nivel mensual, diario y horario. Sin embargo, en algunos casos en la zona de estudio no se cuenta con suficiente información de estaciones hidrometeorológicas, por lo cual se puede acudir a información de sensores remotos; hay que aclarar que esta información debe manejarse con mucho cuidado ya que el nivel de resolución y precisión nunca va a ser igual al de las estaciones en tierra.

Las variables climáticas fundamentales que deben ser analizadas como parte de la evaluación del riesgo por avenidas torrenciales corresponden a:

- Precipitación: distribución temporal, espacial, homogeneidad y precipitación máxima en 24 horas.
- Temperatura: distribución temporal y espacial.
- Velocidad del viento: distribución temporal y rosa de vientos.
- Humedad relativa: distribución temporal y espacial.
- Evapotranspiración potencial: distribución temporal y espacial.
- Evapotranspiración real: distribución temporal y espacial.
- Radiación solar: distribución espacial y temporal.

Algunos de los sensores remotos que contienen información climatológica son los siguientes:

- **Giovanni:** temperatura, evaporación, evapotranspiración, radiación, precipitación y velocidad del viento diaria <https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>
- **National Centers for Environmental Prediction (NCEP):** temperatura, precipitación, velocidad del viento, humedad relativa y radiación solar diaria <https://globalweather.tamu.edu/>
- **MODIS:** evapotranspiración potencial cada 8 días y radiación https://lpdaac.usgs.gov/product_search/, <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- **ERA5 – Copernicus:** temperatura, velocidad del viento, radiación, evaporación y precipitación mensual, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=form>

2.3.1 PRECIPITACIÓN

La precipitación es la variable climática más importante, ya que es uno de los principales detonantes de deslizamientos y avenidas torrenciales. Es importante realizar los siguientes análisis de precipitación:

- Análisis de distribución temporal: con este análisis se determina el régimen hidrológico bien sea bimodal o unimodal, así como los meses secos y húmedos. Este comportamiento en el régimen de precipitación está relacionado con el desplazamiento de la zona de confluencia intertropical (ZCIT), esta es una zona de la atmósfera donde convergen los vientos alisios del norte y del sur del planeta, se caracteriza por tener bajas presiones y masas de aire ascendentes. Esta franja pasa dos veces al año por Colombia, la primera vez en abril y mayo y la segunda vez en septiembre y octubre, ocasionando los dos períodos lluviosos en los regímenes bimodales.
- Análisis de distribución espacial: este análisis se realiza por medio de isoyetas, las cuales ilustran líneas de igual precipitación, esto permite de forma preliminar determinar zonas homogéneas.
- Análisis de homogeneidad entre estaciones: este análisis se realiza para determinar zonas hidrológicamente homogéneas, las cuales presentan un comportamiento similar.
- Inicialmente se realiza un análisis de curva de masa simple en la cual se grafica la precipitación total acumulada de una estación vs el tiempo, con este análisis se puede identificar la consistencia de los datos a lo largo del período de registro y así establecer si la estación fue movida o si existieron cambios significativos en el régimen hidrológico.

- Posteriormente, se puede realizar un análisis preliminar de homogeneidad entre estaciones teniendo en cuenta lo siguiente:

$$Si \rightarrow 90\% * P_{Estación\ A} < P_{Estación\ B} < 110\% * P_{Estación\ A}$$

→ Estación A y Estación B son hidrológicamente homogéneas

Finalmente, se debe realizar un análisis de doble masa para confirmar qué estaciones son efectivamente homogéneas con otras, para ello se grafica la precipitación acumulada de la estación A vs la precipitación acumulada de la estación B, en caso de tener más de dos estaciones se grafica en las ordenadas la estación a analizar y en las abscisas el promedio de las demás estaciones. Si la gráfica presenta un comportamiento lineal indica que las estaciones son hidrológicamente homogéneas entre sí.

- Diagramas de cajas y bigotes: este análisis permite identificar la media y la mediana de los datos de precipitación, adicionalmente, se grafican los percentiles 25 % y 75 % (cajas), así como la desviación estándar (bigotes) y es posible identificar *outliers* o datos anómalos que pueden corresponder a datos mal medidos o a eventos extremos.
- Análisis de precipitación máxima en 24 horas y generación de curvas IDF: para realizar el análisis de precipitación máxima en 24 horas se debe realizar un análisis de frecuencia y ajustar los valores a una distribución de probabilidad, algunas de las más utilizadas son Weibull, Gamma, Gumbel, Lognormal. La mayoría de las veces los datos se ajustan bien a dos o más distribuciones de probabilidad, en estos casos se puede escoger una o se pueden ponderar los resultados dándole mayor peso a aquella que tenga una menor desviación estándar, así:

$$P_{ponderada} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i * \frac{1}{\sigma_i}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\sigma_i}}$$

Donde:

P_i = Precipitación máx. para el periodo de retorno ajustada a distribución ι

σ_i = Desviación estándar asociada a P_i

Una vez se realiza el ajuste a las distribuciones de probabilidad se pueden determinar precipitaciones máximas en 24 horas asociadas a diferentes periodos de retorno, las

cuales son el insumo fundamental para la construcción de las curvas IDF. Estas curvas se realizan para cada estación ajustando una ecuación como la que se presentan a continuación, donde las constantes de la ecuación son halladas mediante regresiones logarítmicas y asumiendo coeficientes de distribución de la lluvia a lo largo de las 24 horas (Campos, 1978). También existen coeficientes K, m, n determinados en estudios para diferentes zonas del país.

$$I \left(\frac{mm}{hr} \right) = K \frac{T^m}{t^n}$$

Donde:

I = Intensidad para diferentes duraciones (mm/h)

T = Periodo de retorno (años)

t = Duración (minutos)

K, m, n = Constantes para cada estación

2.3.1 EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL

La evapotranspiración potencial puede ser calculada de varias formas, la más recomendada es la ecuación de Penman–Monteith, aunque la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) realizó una modificación con la que incluye ecuaciones de resistencia aerodinámica y superficial. Esta ecuación usa como datos de entrada la velocidad media del viento, horas diarias de brillo solar (para el cálculo de la radiación), temperatura media del aire y humedad relativa, como se presenta a continuación:

$$ET_o = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34 u_2)}$$

Donde:

ET_o = Evapotranspiración potencial de referencia

R_n = Radiación neta en la superficie

T = Temperatura media del aire

u_2 = Velocidad media del viento

e_s = Presión de vapor de saturación

e_a = Presión real de vapor

Δ = Pendiente de la curva de presión de vapor}

y = Constante psicométrica

Otras ecuaciones utilizadas son las de Thornthwaite, Christiansen, Linacre, Turc y Har-greaves (Gómez-Blanco y Cadena, 2017).

2.3.3 EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL

La evapotranspiración potencial corresponde al valor máximo que puede tomar la evapotranspiración para condiciones de referencia, sin embargo, esta considera disponibilidad ilimitada de agua (precipitación), lo cual no se cumple en los períodos secos. Por lo anterior, la evapotranspiración real no siempre es igual a la potencial, por lo cual es necesario calcular la evapotranspiración real que permite obtener un valor más realista de acuerdo con la disponibilidad de agua limitada.

El cálculo de la evapotranspiración real para el área de estudio se realizó siguiendo la ecuación de Budyko (1974). Esta ecuación es empleada para transformar la evapotranspiración potencial en la evapotranspiración real, teniendo en cuenta datos anuales de ETP y precipitación sobre un área determinada.

$$ETR \left(\frac{mm}{año} \right) = \sqrt{ETP * P * \tanh\left(\frac{P}{ETP}\right) * \left[1 - \cosh\left(\frac{ETP}{P}\right) + \sinh\left(\frac{ETP}{P}\right)\right]}$$

La formulación de la ecuación de Budyko se basa en un balance de masas considerando que un aumento en la precipitación genera un aumento en la escorrentía, mientras que, ante un descenso en la precipitación, el caudal tiende a un valor límite. Así mismo, la ecuación final considera que en condiciones secas $R/p \rightarrow 0$ o $ETR/p \rightarrow \infty$; por otra parte, en condiciones húmedas $ETR \rightarrow ETP$ cuando $\rightarrow 0$.

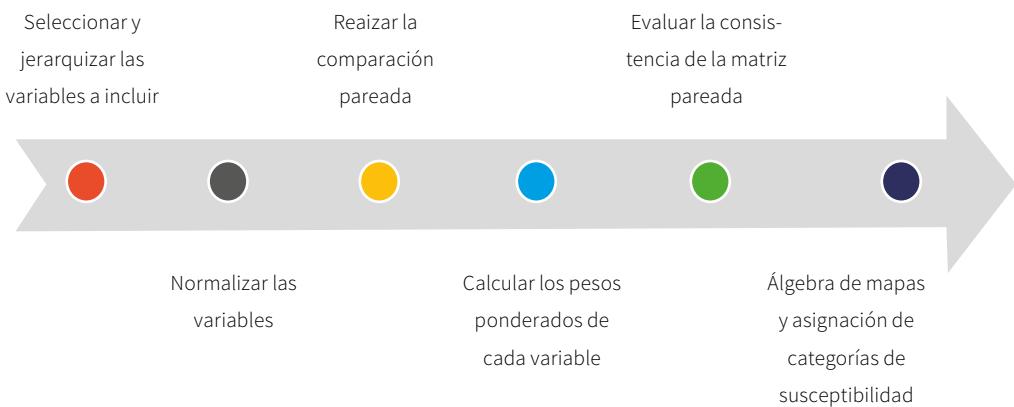
2.4 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

2.4.1 ANÁLISIS MULTIVARIADO DE VARIABLES FISIOGRÁFICAS

El análisis multivariado se basa en el método de jerarquías analíticas propuesto por Saaty (1980), en el cual se asignan pesos ponderados a cada una de las variables, teniendo en cuenta que no todas las variables a analizar tienen la misma importancia en la susceptibilidad a avenidas torrenciales.

El método de jerarquías analíticas o AHP permite asignar pesos a variables que normalmente están jerarquizadas y las cuales suelen entrar en conflicto, se recomienda, para evitar excesivas comparaciones, no tomar más de 7 variables diferentes, si se requiere tomar más de 7 estas pueden jerarquizarse en varios niveles, con ello se realiza una comparación dentro de cada nivel. Una vez definida la jerarquización de las variables, se realiza una comparación directa por pares entre las variables, para determinar cuál de ellas es más importante (Yepes, 2018). En la figura 28 se presenta el esquema general para el desarrollo de esta metodología.

Figura 28. Esquema metodología de análisis multivariado con jerarquías analíticas de Saaty



Fuente: elaboración propia.

2.4.1.1 Selección y jerarquización de variables a incluir

El primer paso es la selección de las variables que van a ser tenidas en cuenta en el análisis. En la se presenta la relación de cada una de las variables descritas el numeral 2.2 con la generación de avenidas torrenciales (AT). El evaluador debe escoger las variables que considere más relevantes o puede probar con varios escenarios de variables seleccionadas y comparar el resultado.

Tabla 20. Relación de las variables fisiográficas con la generación de avenidas torrenciales

Variable	Relación con la generación de avenidas torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación
Cobertura de tierra	<p>Efectos mecánicos: La cobertura genera enraizamiento y anclaje al suelo, sin esta pueden propiciarse procesos de erosión, socavación y movimientos en masa que a su vez desencadenen en eventos de avenida torrenciales.</p> <p>Efectos hidrológicos: un suelo desnudo o con poca cobertura vegetal puede alterar la infiltración y evapotranspiración, lo que implica mayores volúmenes de escorrentía aportados al cauce en períodos cortos de tiempo.</p>	Cualitativa	

Las avenidas torrenciales normalmente se generan en zonas muy escarpadas de laderas, cerros y colinas.

Variable	Relación con la generación de avenidas torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación
Geología	La dureza y meteorización de las rocas son factores condicionantes para la generación de movimientos en masa. A vez de acuerdo con la litología se pueden generar diferentes tipos de flujos de avenida torrencial.		Cualitativa/Cuantitativa
	Las avenidas torrenciales normalmente se generan en zonas muy escarpadas de laderas, cerros y colinas. Adicionalmente, algunas geoformas pueden ser propensas a la generación de represamientos en el cauce que desencadenen flujos de avenida torrencial. En la tabla 10 se presentan las geoformas indicativas de procesos de avenida torrencial y remoción en masa.		Cualitativa

Algunos patrones y formas erosivas y deposicionales de los cauces son indicativos de generación de avenidas torrenciales

Variable		Relación con la generación de avenidas torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación
Morfometría	Morfodinámica de la cuenca	Los deslizamientos y erosión de la cuenca son los principales factores condicionantes para la generación de avenidas torrenciales, si suelen suceder eventos de remoción en masa en la cuenca esta puede ser altamente propensa a generar avenidas torrenciales.	Cualitativa	A mayor susceptibilidad a eventos de remoción en masa, mayor susceptibilidad a AT
	Morfodinámica fluvial	Algunos patrones y formas erosivas y deposicionales de los cauces son indicativos de generación de avenidas torrenciales (ver tabla 11).	Cualitativa	
	Pendiente media de la cuenca	La pendiente de la cuenca indica si el relieve es escarpado, las avenidas torrenciales tienden a generarse en cuencas escarpadas con altas pendientes.	Cuantitativa	A mayor valor mayor susceptibilidad a AT

Algunos patrones y formas erosivas y deposicionales de los cauces son indicativos de generación de avenidas torrenciales

Variable	Relación con la generación de avenidas torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación
Morfometría	Pendiente media del cauce	La pendiente del cauce va a determinar la velocidad con la cual se va a mover el flujo, las avenidas torrenciales tienden a presentarse en cauces con relativamente altas pendientes.	
	Índice de compacidad	El índice de compacidad indica la forma de la cuenca, las cuencas redondas y más achatadas tienen menores tiempos de concentración, lo que implica que el agua va salir de la cuenca con mayor rapidez generando eventos de altos volúmenes de escorrentía en cortos períodos de tiempo.	Cuantitativa
	Factor de forma de Horton	El factor de forma indica si la cuenca es achatada, alargada o cuadrada, una cuenca achatada tiene una mayor susceptibilidad a generar avenidas torrenciales.	A mayor valor mayor susceptibilidad a AT

El índice de compacidad indica la forma de la cuenca, las cuencas redondas y más achatadas tienen menores tiempos de concentración

Variable	Relación con la generación de Avenidas Torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación	
Morfometría	Relación de elongación	Una relación de elongación baja indica cuencas de relieve pronunciado, estas cuencas pueden tener mayor susceptibilidad a generar procesos de avenida torrenciales.	Cuantitativa	A menor valor mayor susceptibilidad a AT
	Índice de Melton	Una cuenca se denomina torrenciales si su índice de Melton es mayor a 0,5, es una medida indirecta de la pendiente de la cuenca.	Cuantitativa	A mayor valor mayor susceptibilidad a AT
	Coeficiente de torrencialidad	El coeficiente de torrencialidad indica la relación entre el número de cauces de primer orden y el área de la cuenca, entre mayor sea este número mayor es su torrencialidad ya que el agua recorre cortas distancias hasta la salida, por lo que su tiempo de concentración es menor.	Cuantitativa	A mayor valor mayor susceptibilidad a AT
	Radio de lemniscata	Es una proporción que indica que tan cerca se encuentra la cuenca a la forma de una lemniscata, entre mayor sea este valor más se angosta la lemniscata, lo que implica una cuenca más alargada.	Cuantitativa	A menor valor mayor susceptibilidad a AT

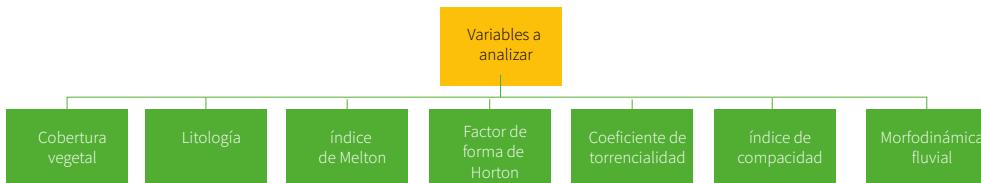
Variable	Relación con la generación de Avenidas Torrenciales	Tipo de variable	Tipo de relación
Índice de vulnerabilidad a eventos torrenciales (IVET)	Este índice indica directamente los rangos para los cuales la susceptibilidad es muy baja a muy alta.	Cuantitativa	A mayor valor mayor susceptibilidad a avenidas torrenciales Fuente: Autor

Nota: pueden incluirse otras variables como orden de corriente, patrón de drenaje, cercanía con las corrientes, erosión USLE, entre otros, de acuerdo con lo que considere necesario el evaluador.

El análisis puede ser realizado usando uno, dos o más niveles de jerarquía de las variables, es decir, si se utilizan dos niveles de jerarquía se pueden agrupar las variables, mientras que si se utiliza un solo nivel se deben tomar todas las variables por separado. En la figura 29 se presenta un ejemplo con un nivel de jerarquía y en la figura 30 se presenta un ejemplo con dos niveles de jerarquía.

En caso de que se utilicen dos niveles jerárquicos se deben estimar los pesos ponderados para cada subgrupo de nivel secundario y posteriormente se estiman los pesos ponderados para todo el conjunto de variables del nivel mayor.

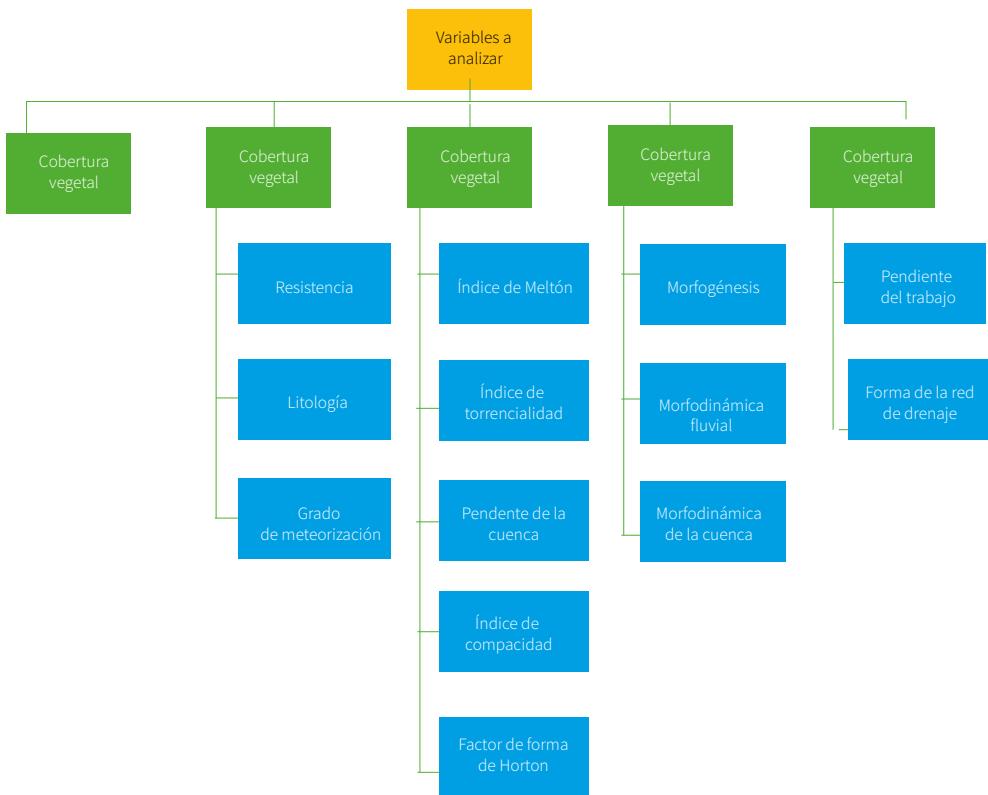
Figura 29. Ejemplo de un nivel de jerarquía para análisis de variables



Fuente: elaboración propia.

El análisis puede ser realizado usando uno, dos o más niveles de jerarquía de las variables, es decir, si se utilizan dos niveles de jerarquía se pueden agrupar las variables,

Figura 30. Ejemplo de dos niveles de jerarquía para análisis de variables



Fuente: elaboración propia.

2.4.1.2 Normalización de las variables

Cada una de las variables a incluir en el análisis multivariado tiene rangos diferentes e incluso se tienen variables cualitativas como la cobertura vegetal, por lo cual es necesario normalizar las variables de tal forma que todas estén en un mismo rango y así puedan cruzarse para conformar un único mapa de susceptibilidad. Para ello se utilizan diferentes funciones de transformación o normalización que usualmente maneja rangos de 0 – 1 o de -1 – 1.

Para las variables cualitativas se debe asignar un valor numérico de acuerdo con el criterio del evaluador y expertos, teniendo en cuenta lo mencionado en la tabla 20 sobre las relaciones entre las variables y la susceptibilidad a las avenidas torrenciales, de esta forma se convierte en una variable cuantitativa, la cual puede normalizarse de la siguiente forma:

- **Normalización lineal creciente o decreciente**

La función de normalización más sencilla es la lineal esta puede realizarse en función del valor máximo para normalizaciones crecientes o en función del valor mínimo para las normalizaciones decrecientes. Una normalización creciente se realiza si a mayor valor de la variable mayor es la susceptibilidad a las avenidas torrenciales, es decir si el valor de la variable normalizada es de 0 quiere decir que la susceptibilidad relacionada con esta variable es muy baja, en cambio si el valor de la variable normalizada es 1 implica que la susceptibilidad es muy alta. Mientras que la normalización decreciente se utiliza en caso contrario, en el cual la relación entre el valor de la variable es inversamente proporcional a la susceptibilidad a las avenidas torrenciales. A continuación, se presentan las ecuaciones de normalización lineal creciente y decreciente.

Función de normalización lineal creciente

$$Y = \frac{x - \min}{\max - \min}$$

Función de normalización lineal decreciente

$$Y = \frac{\max - x}{\max - \min}$$

Donde:

x = Valor de la variable a normalizar

y = Valor normalizado de la variable x

min = Mínimo valor que toma la variable

max = Máximo valor que toma la variable

Para realizar la normalización se deben tomar calcular los valores de cada variable para todas las subcuenca o zonas de análisis y de calcular el máximo y mínimo valor.

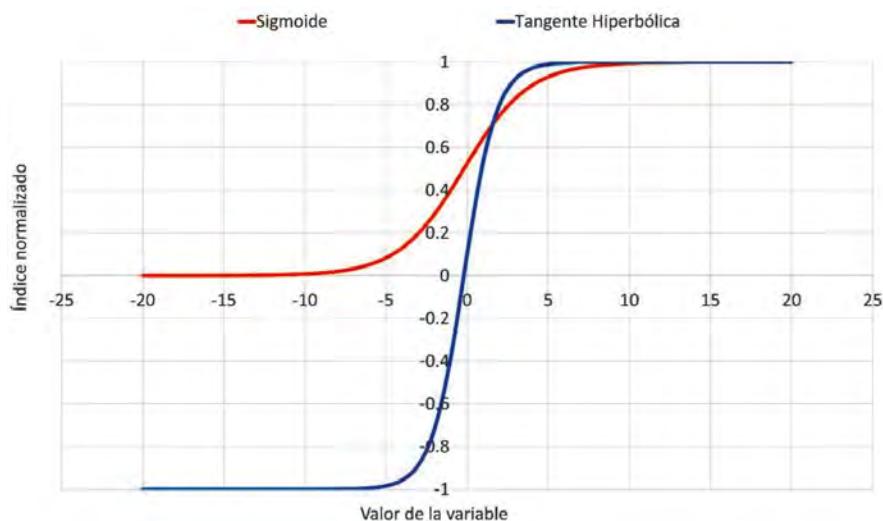
- **Normalización con función sigmoide y tangente hiperbólica**

Las funciones sigmoide y tangente son funciones de transformación que también sirven para realizar regresiones no lineales, estas funciones permiten asignar umbrales superiores e inferiores y tienen un comportamiento más o menos lineal en la zona intermedia, permitiendo ajustar algunas variables que presentan umbrales claros para

determinar la torrecialidad. Estas funciones tienen forma de S y permiten normalizar las variables en rangos de 0 – 1 (sigmoide) o de -1 – 1 (tangente hiperbólica), como se muestra en la figura 31.

Estas funciones pueden aplicarse después de realizar la normalización lineal descrita anteriormente, de tal forma que la pendiente de la curva a ser de 45° o pude ajustarse la pendiente para representar el comportamiento de las variables.

Figura 31. Comparación de funciones sigmoide y tangente hiperbólica



Fuente: elaboración propia.

Función de normalización sigmoide:

$$Y = \frac{1}{1 + e^{-(ax+b)}}$$

Función de normalización tangente hiperbólica:

$$Y = \frac{2}{1 + e^{-2(ax+b)}} - 1$$

x = Valor de la variable a normalizar

Y = Valor normalizado de la variable **x**

a = Pendiente de la curva

b = Punto\ de\ corte

- **Función de normalización sigmoide softmax:**

Esta es una variante de la función de normalización sigmoide que tiene en cuenta la media y la desviación estándar de los valores de las variables.

$$Y = \frac{1}{1 + e^{\frac{x-\mu}{\sigma}}}$$

Donde:

x = Valor de la variable a normalizar

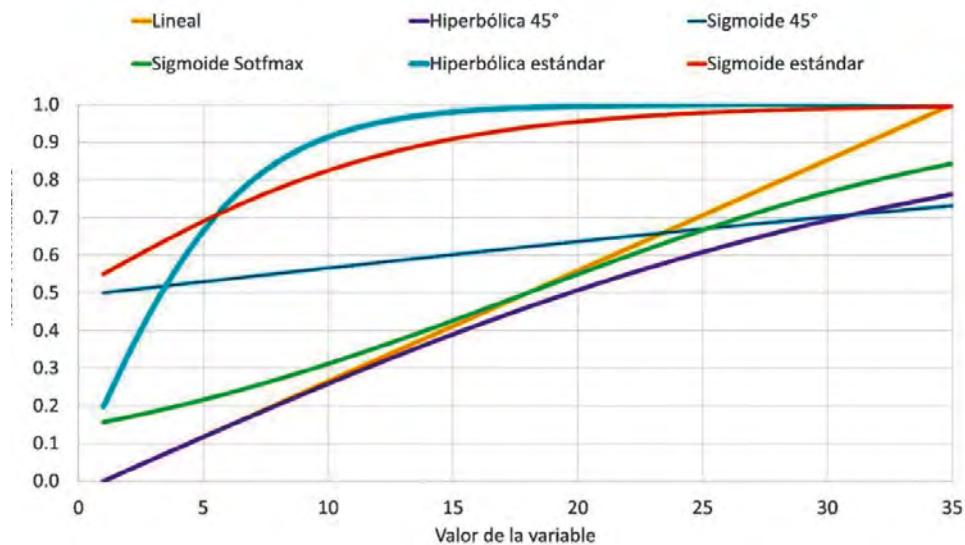
Y = Valor normalizado de la variable **x**

μ = Media de los datos

σ = Desviación estándar

En la figura 32 se presenta la comparación de las funciones anteriormente descritas para valores positivos de las variables a normalizar, que son el tipo de valores que se obtienen para las variables fisiográficas. Las curvas que se indican como sigmoide e hiperbólica 45° corresponden a las funciones sigmoide hiperbólicas aplicando inicialmente una regresión lineal simple, mientras que las que se indican como sigmoide e hiperbólica estándar, corresponden a aquellas a las cuales se les asignó una pendiente diferente.

Figura 32. Comparación de diferentes normalizaciones para valores positivos de las variables



Fuente: elaboración propia.

2.4.1.3 Comparación pareada

Esta metodología se fundamenta en que los seres humanos somos buenos para realizar comparaciones entre dos aspectos, pero no en un conjunto completo o para comparaciones globales, por lo cual, se debe generar una matriz de comparación cuadrada en la cual se compara el nivel de importancia de una variable respecto a otra (Yepes, 2018).

Se asignan puntajes o niveles de importancia de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 21. Escala de comparación por pares de Saaty

Puntaje	Definición	Observaciones
1	Igual importancia	El criterio A es igual de importante que el criterio B
3	Importancia moderada	La experiencia y el juicio favorecen ligeramente al criterio A sobre el B
5	Importancia grande	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente el criterio A sobre el B
7	Importancia muy grande	El criterio A es mucho más importante que el B
9	Importancia extrema	La mayor importancia del criterio A sobre el B está fuera de toda duda
2,4,6,8	Valores intermedios cuando es necesario matizar	

Fuente: Yepes (2018).

La matriz de comparación por pares tiene las siguientes propiedades:

- **Homogeneidad:** si dos variables son igualmente importantes entonces la comparación $A/B = 1$ y $B/A = 1$.
- **Reciprocidad:** si hay 4 variables a analizar, se deben realizar 4 calificaciones, ya que si la comparación de $A/B = 9$, entonces la comparación B/A es recíproca con el contrario $B/A = 1/9$.
- **Consistencia:** no hay contradicciones en las calificaciones de la matriz, para determinarlo se calcula el radio de consistencia, si este es mayor a un umbral el experto que se encuentra realizando la comparación debe reconsiderar sus calificaciones a las variables.

En la tabla 22 se presenta un ejemplo de matriz pareada. Es importante aclarar que para realizar esta comparación debe realizarse un análisis concienzudo, basado en estudios previos, observaciones de campo, entre otros para no caer en inconsciencias. Adicionalmente, se recomienda realizar varias matrices cambiando diferentes variables para comprar la sensibilidad de la susceptibilidad a estos cambios en ciertas variables.

Tabla 22. Ejemplo comparación pareada variables fisiográficas

Criterio B	Criterio A	Cobertura vegetal	Índice de Melton	Morfodinámica fluvial	Morfodinámica de la cuenca	IVET
Cobertura vegetal		1/1	1/7	1/1	1/7	1/7
Índice de Melton	7		1/1	5	1/5	1/1
Morfodinámica fluvial	1		1/5	1/1	1/5	1/5
Morfodinámica de la cuenca	7/1		5/1	5/1	1/1	1/1
IVET	7/1		1/1	5/1	1/1	1/1

Fuente: elaboración propia.

2.4.1.4 Cálculo de pesos ponderados y cálculo de consistencia

Una vez se realiza la matriz de comparación se deben calcular los pesos ponderados que van a ser asignados a cada una de las variables. Para calcular los pesos relativos se calculan los valores propios de la matriz o puede hacerse un cálculo simplificado aproximado sumando cada fila y dividiéndola en la suma total de las columnas así (Márquez, 1999):

.....

se recomienda realizar varias matrices cambiando diferentes variables para comprar la sensibilidad de la susceptibilidad a estos cambios en ciertas variables.

Tabla 23. Ejemplo cálculo pesos de las variables

Variable	Total fila	Cálculo del peso	Peso
Cobertura vegetal	2,4	2,4/53,2	0,05
Índice de Melton	14,2	14,2/53,2	0,27
Morfodinámica fluvial	2,6	2,6/53,2	0,05
Morfodinámica de la cuenca	19	19/53,2	0,36
IVET	15	15/53,2	0,28
Total columna	53,2		1,00

Fuente: elaboración propia.

Una vez se realiza el cálculo de los pesos se debe verificar la consistencia de la matriz, de tal forma que si se encuentra inconsistencia el evaluador experto debe reconsiderar las calificaciones asignadas.

En primer lugar debe calcularse el índice de consistencia C.I de la siguiente forma:

$$C.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

Donde:

λ_{\max} = Valor propio principal de la matriz

n = Número de filas o columnas de la matriz (número de variables)

Para calcular el valor de λ_{\max} se deben seguir estos pasos:

- Multiplicar la matriz de comparación por pares **A** por el vector de valores propios **W** (pesos):

$$V = A * W$$

Tabla 24. Ejemplo cálculo lamda

Matriz A					W	V
1,00	0,14	1,00	0,14	0,14		
7,00	1,00	5,00	0,20	1,00	0,05	0,22
1,00	0,20	1,00	0,20	0,20	0,27	1,18
7,00	5,00	5,00	1,00	1,00	0,05	0,28
7,00	1,00	5,00	1,00	1,00	0,36	2,54
					0,28	1,47

Fuente: elaboración propia.

- Dividir el vector resultante anterior V entre los pesos W:

Tabla 25. Ejemplo cálculo de lamda máx

V/W
4,9
4,4
5,6
7,1
5,2

Fuente: elaboración propia.

- Calcular el promedio del vector resultante V/W, este valor será el λ_{\max} , para el ejemplo anterior:

$$\lambda_{\max} = 5,9$$

- Calcular el valor de C.I.:

$$C.I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{5,5 - 5}{5 - 1} = 0,12$$

- Determinar el valor del índice aleatorio tabulado por Saaty R.I de acuerdo con el número de variables u orden de la matriz.

Tabla 26. R.I en función del orden de la matriz

n	R.I
1	0
2	0
3	0,58
4	0,90
5	1,12
6	1,24
7	1,32
8	1,41
9	1,45
10	1,49
11	1,51
12	1,48
13	1,56

n	R.I
14	1,57
15	1,59

Fuente: elaboración propia.

- Calcular la razón de consistencia R.I:

$$R.C = \frac{C.I}{R.I} = \frac{0,12}{1,12} = 0,10$$

Dependiendo del radio de la matriz la razón de consistencia el valor máximo permitido varía de la siguiente forma:

Tabla 27. *Umbrales para la razón de consistencia*

Tamaño de la matriz	Umbral R.C
3	5 %
4	9 %
5 o más	10 %

Fuente: Yepes (2018).

De acuerdo con lo anterior, para el ejemplo, la razón de consistencia corresponde a 10 %, por lo cual está dentro del rango de consistencia adecuado, en caso contrario el evaluador debería reevaluar algunas de las asignaciones realizadas en la comparación pareada.

2.4.1.5 de mapas y asignación de categorías de susceptibilidad

Una vez se determinan los pesos ponderados de cada una de las variables a analizar se realiza álgebra de mapas multiplicando las variables ya normalizadas por su res-

pectivo peso. El resultado de esta operación da un número de 0 – 1 (si las variables fueron normalizadas en este rango) y una vez se obtenga este valor se pueden asignar categorías de susceptibilidad, se recomiendan mínimo 3 categorías (bajo, medio alto) o 5 categorías (muy bajo, bajo, medio, alto, muy alto), esta distribución de los rangos queda al criterio del evaluador. Como se mencionó anteriormente, es recomendable realizar este ejercicio con varias combinaciones de variables para determinar si realmente hay ciertas variables muy determinantes.

2.4.1.6 Asignación de categorías de susceptibilidad a una cuenca como un todo

Cuando se realiza el ejercicio de análisis multivariado se puede determinar la susceptibilidad para áreas muy pequeñas de drenaje, este análisis puede expresarse individualmente para cada drenaje o para toda una cuenca con múltiples afluentes. En este último caso, ¿qué pasa cuando se quiere determinar la susceptibilidad para las cuencas completas que tienen varios afluentes?, es decir si por ejemplo la cuenca A tiene dos subcuencas A1 y A2, de las cuales A1 es altamente susceptible y A2 es medianamente susceptible, ¿cuál será la categorización de A como una cuenca completa? Para realizar esta asignación de categorías a cuencas compuestas por otras subcuencas o drenajes se proponen las siguientes opciones, sin embargo, queda al criterio del evaluador experto si se toma o no alguno de estos criterios.

- Ponderación por el área: así las cuencas con mayores áreas tendrán un mayor peso en el índice conjunto de susceptibilidad para la cuenca de orden mayor.
- Ponderación por la pendiente media de las subcuencas: así las subcuencas con mayores pendientes tendrán un mayor peso en el índice conjunto de susceptibilidad para la cuenca de orden mayor, ya que se asume que una zona con mayor pendiente o más escarpada va a tener un mayor aporte de sedimentos y menores tiempos de concentración que una zona baja cercana a la salida de la cuenca de orden mayor.
- Ponderación por la elevación media de las subcuencas: Así las subcuencas con mayores elevaciones tendrán un mayor peso en el índice conjunto de susceptibilidad para la cuenca de orden mayor, ya que se asume que una zona con mayor elevación va a ser más escarpada y por tanto va a tener un mayor aporte de sedimentos y menores tiempos de concentración que una zona baja cercana a la salida de la cuenca de orden mayor.

Nota: este análisis es relativo al nivel de segregación de las subcuencas o drenajes, se recomienda que se asigne un único valor de susceptibilidad a toda una cuenca, subcuenca o microcuenca y no a áreas individuales de drenaje, ya que esto permite que el mapa sea una herramienta de toma de decisiones de más fácil uso.

2.4.2 ÁRBOLES DE CLASIFICACIÓN

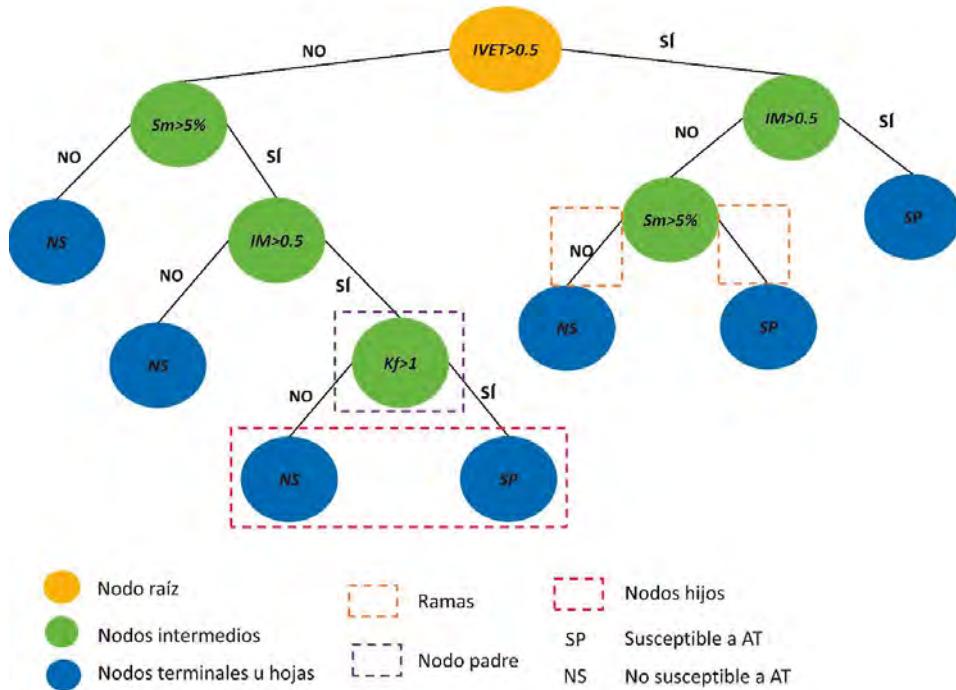
Los árboles de decisión son algoritmos de aprendizaje supervisado, los cuales son entrenados con un conjunto de datos, para posteriormente producir predicciones para datos diferentes; son muy utilizados para representar comportamientos no lineales. Existen dos tipos, los árboles de regresión, los cuales son utilizados para proporcionar predicciones cuantitativas y los árboles de clasificación, los cuales producen predicciones cualitativas que generalmente son binarias (si/no, reactivo/no reactivo, produce eventos/no produce eventos).

Este método puede utilizarse si se tiene un buen inventario de eventos históricos y es recomendable para cuencas de gran tamaño, en las cuales haya varias microcuencas con eventos históricos. Lo anterior, debido a que estos datos históricos son requeridos para el algoritmo de entrenamiento, de tal forma que se pueda construir un árbol que represente las características de las cuencas y su relación con la ocurrencia de eventos de avenida torrencial.

Los árboles de decisión se componen de las siguientes partes (En la figura 33 se presenta un ejemplo simple para avenidas torrenciales):

- **Nodo raíz:** este es el nodo donde empieza a ramificarse el árbol, si se tienen varias variables, la más importante va a estar en el nodo raíz.
- **Nodos intermedios:** en estos nodos se toman las decisiones.
- **Nodos terminales u hojas:** son los nodos en los cuales se tiene la predicción final, estos nodos no tienen hijos.
- **Nodo padre y nodos hijos:** un nodo que se divide en subnodos se denomina nodo padre y sus respectivos subnodos son los nodos hijos.
- **Ramas:** es una subsección del árbol.

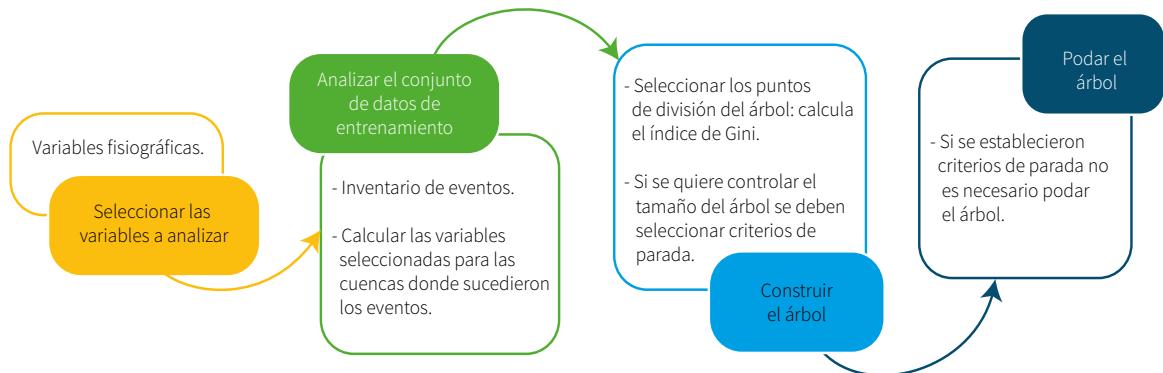
Figura 33. Estructura árbol de clasificación



Fuente: elaboración propia.

El proceso para la construcción de un árbol de clasificación se presenta en la figura 34 , el primer paso es seleccionar las variables que van a ser incluidas en el árbol, en este caso no hay necesidad de normalizarlas. Posteriormente, se debe analizar el conjunto de datos de entrenamiento (eventos históricos), es decir calcular esas variables para las cuencas que se van a analizar, incluyendo aquellas que han tenido y que no han tenido eventos. Finalmente, se construye el árbol, para ello hay dos opciones, una seleccionando criterios de parada que limiten el crecimiento del árbol y la otra generando un árbol muy grande para después podar las ramas; el proceso de construcción se presenta a continuación.

Figura 34. Metodología para construcción de árboles de clasificación para avenidas torrenciales



Fuente: elaboración propia.

Nota: es importante aclarar y recalcar que este método solamente permite definir si una cuenca tiende a ser reactiva o no, es decir si va a producir eventos o no, pero no incluye niveles de susceptibilidad, para incluir estos niveles se debe optar por complementar la metodología incluyendo relaciones de magnitud – frecuencia o con un análisis de frecuencia de los eventos o de los factores detonantes, como se explica más adelante en el análisis de amenaza.

2.4.2.1 Construcción del árbol

Los puntos clave para la construcción de un árbol de clasificación son:

- Seleccionar donde particionar el árbol: Es decir, el umbral para el cual se va a tomar la decisión SI/NO. Ejemplo: ¿el nodo debe dividirse en cuencas cuyo índice de Melton (IM) es $>0,5$ o debería dividirse en cuencas cuyo $IM>0,65$? El punto de partición es decisivo si se quiere lograr un árbol que acierte y que realice predicciones correctas sobre cuáles cuencas van o no a presentar eventos de avenida torrencial.
- Limitar el tamaño del árbol: determinar cuántas ramas va a tener el árbol, cuándo se debe parar y llegar a nodos terminales. Para ello se pueden selec-

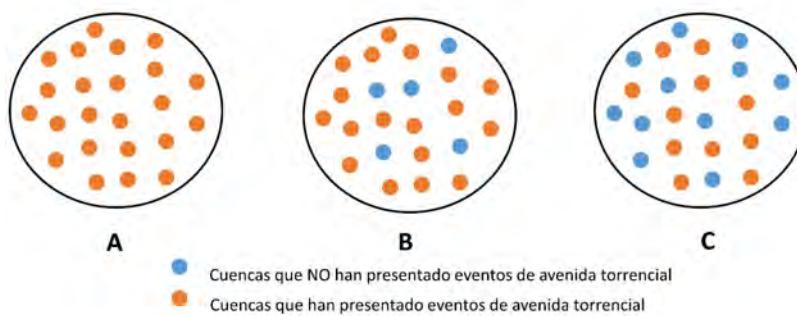
cionar criterios predefinidos de detención o se pueden generar árboles muy grandes que después deben ser podados.

Para seleccionar cómo particionar el árbol y cada uno de sus nodos se tienen varios criterios, entre ellos los más utilizados son la ganancia de información y el índice de Gini, ambos criterios miden la homogeneidad en la clasificación, es decir entre más homogéneo sea el árbol mejor va a representar los datos de entrenamiento, que para este caso son las cuencas con eventos históricos.

Ejemplo:

El nodo A es completamente homogéneo, por lo cual es un nodo puro, ya que representa completamente a las cuencas donde se han presentado eventos de avenida torrencial. B es un nodo un poco menos homogéneo, ya que incluye a cuencas que no han tenido eventos, sin embargo, C es un nodo nada homogéneo y por lo tanto impuro, ya que incluye una cantidad muy similar de cuencas que han presentado y que no han presentado eventos. La pureza del nodo define si la partición se está realizando correctamente o no (si es impuro no me va a representar correctamente el comportamiento de las cuencas).

Figura 35. Ejemplo homogeneidad/pureza de un nodo



Fuente: elaboración propia.

La ganancia de información se calcula con la entropía, la entropía es una medida del desorden.

- **Ganancia de información**

$$\text{Ganancia de información} = \text{Entropía}_{\text{nodo padre}} - \text{Entropía}_{\text{ponderada de los nodos hijos}}$$

$$\text{Entropía} = - \sum_{i=1}^n P_i * \log_2(P_i)$$

La ganancia de información se calcula con la entropía, la entropía es una medida del desorden, en este caso la combinación desordenada de cuencas que han y que no han presentado eventos.

Donde es la probabilidad de que la cuenca pertenezca a la clase i (que produce eventos o que no los produce).

- **Índice de Gini:**

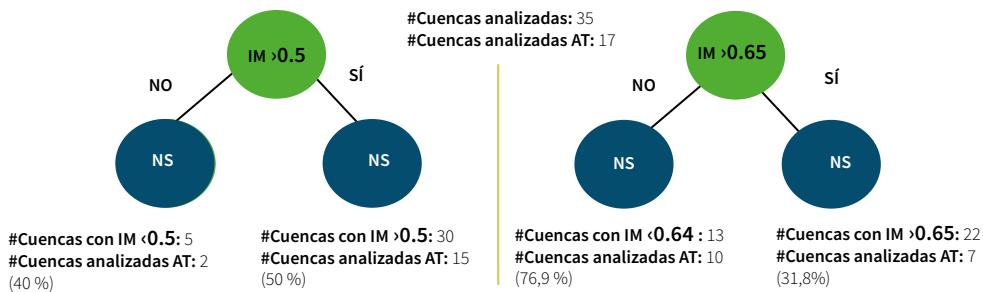
El índice de Gini mide la pureza de un nodo, es decir si en un nodo el número de clases representadas es pequeño mejor es el modelo o el nodo es más homogéneo. Entre más se acerque a cero (0) el índice de Gini más puro es el nodo y por lo tanto la partición es mejor.

$$GINI = 1 - \sum_{i=1}^n (P_i)^2$$

Nota: el índice de Gini también puede utilizarse para seleccionar cual variable es más importante y para seleccionar entre varias opciones de árboles el mejor, para ello se pondera el índice de Gini para todos los nodos.

A continuación, se presenta un ejemplo de cómo utilizar estos dos criterios para seleccionar la mejor partición de un nodo.

Figura 36. Ejemplo selección del punto de partición de un nodo



Fuente: elaboración propia.

- **Ejemplo cálculo de ganancia de información:**

» Para $IM > 0,5$

Entropía del nodo padre:

$$Entropía_{NP} = \left(-\frac{17}{35} * \log_2 \left(\frac{17}{35} \right) \right) - \left(\frac{18}{35} * \log_2 \left(\frac{18}{35} \right) \right) = 0,99$$

Entropía de los nodos hijos:

$$Entropía_{IM<0,5} = \left(-\frac{2}{5} * \log_2 \left(\frac{2}{5} \right) \right) - \left(\frac{3}{5} * \log_2 \left(\frac{3}{5} \right) \right) = 0,97$$

$$Entropía_{IM>0,5} = \left(-\frac{15}{30} * \log_2 \left(\frac{15}{30} \right) \right) - \left(\frac{15}{30} * \log_2 \left(\frac{15}{30} \right) \right) = 1$$

$$Entropía_{total} = \left(\frac{5}{35} * 0,97 \right) + \left(\frac{30}{35} * 1 \right) = 0,99$$

$$Ganancia\ de\ información_{IM>0,5} = 0,99 - 0,99 = 0$$

» Para $IM > 0,65$

$$Entropía_{IM < 0,65} = \left(-\frac{10}{13} * \log_2 \left(\frac{10}{12} \right) \right) - \left(\frac{3}{13} * \log_2 \left(\frac{3}{13} \right) \right) = 0,78$$

$$Entropía_{IM > 0,65} = \left(-\frac{7}{22} * \log_2 \left(\frac{7}{22} \right) \right) - \left(\frac{15}{22} * \log_2 \left(\frac{15}{22} \right) \right) = 0,90$$

$$Entropía_{total} = \left(\frac{13}{35} * 0,78 \right) + \left(\frac{22}{35} * 0,90 \right) = 0,85$$

$$Ganancia\ de\ información_{IM > 0,65} = 0,99 - 0,85 = 0,14$$

Conclusión: Se debe utilizar la partición de $IM > 0,65$ ya que produce una ganancia de información mayor, es decir su entropía es menor, ya que los conjuntos obtenidos con esta partición son más homogéneos, por lo cual representan mejor los datos observados.

- **Ejemplo cálculo índice de Gini:**

$$GINI = 1 - PP$$

» Para $IM > 0,5$

$$PP_{IM < 0,5} = \left(\frac{2}{5} \right)^2 + \left(\frac{3}{5} \right)^2 = 0,52$$

$$PP_{IM > 0,5} = \left(\frac{15}{30} \right)^2 + \left(\frac{15}{30} \right)^2 = 0,50$$

$$PP_{Ponderado} = \left(\frac{5}{35} * 0,52 \right) + \left(\frac{30}{35} * 0,5 \right) = 0,50$$

$$GINI = 1 - 0,50 = 0,50$$

» Para $IM > 0,65$

$$PP_{IM<0,5} = \left(\frac{10}{13}\right)^2 + \left(\frac{3}{13}\right)^2 = 0,64$$

$$PP_{IM>0,5} = \left(\frac{7}{22}\right)^2 + \left(\frac{15}{22}\right)^2 = 0,57$$

$$PP_{Ponderado} = \left(\frac{5}{35} * 0,64\right) + \left(\frac{30}{35} * 0,57\right) = 0,58$$

$$GINI = 1 - 0,58 = 0,42$$

Conclusión: Se debe utilizar la partición de $IM > 0,65$ ya que esta partición es más pura, esto debido a que el valor de GINI dio un valor más bajo (entre más cercano a cero más puro es el nodo), lo que indica que los conjuntos obtenidos con esta partición son más homogéneos, por lo cual representan mejor los datos observados.

2.4.2.2 Poda del árbol o limitación de su tamaño

Cuando se realizan árboles muy grandes se puede llegar a tener un sobreajuste, lo que implica que existen tantas posibilidades dentro del árbol que este va a representar demasiado bien los datos de entrenamiento, de tal forma que tenga una hoja o nodo terminal para cada una de las cuencas con eventos, pero puede llegar a tener un sesgo cuando se evalúa una cuenca nueva. Para evitar este sobreajuste se deben incluir criterios de detención para que el árbol no crezca demasiado o se puede generar el máximo árbol posible y después ir podando ramas Amat (2017).

Los criterios para detención pueden ser:

- Recuento de mínimo número de cuencas que presentan eventos asignadas a cada nodo terminal.
- Determinar la profundidad del árbol, es decir máximo número de ramas.
- Número máximo de nodos terminales.

Si se quiere hacer un proceso de poda lo mejor es ir eliminando cada nodo hoja y ver el efecto que tiene usando un conjunto de cuencas de prueba o se puede usar una función para guiar el proceso de poda, la cual se denomina tasa de error de clasificación (Em), la cual se emplea para los nodos terminales (Amat, 2017).

$$E_m = 1 - \max_i(p_{mi})$$

P_{mi} = Proporción de cuencas dentro del nodo m que pertenecen a la clase i

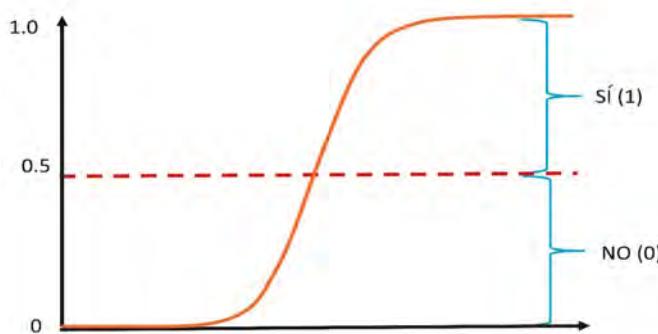
Nota: un ejemplo del uso de árboles de clasificación aplicado a avenidas torrenciales se puede encontrar en Chevalier (2013).

2.4.3 REGRESIONES LOGÍSTICAS

Anteriormente, se describió la función sigmoide la cual puede ser utilizada para normalizar variables, sin embargo, esta función es más utilizada para las regresiones logísticas que en otros términos, podríamos llamarla en términos generales como una “regresión no lineal múltiple binaria”, es decir que con base en más de una variable (fisiográficas) se obtiene una solución binaria de 0 o 1; en este caso 0 correspondería a cuencas que no tienden a presentar eventos de avenida torrencial, mientras 1 corresponde a cuencas que sí presentan eventos. Al igual que los árboles de clasificación este método puede ser utilizado solamente si se tiene una buena base de datos de eventos históricos y preferiblemente para cuencas grandes con microcuencas que hayan presentado eventos.

La regresión logística utiliza la función sigmoide para clasificar los resultados en dos valores 0 y 1, en términos de probabilidad de ocurrencia, como se observa en la figura 37, valores cercanos a 1 implican una mayor probabilidad de ocurrencia. El punto de partición para el cual la regresión toma valores de 0 o 1 puede variar de acuerdo con el comportamiento de las variables que se incluyan en la regresión.

Figura 37. Regresión logística



Fuente: elaboración propia.

La ecuación general de la regresión logística se presenta a continuación:

$$P(y) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots)}}$$

Donde:

$P(y)$ = Probabilidad de que ocurra y (que una cuenca genere eventos de AT)

X_1, X_2, X_3 = Variables incluidas en la regresión (Variables fisiográficas)

b_0, b_1, b_2, \dots = Coeficientes análogos a los de una regresión lineal múltiple

Nota: cuando se utilizan este tipo de regresiones se pueden hacer varios intentos incluyendo diferentes variables y escoger el que presente un mejor comportamiento.

Para ajustar las regresiones logísticas se utilizan softwares estadísticos con los cuales se puede transformar una regresión lineal múltiple en logística utilizando su forma logarítmica.

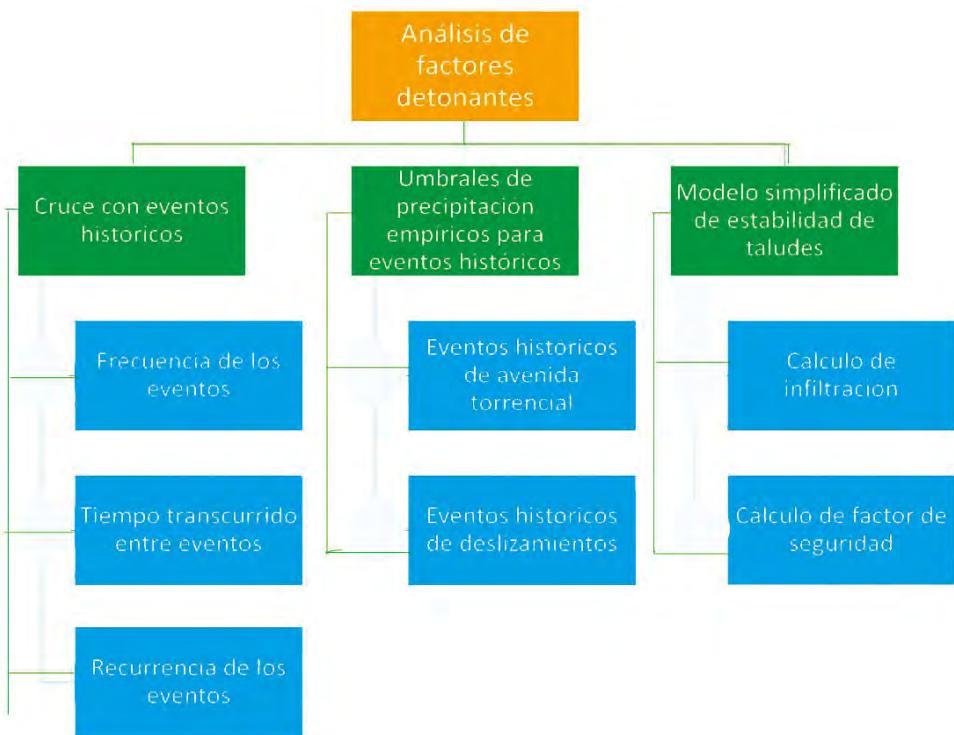
$$\ln\left(\frac{P(y)}{1 - P(y)}\right) = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + \dots$$

Nota: un ejemplo del uso de regresiones logísticas aplicado a avenidas torrenciales puede encontrarlo en Chevalier (2013).

2.5 METODOLOGÍAS PARA EL ANÁLISIS DE FACTORES DETONANTES Y PROBABILIDAD DE OCURRENCIA

Una vez se ha realizado el análisis de susceptibilidad debe realizarse el análisis de factores detonantes para que en conjunto se construya el mapa de amenaza. Existen diferentes formas de evaluar los factores detonantes, este análisis depende de la metodología aplicada para el análisis de susceptibilidad y del nivel de detalle que se quiera tener en el estudio de amenaza. A continuación, se plantean 3 enfoques diferentes, los cuales serán descritos más adelante.

Figura 38. Metodologías para el análisis de factores detonantes



Fuente: elaboración propia.

Nota: el análisis de factores detonantes puede relacionarse con la probabilidad de ocurrencia de los eventos.

2.5.1 CRUCE CON EVENTOS HISTÓRICOS

Si en el análisis de susceptibilidad no se tuvieron en cuenta los elementos históricos, o si en las cuencas de estudio se han producido varios eventos, se puede realizar un análisis de frecuencia o recurrencia de los eventos, asignando una escala de acuerdo con: 1. El número de eventos históricos registrados en la cuenca, 2. La recurrencia de los eventos, es decir el tiempo transcurrido entre eventos, 3. El tiempo transcurrido desde el último evento registrado. A continuación, se presenta un ejemplo:

Tabla 28. Ejemplo clasificación de eventos históricos para análisis de amenaza

Clasificación/Probabilidad de ocurrencia	Núm. eventos históricos registrados	Tiempo desde el último evento	Tiempo entre eventos
Bajo	0	>50 años	>50 años
Medio	1 - 2	20 – 50 años	20 – 50 años
Alto	>2	<20 años	<20 años

Fuente: elaboración propia.

Nota: se recomienda realizar este análisis únicamente a escala de microcuenca o cuenca, no para áreas de drenaje muy pequeñas.

2.5.2 UMBRALES DE PRECIPITACIÓN EMPÍRICOS PARA EVENTOS HISTÓRICOS

Este método puede ser utilizado si se cuenta con registros históricos de eventos, así como información de precipitación de la época, para ello se analiza la precipitación antecedente al evento de tal forma que se encuentre una relación entre la precipitación acumulada, los días antecedentes y la generación del evento.

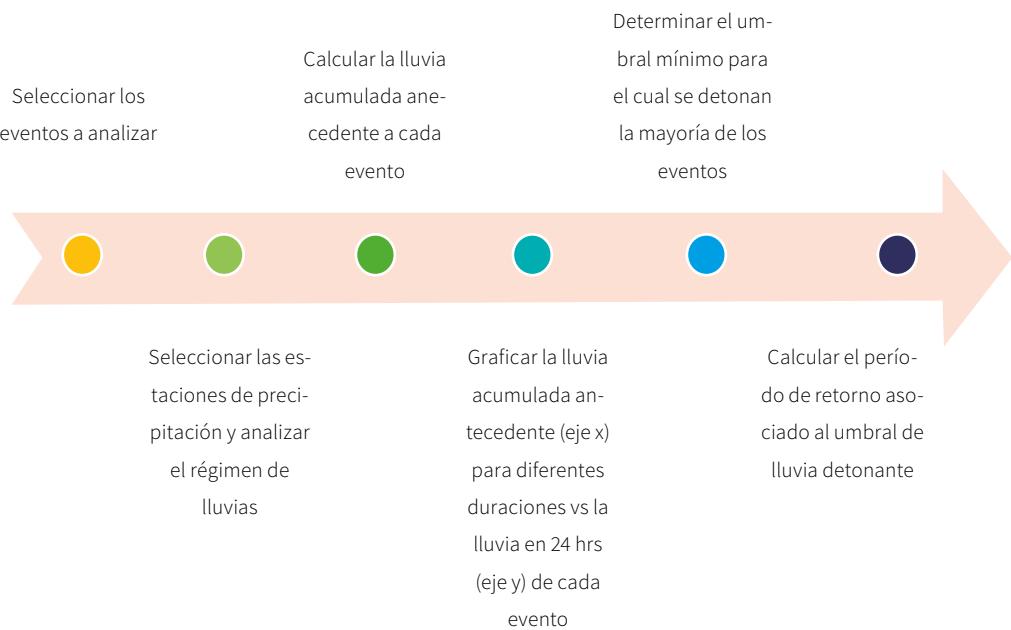
Los umbrales de precipitación se definen como los niveles mínimos o máximos para que un evento ocurra, para el caso de deslizamientos y avenidas torrenciales el umbral mínimo representa la cantidad de lluvia por encima de la cual la probabilidad de ocurrencia del evento se incrementa drásticamente (Aristizábal et al., 2011). El método que se describirá a continuación es un método empírico, basado en registros históricos, sin embargo, existen modelos físicamente basados con diferentes niveles de complejidad que serán descritos más adelante.

Así mismo, existen diferentes variaciones de métodos empíricos para determinar los umbrales de lluvia, aquí se describen solo 2 de ellos de forma simplificada, sin embargo, se pueden encontrar ejemplos de diferentes aplicaciones y variaciones de estos métodos en Mayorga (2003), Castellanos (1996), Castellanos y González (1997), Sepúlveda y Patiño (2016) y Aristizábal et al. (2011).

2.5.2.1 Determinación de umbrales de precipitación detonantes de deslizamientos históricos

Este método consiste en analizar la lluvia antecedente a los diferentes eventos de deslizamiento, tanto la lluvia de corta duración como la lluvia de larga duración, de tal forma que se identifique un umbral mínimo por el cual se detonan la mayoría de los deslizamientos, si se quiere se puede realizar un análisis de probabilidad, sin embargo, el método aquí presentado es simplificado, de tal forma que la identificación del umbral se realiza de forma gráfica. Para ello se deben realizar los siguientes pasos:

Figura 39. Metodología para determinar umbrales empíricos de lluvia detonante de deslizamientos



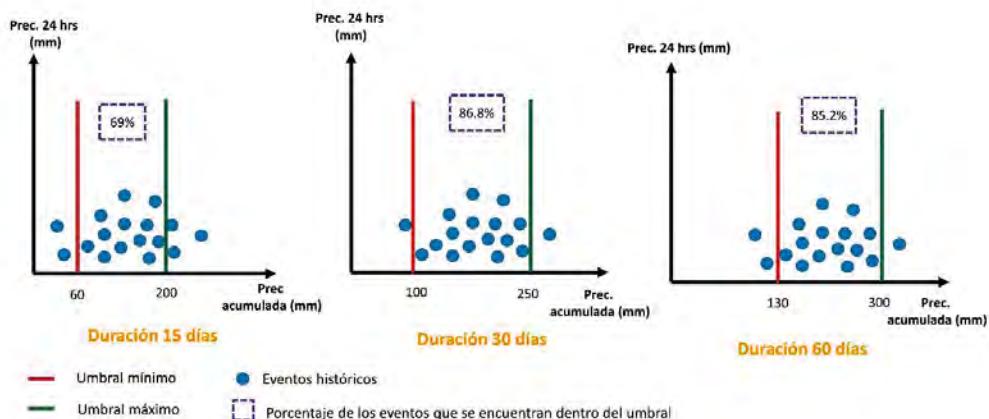
Fuente: adaptado de SGC (2017) y Aristizábal et al. (2011).

- **Seleccionar los eventos:** se deben seleccionar los eventos de deslizamiento que estén asociados a lluvias y de los cuales se tenga ubicación y fecha.
- **Seleccionar las estaciones y analizar el régimen de lluvias:** se deben seleccionar estaciones pluviométricas o pluviográficas que tengan datos diarios del área de estudio y caracterizar la precipitación de la zona.
- **Calcular la lluvia acumulada antecedente:** se debe calcular la lluvia acumulada para diferentes duraciones, de acuerdo con algunos estudios se reco-

mienda mínimo una lluvia de 15 días antecedentes (SGC, 2017), ya que para lluvias menores no se logra identificar un umbral mínimo, sin embargo, el ideal es realizar el análisis con varias duraciones para identificar cual es la duración más adecuada que se ajusta a las condiciones de la cuenca.

- **Graficar la lluvia acumulada antecedente vs la lluvia de 24 horas del día del evento y determinar gráficamente el umbral de lluvia para el cual se detonan los deslizamientos:** se debe graficar la lluvia acumulada antecedente para diferentes duraciones versus la lluvia de las 24 horas del día del evento, esto para cada evento, el umbral se determina observando en qué rangos se encuentran la mayoría de los deslizamientos registrados, como se observa en el ejemplo de la figura 40.

Figura 40. Ejemplo identificación de umbrales de precipitación detonante de deslizamientos



Fuente: elaboración propia.

- **Calcular el periodo de retorno asociado al umbral de lluvia:** teniendo en cuenta que varios estudios han identificado que el efecto de la lluvia antecedente de varios días es mucho más condicionante para la detonación de eventos de deslizamiento que una lluvia intensa de corta duración, es recomendable que, una vez ya se ha encontrado la lluvia acumulada y su duración, se determine el periodo de retorno de esta.

Sin embargo, si hablamos de eventos de avenida torrencial específicamente se puede determinar el periodo de retorno de la lluvia de 24 horas, ya que la

detonación del evento (así se hayan presentado deslizamientos previos por lluvias de larga duración) está mejor asociada con eventos de corta duración y alta intensidad.

Para determinar el periodo de retorno de la lluvia umbral de 24 horas se debe comparar con las curvas IDF de la zona de estudio, mientras que para determinar el periodo de retorno de la lluvia acumulada se realiza un proceso similar en el cual se desarrollan los siguientes pasos:

- Calcular la lluvia acumulada para la duración seleccionada para todo el periodo de registro disponible (debe ser la acumulación móvil, es decir moviéndose un día a la vez y calculando el acumulado para los días anteriores, se pueden saltar los días sin lluvia).
- Seleccionar la lluvia acumulada máxima para cada año.
- Realizar un análisis de frecuencias ajustando los valores máximos de lluvia acumulada a una distribución de probabilidad (mismo proceso que se realiza con la precipitación máxima en 24 horas, ver numeral 2.3.1).
- Calcular las lluvias acumuladas para diferentes periodos de retorno e interpolar el umbral de lluvia acumulada para determinar el periodo de retorno al cual pertenece.

Nota: si no se quiere seleccionar directamente una duración, se puede realizar el análisis de periodo de retorno para todas las duraciones analizadas, así se obtendrá una curva de duración vs precipitación acumulada para cada periodo de retorno y se cruza el umbral para cada duración.

2.5.2.2 Determinación de umbrales de precipitación detonantes de avenidas torrenciales históricas

Si se tiene un inventario de eventos históricos robusto con varios eventos es posible realizar la misma metodología utilizada para deslizamientos aplicada para avenidas torrenciales, sin embargo, si se cuenta con algunos pocos eventos históricos de avenida torrenciales se puede realizar el análisis de la siguiente forma, de acuerdo con la metodología de Castellanos (1996).

Figura 41. Metodología para determinar umbrales empíricos de lluvia detonante de avenidas torrenciales

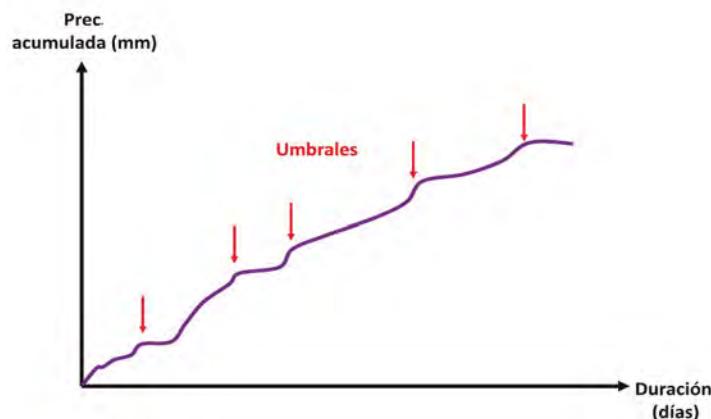


Fuente: elaboración propia.

- **Seleccionar los eventos:** se deben seleccionar los eventos de avenida torrencial a analizar, preferiblemente eventos intensos.
- **Seleccionar las estaciones y analizar el régimen de lluvias:** Se deben seleccionar estaciones pluviométricas o pluviográficas que tengan datos diarios del área de estudio y caracterizar la precipitación de la zona.
- **Calcular la lluvia acumulada antecedente:** se debe calcular la lluvia acumulada para diferentes duraciones de 15 a 180 días.
- **Graficar la lluvia acumulada antecedente vs la duración o tiempo antecedente y determinar cambios abruptos de pendiente:** se debe graficar la lluvia acumulada antecedente vs la duración o días antecedentes, en la gráfica se observa si hay cambios abruptos de pendiente, estos van a ser los umbrales para diferentes duraciones (ejemplo de esto en la figura 42).
- **Calcular el período de retorno asociado al umbral de lluvia: T**

- » Calcular la lluvia acumulada para cada umbral y su duración para todo el periodo de registro disponible (se pueden saltar los días sin lluvia).
- » Seleccionar la lluvia acumulada máxima para cada año.
- » Realizar un análisis de frecuencias ajustando los valores máximos de lluvia acumulada a una distribución de probabilidad (mismo proceso que se realiza con la precipitación máxima en 24 horas, ver numeral 2.3.1).
- » Calcular las lluvias acumuladas para diferentes periodos de retorno e interpolar el umbral de lluvia acumulada para determinar el periodo de retorno al cual pertenece.
- **Seleccionar el umbral crítico:** dependiendo de cómo se va a emplear este umbral el umbral crítico puede ser el de mayor o el de menor periodo de retorno, en términos generales el de mayor periodo de retorno va a tener menor frecuencia de ocurrencia lo que implica que va a ser más intenso, sin embargo, si tenemos en cuenta que a mayor probabilidad de ocurrencia mayor es la amenaza, el umbral crítico sería el de menor periodo de retorno, ya que, aunque es menos intenso igualmente genera eventos.

Figura 42. Ejemplo umbrales de lluvia detonante de avenidas torrenciales



Fuente: elaboración propia.

Nota: una vez se tengan los periodos de retorno para los umbrales de precipitación que detonan deslizamientos y avenidas torrenciales se pueden asignar categorías de bajo, medio, alto, entendiendo que a un bajo periodo de retorno la probabilidad de ocurrencia va a ser más alta por lo cual la categorización debería ser más alta.

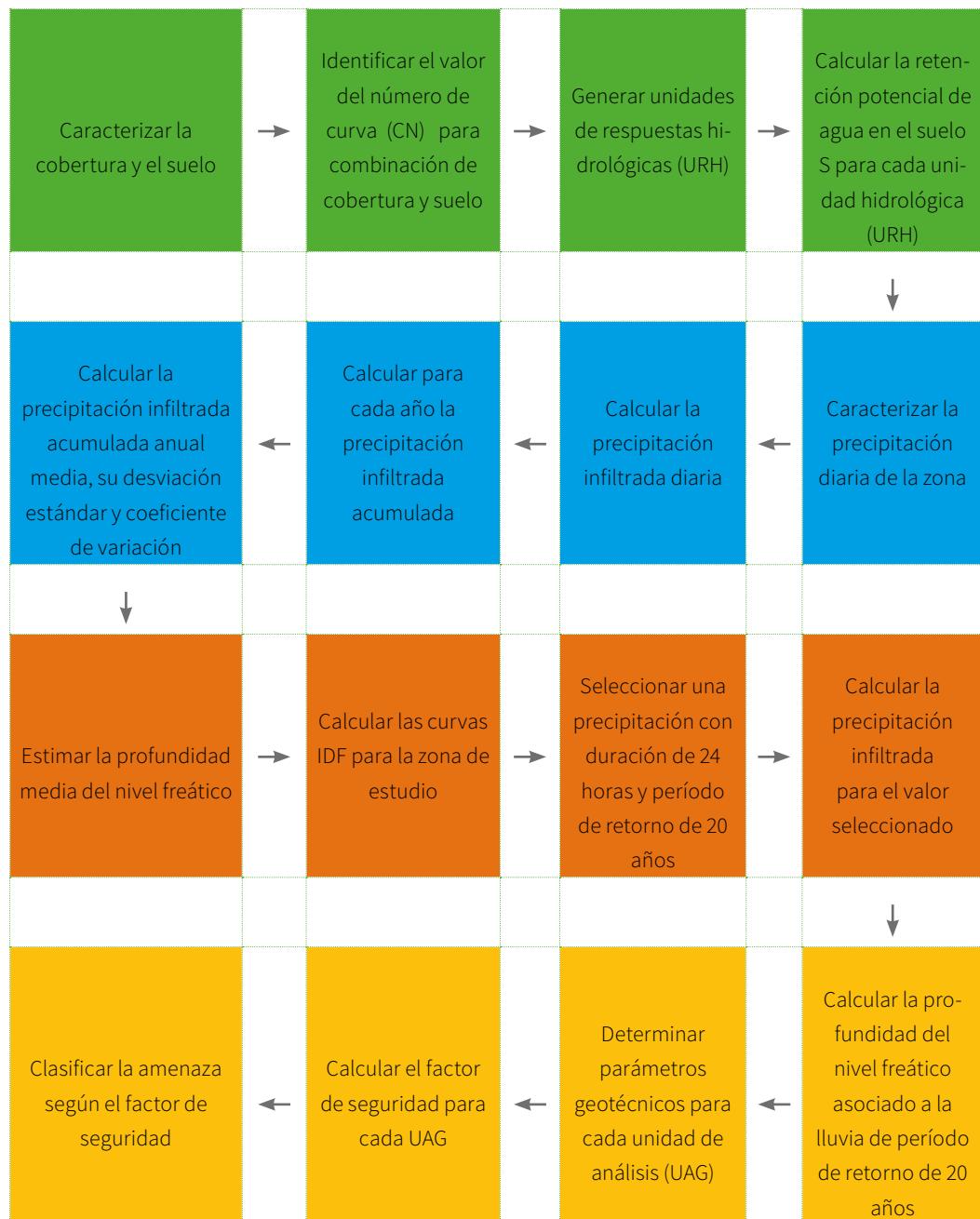
2.5.3 MODELO SIMPLIFICADO DE ESTABILIDAD DE TALUDES

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, la inestabilidad de taludes que genera deslizamientos se da debido a un incremento en la presión de poros generada por un aumento en el nivel freático o en el flujo subsuperficial, por lo cual para evaluar la generación de deslizamientos se debe calcular la profundidad de la lámina de agua en el subsuelo que se va acumulando durante periodos largos de tiempo.

Si se quiere desarrollar un cálculo simplificado, se puede calcular la profundidad de la lámina de agua en relación con el volumen de precipitación, para ello es posible utilizar la ecuación del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) del Departamento de Agricultura de Estados Unidos para calcular la escorrentía directa y posteriormente su complemento que sería la infiltración (SGC, 2016). El procedimiento general para el desarrollo de esta metodología se presenta en la figura 43 y se describe a continuación.

De acuerdo con el Servicio Geológico Colombiano, la inestabilidad de taludes que genera deslizamientos se da debido a un incremento en la presión de poros generada por un aumento en el nivel freático o en el flujo subsuperficial

Figura 43. Metodología para determinación de amenaza de deslizamientos por aumento del nivel freático



Fuente: adaptado de SGC (2016).

- **Determinar URH y su número de curva:** en primer lugar, se debe caracterizar la cobertura vegetal y el tipo de suelo del área de estudio y generar unidades de respuesta hidrológica URH que tengan la misma cobertura y tipo de suelo con el fin de determinar para cada una de ellas el número de curva CN para una condición de humedad antecedente normal.
- **Calcular la retención de agua máxima en el suelo S:** S corresponde a la retención de agua en el suelo, también podríamos describirlo como el umbral para el cual se empieza a generar escorrentía, este depende de las condiciones del suelo y la cobertura, por lo cual depende del número de curva:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

- **Caracterizar la precipitación diaria y calcular la infiltración diaria:** se debe realizar el análisis climatológico de precipitación (isoyetas, polígonos de Thiessen, etc.) y calcular la escorrentía directa para posteriormente calcular la infiltración diaria, como se indica a continuación:

$$P_e = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + 0.8S}$$

$$P_i = P - P_e$$

Donde:

P_e = Escorrentía directa (mm)

S = Capacidad de retención de agua en el suelo (mm)

P = Precipitación diaria (mm)

P_i = Precipitación infiltrada (mm)

- **Calcular la precipitación infiltrada acumulada anual, media, desviación estándar y coeficiente de variación (CVpf):** para cada año de registro de precipitación se debe calcular la precipitación infiltrada acumulada, posteriormente con los valores anuales se calcula el valor medio, su desviación estándar y coeficiente de variación.

- **Estimar la profundidad media del nivel freático (P_f):** esta profundidad se debe determinar por exploración de campo y si se cuenta con piezómetros, en caso de que no sea posible medirla se puede considerar que coincide con la profundidad de falla (SGC, 2016).
- **Calcular las curvas IDF y seleccionar una lluvia con periodo de retorno 20 años y duración 24 horas, calcular la precipitación infiltrada asociada (P_{i20}):** las curvas IDF se realizan con un análisis de frecuencia de precipitaciones máximas en 24 horas y una distribución de esa precipitación a lo largo del día, algunas estaciones del IDEAM ya cuentan con estas curvas o pueden construirse con base en registros de precipitación y regresiones potenciales. Se calcula la precipitación infiltrada de la misma forma que se describió anteriormente, sin embargo, ya que el valor de la curva IDF está en intensidad (mm/h) el valor de precipitación infiltrada va a estar igualmente en mm/h.
- **Calcular la profundidad del nivel freático asociada con un periodo de retorno de 20 años:** este es un estimativo simplificado de la profundidad del nivel freático, la cual se calcula teniendo en cuenta la variación de la infiltración a largo plazo y la intensidad de lluvia, de la siguiente forma (SGC, 2016):

$$N_{f20} = (\bar{P}_f - 1.65 CV_{pf}) - (P_{i20} * 24)$$

Donde:

N_{f20} = Profundidad del nivel freático asociado a $T = 20$ años (mm)

\bar{P}_f = Profundidad\ media\ del\ nivel\ freático medida en campo (mm)

CV_{pf} = Coeficiente\ de\ variación de la precipitación infiltrada anual (mm)

P_{i20} = Precitación/intensidad infiltrada asociada a $T = 20$ años (mm/h)

- **Determinar los parámetros geotécnicos para cada UAG:** si bien ya se cuenta con URH que tienen condiciones homogéneas de cobertura y suelo, puede que internamente de estas URH se presenten algunas variaciones de condiciones geotécnicas, por lo cual se deben determinar unidades de análisis geotécnico (UAG) y determinar sus características como profundidad de falla, ángulo de fricción interna, cohesión, pendiente, profundidad del suelo, entre otros.

- **Calcular el factor de seguridad para cada UAG:** El factor de seguridad va a determinar la estabilidad del terreno, este se calcula de la siguiente forma (SGC, 2016):

$$FS = \frac{(c'bsec\alpha + (\gamma bhcos\alpha - k\gamma bhsina - \gamma_w h_w \cos^2 \alpha) \tan \varphi')}{\gamma bhsina + k\gamma bhcose\alpha}$$

Donde:

c' = Cohesión

φ' = Ángulo de fricción interna

γ = Peso unitario del suelo

b = Ancho de la tajada o celda

h = Altura del suelo por encima de la superficie potencial de deslizamiento

γ_w = Peso unitario del agua

h_w = Altura de la lámina de agua asociada **T** = 20 años (**N_{f20}**)

α = Ángulo de inclinación de la superficie de falla

k = Coeficiente\ de\ aceleración horizontal para T=100 años

- **Clasificar la amenaza/probabilidad de ocurrencia según el factor de seguridad:** de acuerdo con el factor de seguridad se asocia una probabilidad de ocurrencia alta, media o baja para la generación de los deslizamientos detonantes, de acuerdo con lo siguiente:

Tabla 29. Categorización de la amenaza de acuerdo con el FS

Nivel de amenaza	Factor de seguridad
Alta	<1,1
Media	1,1 – 1,5
Baja	>1,5

Fuente: SGC (2016).

2.6 ANÁLISIS DE AMENAZA

El análisis de amenaza se realiza teniendo en cuenta la susceptibilidad en conjunto con la probabilidad de ocurrencia, que en este caso está representada mediante el análisis de factores detonantes. A cada una de estas dos variables se le debe asignar un valor de bajo, medio y alto (o se pueden asignar categorías intermedias a criterio del evaluador) y la amenaza será calculada de la siguiente forma:

$$\text{Amenaza} = \text{Susceptibilidad} * \text{Probabilidad de ocurrencia}$$

Nota: esta amenaza así mismo debe ser categorizada en niveles alto, medio y bajo. Es de aclarar que durante el análisis de susceptibilidad y probabilidad de ocurrencia la escala de trabajo y el nivel de agregación pueden variar de áreas de drenaje pequeñas a cuencas o microcuencas, lo cual está a criterio del evaluador y de acuerdo con la necesidad del estudio.



CAPÍTULO

MODELACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES



Jessica Paola Páez Pedraza

La modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales es un análisis muy detallado que requiere gran cantidad de información y la integración de varios modelos. El presente capítulo pretende presentar una metodología genérica que pueda ser utilizada para cualquier tipo de cuenca, sin embargo, pueden existir variaciones en los modelos a utilizar y su integración dependiendo de la información disponible y de las circunstancias particulares de la cuenca.

Así mismo, se presentan los fundamentos teóricos de algunos modelos hidrológicos, hidráulicos y de deslizamientos que pueden ser utilizados en el análisis. Los pasos generales para el desarrollo de la modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales se presenta en la figura 45 y la figura 46.

Por otra parte, en la figura 47 a la figura 50 se presentan los diagramas de flujo de la metodología general, incluyendo todas las diversas modelaciones que pueden ser aplicadas de acuerdo con las características de la cuenca y la información disponible, así mismo esta metodología será explicada en detalle más adelante. La explicación de la simbología del diagrama de flujo se presenta en la figura 44.

Es de aclarar, que el ideal cuando se realiza la modelación de avenidas torrenciales es utilizar un evento histórico con suficiente información para la calibración de los modelos y posteriormente simular escenarios para diferentes condiciones, como por ejemplo diferentes períodos de retorno de lluvia.

Finalmente, se presenta un ejemplo de calibración desarrollado por Páez (2016) para el evento de avenida torrencial generado en la quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca el 17 de noviembre de 1988.

Figura 44. Explicación simbología diagrama de flujo

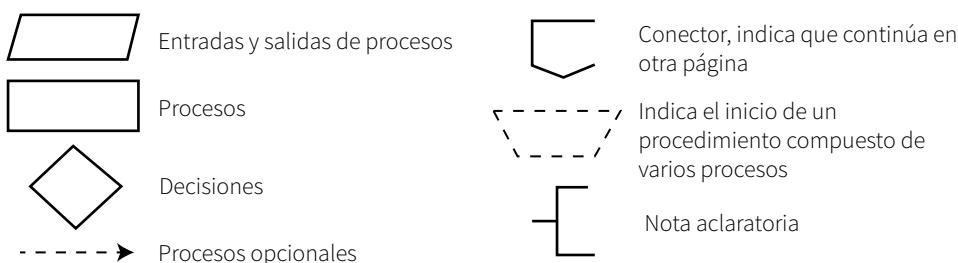


Figura 45. Pasos a seguir para modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales

1	<p>Selección de la cuenca de estudio</p> <ul style="list-style-type: none"> • El análisis local debe realizarse para cuencas riorizadas de especial interés. • La selección de la cuenca puede realizarse basada en los resultado de la evaluación regional de riesgo o para cuencas en las cuales hayan ocurrido eventos recientes o varios eventos históricos.
2	<p>Caracterización de mecanismos detonantes</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se deben identificar los mecanismos detonantes más recurrentes, se puede acudir al análisis de eventos históricos. • Se deben identificar las subcuenca o zonas de la cuenca que tengan mayor susceptibilidad, por ejemplo zonas de alta remoción en masa o cauces que puedan representar fácilmente
3	<p>Modelación hidrológica lluvia-escorrentía</p> <p>Si se cuenta con información de eventos históricos en lo posible se debe simular un evento para calibrar la reología.</p> <p>La modelación hidrológica será utilizada para la modelación de los mecanismos detonantes como para la modelación de la propagación de la avenida en el cauce o la zona de depositación Minúscula después de los dos puntos.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Modelación de evento histórico o calibración: Modelo lluvia-escorrentía de tiempo continuo que rerepresente las condiciones del evento. • Modelación de escenarios de riesgo: Modelo de tiempo continuo que represente condiciones medias y máximas de la cuenca o modelo de tránsito de crecientes asociado con un período de retorno.
4	<p>Si se está calibrando un evento se debe investigar cuáles fueron los mecanismos detonantes, si se están simulando escenarios se deben seleccionar escenarios detonantes:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Deslizamientos causados por lluvias intensas o prolongadas. • Representamientos de cauces y rotura de presas naturales • Procesos In-channel

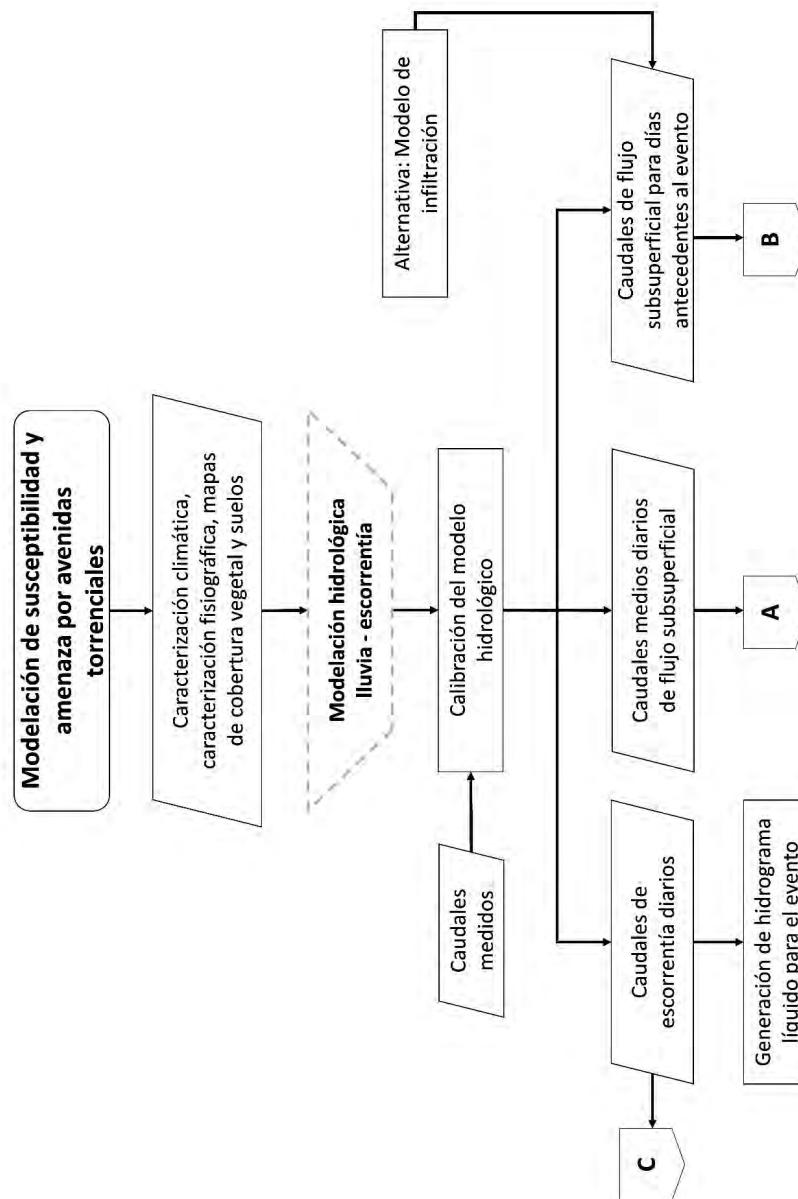
Fuente: elaboración propia.

Figura 46. Pasos a seguir para modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales

5	<p>Determinación de la concentración de sedimentos y el tipo de flujo</p> <p>A partir de la modelación de los mecanismos detonantes y la caracterización geológica de la cuenca se puede realizar una estimación inicial de la concentración de sedimentos de un determinado evento, así como el tipo de flujo.</p>
6	<p>Selección de la reología y modelo hidráulico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Con base en la concentración y el tipo de flujo se debe escoger uno o varios modelos reológicos que se puedan ajustar al tipo de flujo. • Teniendo en cuenta el o los modelos reológicos a utilizar se debe seleccionar el modelo hidráulico, ya que cada modelo hidráulico tiene diferentes modelos reológicos incorporados.
7	<p>Modelación hidráulica de la Avenida Torrencial</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se debe construir un hidrograma de avenida que combine los caudales sólidos y líquidos. Se pueden utilizar modelos uni o bidimensionales para simular el comportamiento de la avenida torrencial en el tránsito por el cauce, así como la depositación en el abanico aluvial. En lo posible se debe simular un evento histórico para posteriormente simular escenarios de riesgo.
8	<p>Calibración de la reología</p> <ul style="list-style-type: none"> • En lo posible se debe calibrar el modelo reológico con un evento histórico, esto permitirá utilizar los parámetros reológicos para futuras simulaciones, la calibración se puede realizar con profundidades (marcas dejadas por la avenida histórica) y áreas inundadas.
9	<p>Simulación de escenarios</p> <ul style="list-style-type: none"> • Seleccionar los escenarios de simulación (escenarios de lluvia y eventos detonantes). Para ello, una vez calibrada la reología, se deben realizar nuevamente los pasos 3, 4 y 7 para cada escenario.
10	<p>Generación de mapa de amenaza</p> <ul style="list-style-type: none"> • Se determinan categorías de amenaza de acuerdo con la profundidad y velocidad del flujo, así como las posibles áreas inundadas. • Se puede generar un mapa de amenaza para diferentes períodos de retorno (escenarios seleccionados)

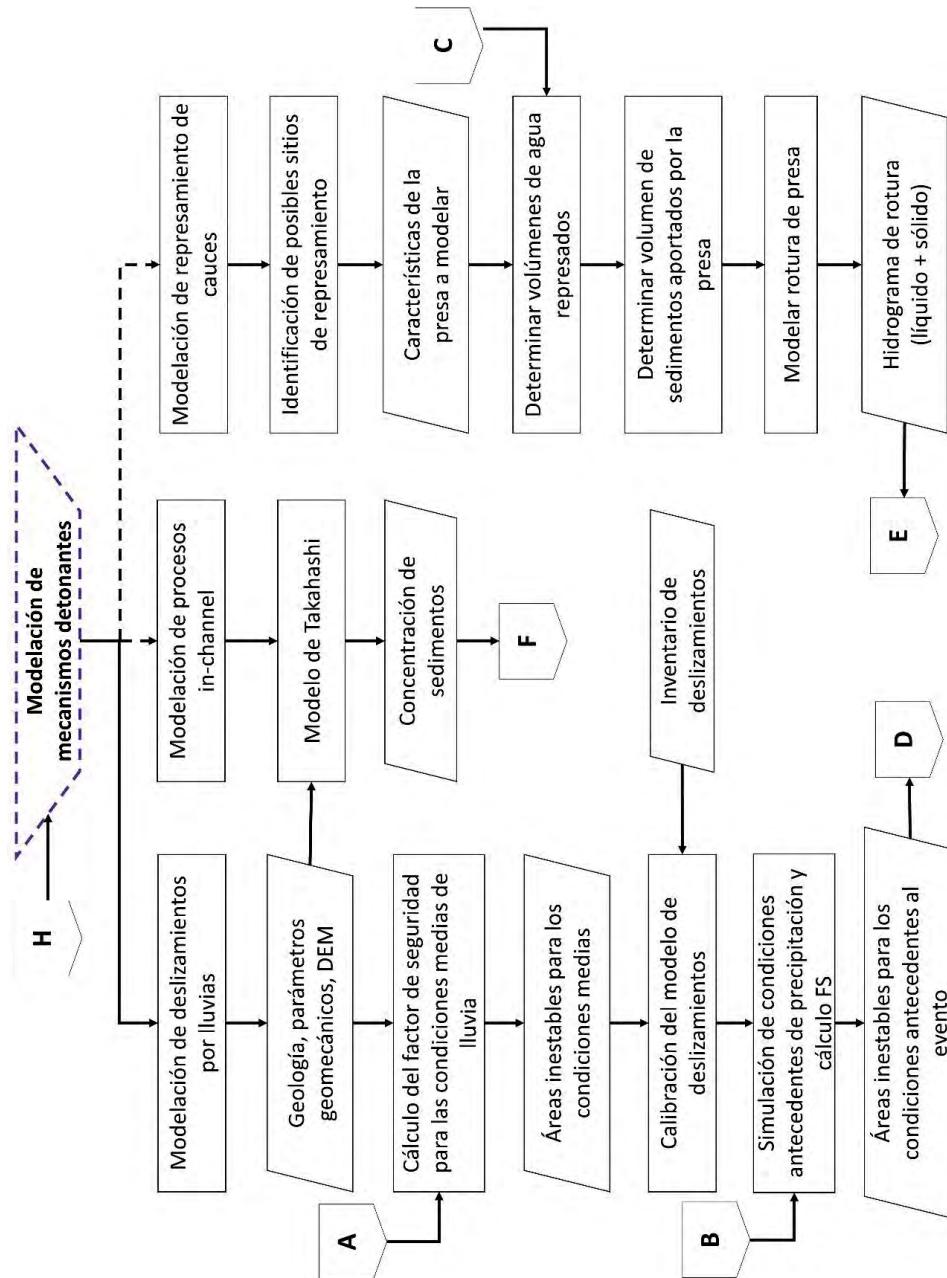
Fuente: elaboración propia.

Figura 47. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación hidrológica



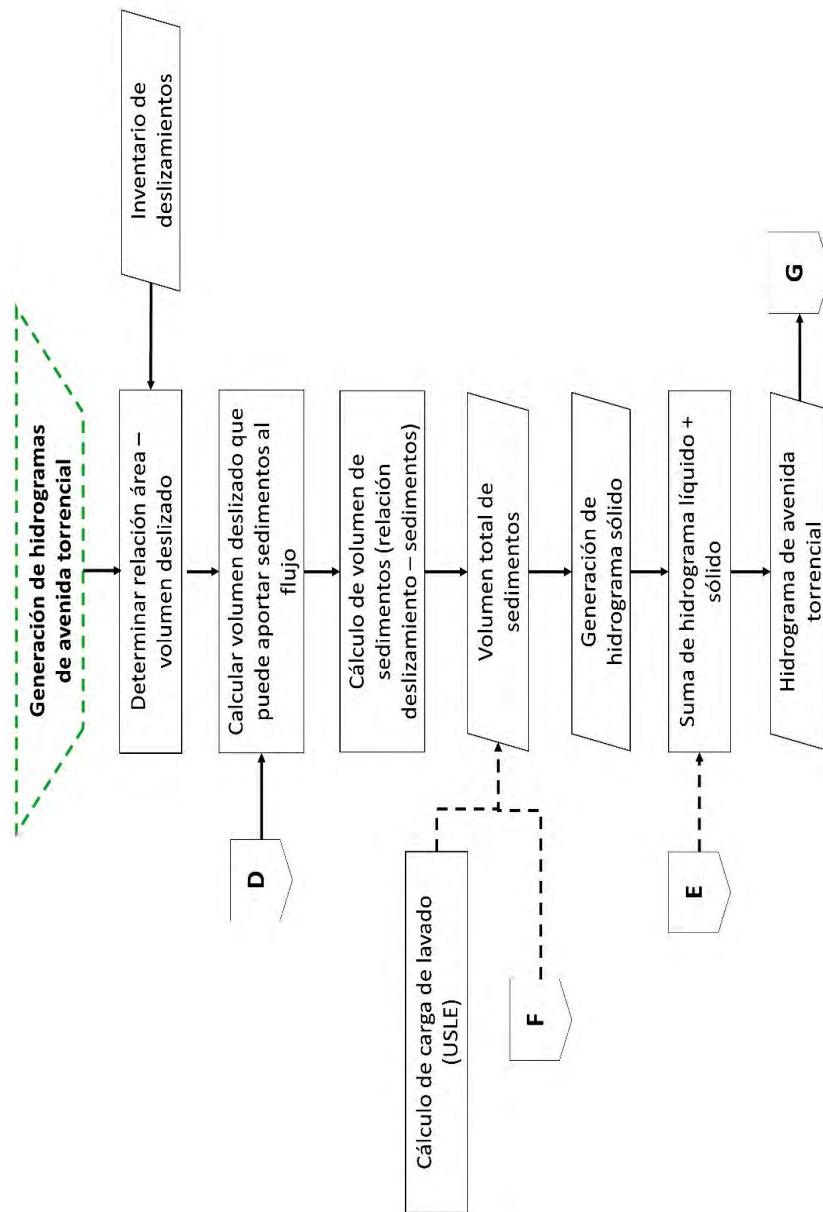
Fuente: elaboración propia.

Figura 48. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación de mecanismos detonantes



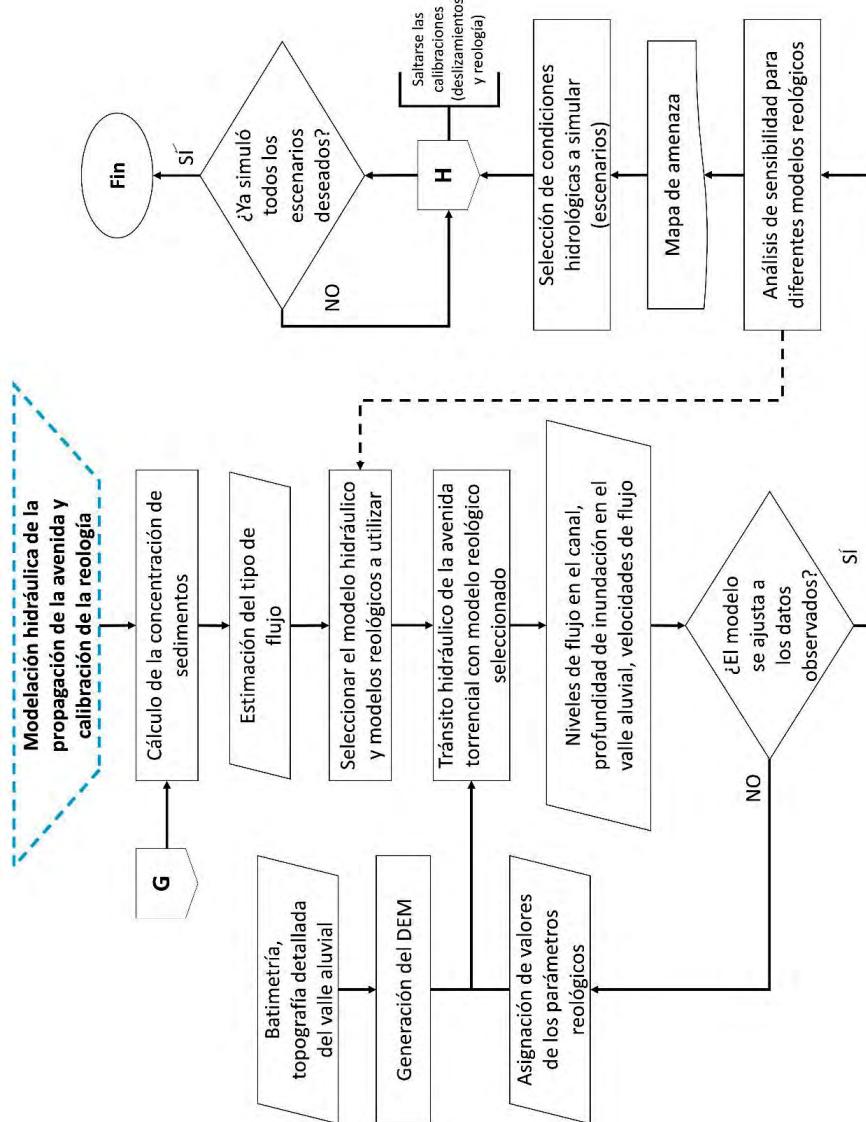
Fuente: elaboración propia.

Figura 49. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Generación de hidrogramas de avenida torrencial



Fuente: elaboración propia.

Figura 50. Diagrama de flujo general modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales – Modelación hidráulica de propagación de la avenida y calibración de la reología



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con lo presentado en la figura 47 a la figura 50 se presentan algunas aclaraciones generales respecto la metodología de modelación de susceptibilidad y amenaza por avenidas torrenciales:

- Ya que los deslizamientos en general son producidos por largos períodos de tiempo antecedentes con lluvias relativamente moderadas, se recomienda utilizar modelos hidrológicos de tiempo continuo, es decir que permitan simular condiciones medias diarias y no eventos de creciente puntuales.
- Si bien todos los modelos hidrológicos realizan el balance hídrico internamente, no todos generan resultados de flujos subsuperficial o infiltración explícitamente, por lo cual, si se utiliza un modelo hidrológico que no genere estos resultados explícitamente como alternativa para la modelación de deslizamientos se pueden utilizar modelos de infiltración horizontal o vertical con diferentes niveles de complejidad, incluso algunos modelos de deslizamientos ya incluyen internamente los módulos de infiltración.
- El mecanismo detonante de las avenidas torrenciales más común corresponde a fenómenos de remoción en masa, sin embargo, en algunos casos pueden presentarse represamiento de cauces o fenómenos erosivos dentro del canal, por lo cual se puede escoger cual o cuales mecanismos detonantes se incluyen en la modelación.
- Es importante calibrar el modelo de deslizamientos para condiciones medias o un período determinado del cual se tenga información de inventario de deslizamientos, sobre todo para los parámetros relacionados con el flujo subsuperficial, sin embargo, si se tienen buenos datos de campo de parámetros geomecánicos se puede obviar este paso.
- Para el cálculo final de la concentración de sedimentos puede o no incluirse la carga de lavado si se considera que es relevante. Cuando las cuencas tienden a generar flujos de lodos esta carga puede ser relevante.
- Como se ha mencionado en otros apartados de este documento es muy importante realizar una caracterización de la geología y suelos para determinar qué tipo de materiales son transportados por el cauce y así mismo determinar el tipo de flujos que tiende a generar la cuenca, ya que esto va a determinar la reología a utilizar. Se puede realizar un análisis de sensibilidad para diferentes reologías, el cual es recomendable cuando la concentración de sedimentos está en el límite de transición entre dos tipos de flujos lodos–hiperconcentrado o hiperconcentrado–detritos, ya que los resultados pueden variar sustancialmente.

- Se recomienda simular varios escenarios para diferentes condiciones hidrológicas, ya que estos diversos escenarios pueden generar diferentes profundidades, velocidades y áreas inundadas, por lo cual, con la simulación de varios escenarios se puede construir un mapa de amenaza muy completo.
- Cuando se realiza la simulación de escenarios se debe realizar nuevamente la simulación de mecanismos detonantes y la modelación hidráulica, sin embargo, es importante recalcar que en este punto no se debe realizar nuevamente una calibración de los modelos.

3.1 MODELACIÓN HIDROLÓGICA LLUVIA-ESCORRENTÍA

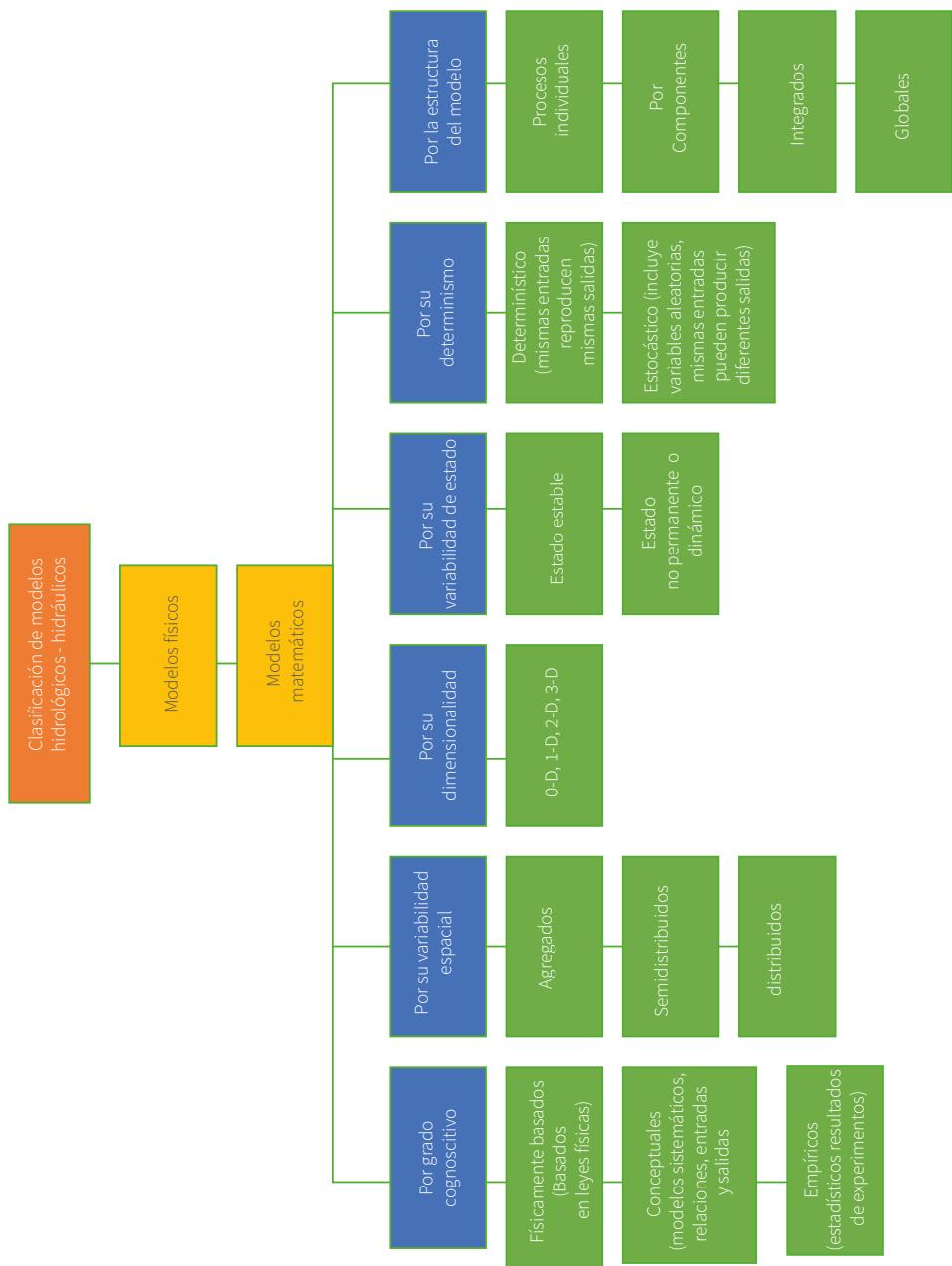
3.1.1 TIPOS DE MODELOS HIDROLÓGICOS

La modelación hidrológica de lluvia-escorrentía permite determinar los caudales de escorrentía, flujo base, infiltración, entre otros, mediante un balance hídrico en la cuenca de estudio o de relaciones de entrada y salida; o bien sea determinísticas o estocásticas (probabilidades). La complejidad de los modelos hidrológicos es muy variada, así como su utilidad, nivel de detalle y tipo de resultados.

En la figura 51 se presenta una clasificación general de los modelos hidrológicos que también puede ser aplicada para los modelos hidráulicos. Para la modelación de avenidas torrenciales se recomienda utilizar modelos físicamente basados, ya que estos pueden representar correctamente las condiciones complejas que se dan en las cuencas con avenidas torrenciales, adicionalmente, estos modelos presentan resultados de forma explícita de la mayoría de las variables del balance hídrico como el flujo sub-superficial, el flujo base, interceptación, evapotranspiración, entre otros. Sin embargo, se puede recurrir a modelos conceptuales siempre y cuando se tenga muy buena información para la calibración de este.

Por otra parte, también se recomienda utilizar modelos semidistribuidos o distribuidos, ya que estos permiten representar las variables condiciones de suelos, pendientes y cobertura vegetal de las cuencas de alta montaña donde se detonan las avenidas torrenciales. Así mismo estos modelos van a ser determinísticos al tratarse de modelos lluvia-escorrentía y modelos integrados ya que integran varios procesos del ciclo hidrológico.

Figura 51. Clasificación de modelos hidrológicos/hidráulicos



Fuente: adaptado de Díaz-Granados (2016).

3.1.2 PROCESO DE MODELACIÓN LLUVIA-ESCORRENTÍA

En la figura 52 se presenta el procedimiento para el desarrollo de una modelación hidrológica lluvia-escorrentía; dependiendo del modelo utilizado algunos pasos pueden variar un poco. Es importante recalcar que, previamente al desarrollo de la modelación, los datos climatológicos deben ser analizados en cuanto a su consistencia, homogeneidad, datos anómalos y deben ser completados los datos faltantes.

Algunos modelos hidrológicos tienen incorporados modelos de evapotranspiración, mientras que otros lo toman como un dato de entrada. Se sugiere realizar el cálculo de la evapotranspiración con la ecuación de Penman Monteith siempre y cuando exista información climática suficiente: velocidad del viento, brillo solar o radiación solar, temperatura media, máxima y mínima, humedad relativa; sin embargo, en caso que no se cuente con esta información se puede acudir a ecuaciones más sencillas que dependen de la temperatura o a datos medidos de evaporación.

Por otra parte, es muy importante que el modelo sea calibrado con datos medidos de caudales en el cauce, preferiblemente datos de estaciones limnimétricas o limnigráficas, sin embargo, si no se cuenta con esta información se puede acudir a aforos que deben ser realizados en varias condiciones hidrológicas (época seca y húmeda).

Una vez se cuenta con esta información, se debe asignar una función objetivo que permita comparar los resultados del modelo con los datos medidos. Una de las funciones objetivo más utilizadas es el coeficiente de Nash Sutcliffe (NSE), el cual tiene valores entre $-\infty$ y 1, donde 1 representa un ajuste perfecto de lo modelado vs lo observado, la ecuación del NSE se presenta a continuación.

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Q_m - Q_o)^2}{\sum_{t=1}^T (Q_m - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde:

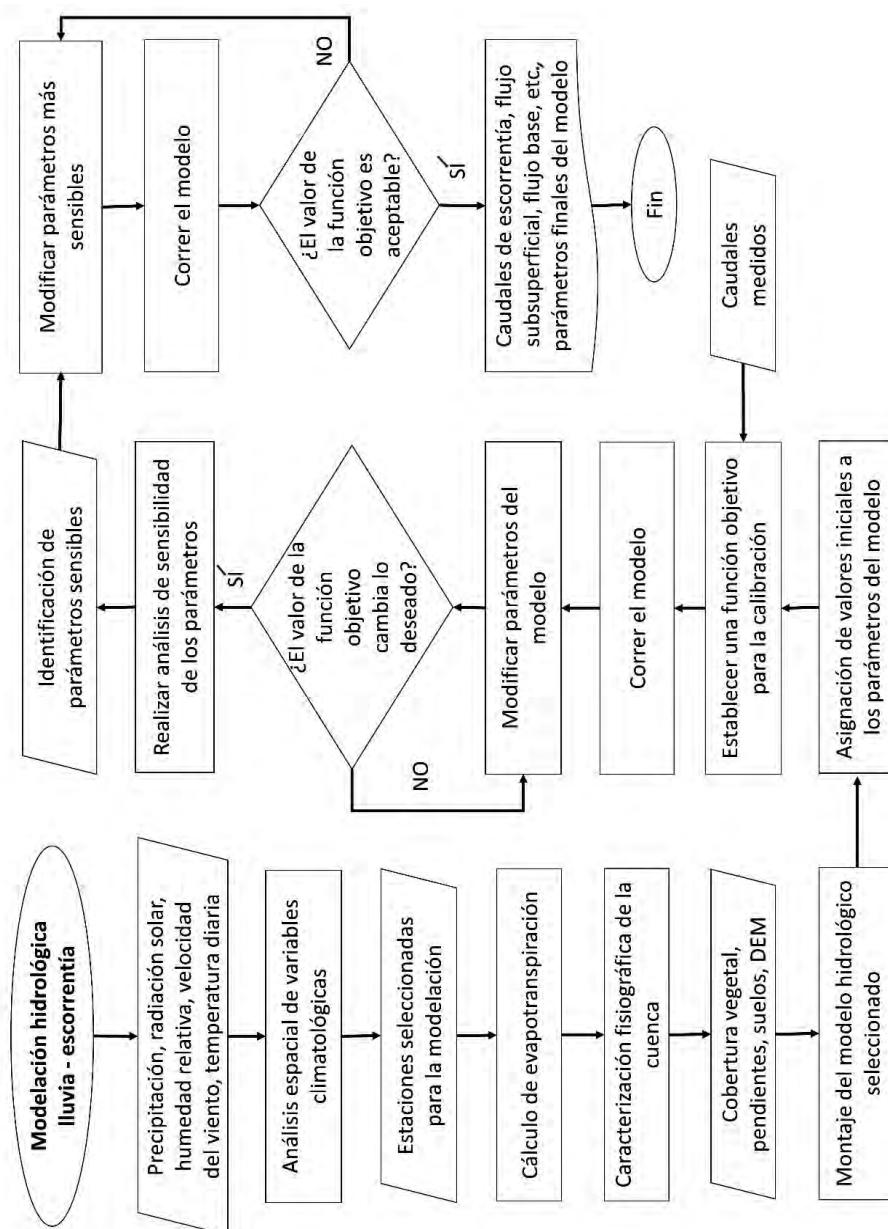
Q_m = Caudal modelado

Q_o = Caudal observado

\bar{Q}_o = Promedio de los caudales observados

Finalmente, es recomendable realizar un análisis de sensibilidad que permita determinar cuáles parámetros son más sensibles e identificables, es decir aquellos que afectan en mayor medida los resultados del modelo, para así lograr una calibración óptima modificando correctamente los parámetros.

Figura 52. Diagrama de flujo modelación lluvia–escorrentía



Fuente: elaboración propia.

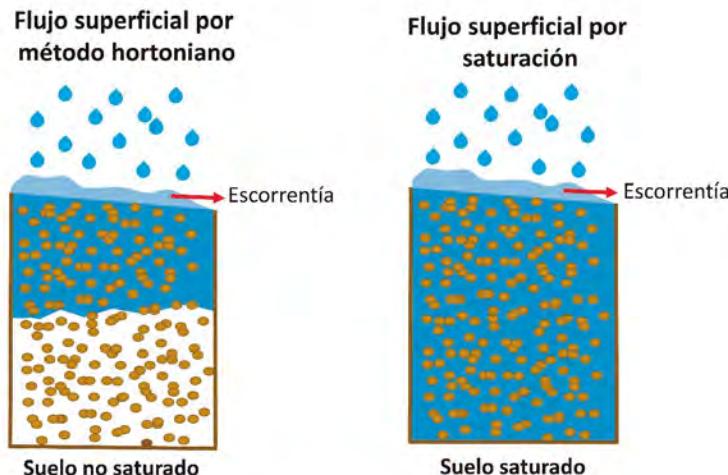
3.1.3 MODELO TOPMODEL

TOPMODEL es cual es un modelo lluvia–escorrentía semidistribuido que se basa en el índice topográfico de humedad, el cual representa la tendencia de un punto en la cuenca a desarrollar condiciones de saturación. Para zonas con un índice topográfico de humedad similar se podría asumir que son hidrológicamente homogéneas o se comportan hidrológicamente de forma similar (Tarboton, 2003).

El modelo calcula explícitamente los siguientes caudales: caudal de escorrentía superficial $q_{(it)}$, escorrentía superficial por mecanismo hortoniano, escorrentía superficial por exceso de saturación q_{of} , flujo vertical hacia el nivel freático $q_{(uz)}$, flujo subsuperficial q , flujo base. Este modelo calcula el caudal de escorrentía por medio de los siguientes métodos:

- Mecanismo hortoniano: este mecanismo actúa cuando la intensidad de precipitación supera la capacidad de infiltración del suelo o cuando la duración de la precipitación es superior al tiempo de encharcamiento en pequeñas depresiones del terreno.
- El flujo superficial por exceso de saturación: se produce cuando la zona subsuperficial se encuentra completamente saturada.

Figura 53. Representación gráfica de métodos de generación de escorrentía



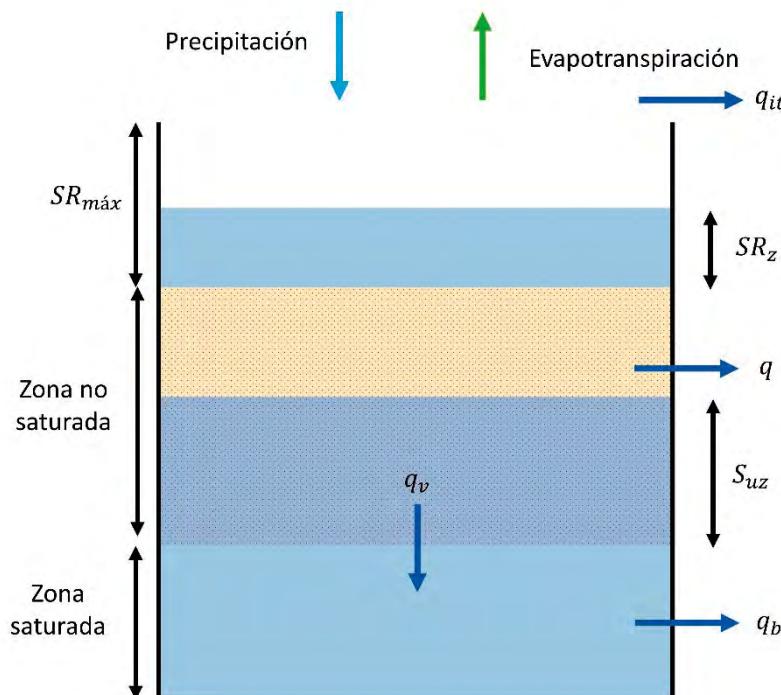
Fuente: elaboración propia.

TOPMODEL realiza el balance hídrico en el suelo bajo los siguientes supuestos (Tarboton, 2003):

- La dinámica de la zona saturada se puede aproximar a estados estacionarios sucesivos.
- La recarga R (m/h) que entra al nivel freático es espacialmente homogénea.
- El gradiente hidráulico eficaz de la zona saturada se aproxima a la pendiente topográfica de la superficie ($\tan \beta$).
- La transmisividad efectiva T de un perfil de suelo en un punto determinado es función del déficit de humedad en ese punto. La conductividad hidráulica decrece exponencialmente con la profundidad.

En la figura 54 se presenta esquemáticamente el balance que realiza el modelo en el suelo, así como las zonas y variables que tiene en cuenta.

Figura 54. Esquema balance hídrico en el suelo TOPMODEL



Fuente: adaptado de Nawarathna et al. (2002).

Asumiendo estado estable y una recarga R homogénea, el flujo subsuperficial en el sentido de la pendiente por unidad de contorno “ q ” se expresa como

$$q = R * \alpha$$

La simulación del déficit de humedad se realiza en función de la profundidad y almacenamiento de agua en el suelo, de la siguiente forma:

$$D = \Theta_{c^z w}$$

Θ_c = Porosidad efectiva

z_w = Profundidad del nivel freático

La transmisividad puede expresarse en función del déficit de humedad de la siguiente forma, donde f = Parámetro que determina que tan rápido decrece la transmisividad (constante).

$$T(D) = T_o e^{-f z_w} = T_o e^{-D/m}$$

$$m = \frac{\theta_c}{f}$$

El flujo subsuperficial máximo se puede expresar de la siguiente forma:

$$q = T_o e^{-D/m} S$$

$$R * \alpha = T_o e^{-\frac{D}{m}} S$$

$$D = -m \ln \left(\frac{R * \alpha}{T_o * S} \right)$$

Esto puede expresarse en términos del índice topográfico de humedad:

$$\lambda = \ln \left(\frac{\alpha}{S} \right)$$

Si D es menor que cero quiere decir que el suelo está completamente saturado y toda el agua que continúe cayendo en esta zona se convertirá en escorrentía (Tarboton, 2003).

El drenaje vertical de la zona no saturada hacia el nivel freático puede expresarse de la siguiente forma:

$$q_v = \frac{S_{uz}}{D * t_d}$$

Donde:

q_v = Flujo vertical desde la zona no saturada

S_{uz} = Almacenamiento en la zona no saturada

D = Déficit de humedad en el suelo

t_d = Tiempo de retraso de la zona no saturada

Por otra parte, en la zona de las raíces puede existir pérdidas de agua por evapotranspiración, así que la evapotranspiración real es calculada como una función de la evapotranspiración potencial y del déficit máximo de almacenamiento en la zona radicular, de acuerdo con lo siguiente (Muhammed, 2012):

$$ET_a = ET_p \left(1 - \frac{SR_z}{SR_{máx}} \right)$$

Donde:

ET_a = Evapotranspiración real

ET_p = Evapotranspiración potencial

SR_z = Déficit de almacenamiento en la zona radicular

$SR_{máx}$ = Déficit máximo de almacenamiento en la zona radicular

A continuación, se presentan los parámetros del modelo, así como su descripción:

Tabla 30. Parámetros TOPMODEL

Parámetro	Descripción
m (m/m)	Parámetro que describe el decrecimiento exponencial de la transmisividad con la profundidad.
To [$\ln(m^2/h)$]	Logaritmo natural de la transmisividad hidráulica del suelo cuando se encuentra saturado.
SR_{\max} (m)	Capacidad máxima de almacenamiento en la zona de las raíces.
SR_{init} (m)	El déficit de almacenamiento inicial en el suelo.
CHV (m/h)	Velocidad del flujo en el canal por fuera de la corriente principal
VR (m/h)	Velocidad del flujo en el canal principal
Td (h/m)	Tiempo de retraso en la zona no saturada por unidad de déficit de almacenamiento
Q_0 (m/día)	Caudal subsuperficial inicial
$d\theta(-)$	Cambio del contenido de agua a través del punto de succión
XK_{\min} (m/h)	Conductividad hidráulica mínima
XK_{\max} (m/h)	Conductividad hidráulica máxima
Poro (-)	Porosidad del suelo

Fuente: Muhammed (2012).

3.1.4 MODELO HEC-HMS

El HEC-HMS fue desarrollado por el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos, es un modelo semidistribuido que puede simular tanto eventos de creciente como flujo continuo (caudales diarios). Este modelo tiene submodelos separados para representar el volumen de escorrentía, la escorrentía directa, el flujo base y el flujo en el canal (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

El HEC-HMS incluye los submodelos que se presentan a continuación, el más comúnmente utilizado es el modelo del SCS.

- Cálculo de volumen de escorrentía:
 - » Inicial y tasa constante
 - » Número de curva del SCS (modelo de evento)
 - » *Green and Ampt* (modelo de evento)
 - » Déficit y tasa constante
 - » *Soil moisture accounting* (SMA) (modelo de tiempo continuo)
- Cálculo de flujo base:
 - » Contante mensual
 - » Recesión exponencial
 - » Reservorio lineal
- Modelos de tránsito:
 - » Onda cinemática
 - » Retraso
 - » Pulsos modificados
 - » *Muskingum*
 - » *Muskingum-Cunge*
 - » Confluencia
 - » Bifurcación
- **Modelo del Soil Conservation Service (SCS) – número de curva**

Este modelo estima el exceso de precipitación en función de la precipitación acumulada, el tipo de suelo, el uso del suelo y la humedad antecedente, por medio de la siguiente ecuación:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S}$$

Donde:

P_e = Exceso de precipitación acumulada

P = Precipitación acumulada

I_a = Abstracción inicial (pérdidas)

S = Almacenamiento\ potencial

Mediante experimentos se ha determinado que $I_a = 0,2S$, por lo cual la ecuación quedaría de la forma:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P - 0,8S}$$

Mientras que S puede calcular con base en el número de curva (CN):

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN}$$

Los valores del número de curva pueden ser tomados de las tablas proporcionadas por U.S. Army Corps of Engineers (2000).

- **Modelo Green and Ampt**

El modelo de *Green and Ampt* combina las ecuaciones de capacidad de infiltración de Richards y el flujo en la zona no saturada de Darcy, el modelo calcula las pérdidas de precipitación (infiltración) en las zonas permeables en un determinado periodo de tiempo de la siguiente forma (U.S. Army Corps of Engineers, 2000):

$$f_t = K \left[\frac{(1 + (\phi - \theta_i)S_f)}{F_t} \right]$$

Donde:

f_t = Pérdidas por infiltración durante el periodo de tiempo

K = Conductividad hidráulica saturada

$(\phi - \theta)$ = Volumen de déficit de humedad

S_f = Succión de poros (función de la porosidad)

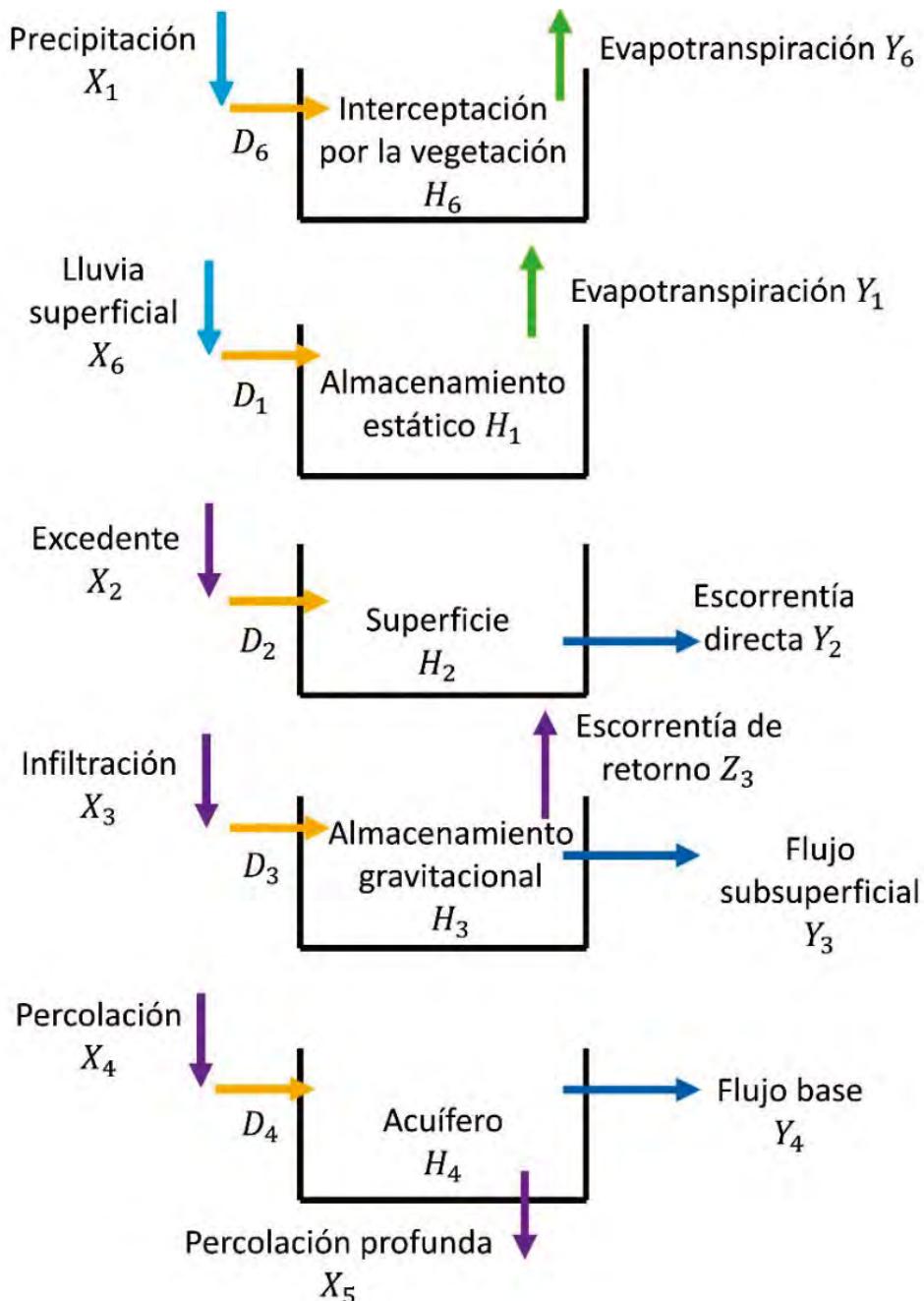
F_t = Pérdidas acumuladas en el tiempo t

- **Modelo *Soil moisture accounting (SMA)***

Este es el modelo utilizado por el HEC-HMS para simular condiciones continuas, en lugar de eventos puntuales de precipitación. Este modelo simula el movimiento del agua en 5 tanques que representan el agua en la vegetación, en la superficie del suelo, en el perfil del suelo y subterránea, en la figura 55 se presenta esquemáticamente el funcionamiento del modelo.

Este modelo simula el movimiento del agua en 5 tanques que representan el agua en la vegetación, en la superficie del suelo, en el perfil del suelo y subterránea.

Figura 55. Esquema de tanques modelo SMA



Fuente: adaptado de U.S. Army Corps of Engineers (2000).

- **Intercepción en el dosel:** representa la precipitación que es capturada por los árboles, arbustos y pasto y que no llega a la superficie del suelo, solo después de llenarse este almacenamiento la precipitación pasa a los siguientes almacenamientos. El agua en esta zona se evapora (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).
- **Depresiones en el suelo:** la precipitación que llega a este almacenamiento es la que no es capturada por la vegetación y la que supera la tasa de infiltración, de aquí el agua puede evapotranspirarse o infiltrarse, cuando se llena este almacenamiento se genera escorrentía (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).
- **Perfil del suelo:** el perfil del suelo se divide en dos zonas, la zona superior y la zona de tensión. La zona superior es la porción de suelo donde se pierde agua por evapotranspiración o percolación, mientras que la zona de tensión es aquella donde solamente se pierde agua por evapotranspiración. La zona superior es aquella que contiene el agua en los poros del suelo, mientras que la zona de tensión es aquella donde el agua está adherida a las partículas de suelo (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).
- **Acuífero:** está representado por procesos de flujo horizontal, esta zona incluye dos capas, el agua ingresa por percolación puede pasar de la primera capa a la segunda y de la segunda a la percolación profunda, esta última se considera pérdidas del sistema (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).
- **Proceso de infiltración:** el volumen de agua infiltrada durante un intervalo de tiempo es función del volumen de agua disponible, la capacidad de almacenamiento del suelo y la máxima tasa de infiltración y es modelada de la siguiente forma (U.S. Army Corps of Engineers, 2000):

$$P_{Sinf} = Max_{Sinf} - \frac{Cur_{ss}}{Max_{ss}} Max_{Sinf}$$

Donde:

P_{Sinf} = Volumen potencial de infiltración

Max_{Sinf} = Máxima tasa de infiltración

Cur_{ss} = Volumen de agua almacenada en el suelo al inicio del tiempo t

Max_{ss} = Máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

- **Proceso de percolación:** la tasa de percolación es mayor cuando la capa superior está llena y la que recibe está vacía y es calculada de la siguiente forma, teniendo en cuenta que la cantidad de agua disponible para percolación es igual al almacenamiento inicial del suelo más la infiltración (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).

Para la capa 1

$$P_{SP} = Max_{SP} \left(\frac{Cur_{SS}}{Max_{SS}} \right) \left(1 - \frac{Cur_{SGW}}{Max_{SGW}} \right)$$

Para la capa 2

$$P_{GWP} = Max_{PGW} \left(\frac{Cur_{SGW}}{Max_{SGW}} \right) \left(1 - \frac{Cur_{SGW2}}{Max_{SGW2}} \right)$$

Donde:

P_{SP} = Volumen potencial de percolación

Max_{SP} = Máxima tasa de percolación

Cur_{SS} = Volumen de agua almacenada en el suelo al inicio del tiempo t

Max_{SS} = Máxima capacidad de almacenamiento de agua en el suelo

Cur_{SGW} = Volumen de agua almacenada en la capa 1 al inicio del tiempo t

Max_{SGW} = Máxima capacidad de almacenamiento en la capa 1

Max_{PGW} = Máxima tasa de percolación para la capa 2

Cur_{SGW2} = Volumen de agua almacenada en la capa 2 al inicio del tiempo t

Max_{SGW2} = Máxima capacidad de almacenamiento en la capa 2

P_{GWP} = Percolación potencial

- **Proceso de generación de escorrentía y flujo base:** la escorrentía corresponde al agua que excede la capacidad de infiltración y sale del almacenamiento de la superficie, este volumen es la escorrentía directa. El flujo base es el volumen de agua subterránea que sale de las capas de acuífero y es calculada de la siguiente forma (U.S. Army Corps of Engineers, 2000):

$$Gwflow_{t+1} = \frac{Act_{SP} + Cur_{SGWi} - P_{GWPi} - \frac{1}{2} Gwflow_t * t}{Rout_{SGWi} + \frac{1}{2} t}$$

Donde:

$Gwflow_t$ y $Gwflow_{t+1}$ = Flujo base en el tiempo t y $t+1$

Act_{SP} = Percolación actual del suelo a la capa de acuífero

P_{GWPi} = Percolación potencial de la capa i

$Rout_{SGWi}$ = Coeficiente de enrutamiento del agua subterránea

t = Intervalo de tiempo de simulación

Cur_{SGWi} = Volumen de agua almacenada en la capa i

$$Gwvolume = \frac{1}{2} (Gwflow_{t+1} + Gwflow) * t$$

3.1.5 MODELO SWAT

El SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) es un modelo semidistribuido por HRU o unidades de respuesta hidrológica, las cuales presentan características homogéneas de cobertura, suelos y pendientes. SWAT realiza simulaciones teniendo en cuenta dos fases:

- **Fase terrestre del ciclo hidrológico**

El modelo realiza el balance hídrico del agua en el suelo en un día, teniendo en cuenta el contenido inicial de agua en el suelo (SW0), la precipitación (Rday), escorrentía (Qsurf), evaporación (Ea), percolación (Wseep), y el flujo de retorno o flujo base (Qgw), el cual se calcula como el caudal lateral (flujo subsuperficial) y el caudal de retorno por aguas subterráneas, de la siguiente forma (Netsch et al., 2011).

$$SWt = SW0 + \sum_{i=1}^t (Rday - Qsurf - Ea - Wseep - Qgw)$$

El modelo incluye el cálculo de la evapotranspiración por medio de la ecuación de Penman-Monteith, adicionalmente tiene en cuenta la infiltración, el almacenamiento en el dosel de los árboles y la acumulación en reservorios. A continuación, se describe como el modelo tiene en cuenta todas las variables anteriormente descritas.

- **Infiltración:** hace referencia a la cantidad de agua que entra directamente a los perfiles del suelo, está determinada por el contenido de humedad inicial del suelo además de la conductividad hidráulica saturada, para calcularla requiere la conductividad hidráulica saturada y la capacidad de retención de agua en el perfil del suelo.
- **Escorrentía superficial:** está relacionada directamente con la infiltración, ya que se asume que el agua que no se infiltra se convierte en escorrentía en la superficie del terreno. Incluye dos modelos, entre esos el número de curva de SCS.
- **Almacenamiento en el dosel de los árboles:** este parámetro hace referencia a la cantidad de agua que no llega al suelo, pues es tomada por superficies vegetales que la retienen para posteriormente ser transpirada a través de las hojas de las plantas, para ello, el modelo utiliza el método de curva numérica, considerando el almacenamiento del dosel dentro de la escorrentía superficial.
- **Evapotranspiración:** el modelo estima la evapotranspiración potencial a través de la ecuación Penman-Monteith. La cual incluye parámetros de densidad latente de flujo, evaporación, radiación neta, densidad del aire, pendiente de la curva de saturación de presión de vapor, calor específico y densidad de flujo de calor.

$$\lambda E = \frac{\Delta * (H_{net} - G) + \rho_{air} * c_p * [e_z^0 - e_z] / r_a}{\Delta + \gamma * (1 + r_c / r_a)}$$

- **Reservorios o estanques:** este parámetro permite que el modelo SWAT incluya los volúmenes de agua que son almacenados dentro de una subcuenca, para su modelación se deben tener en cuenta características como la capacidad del estanque, los afluentes y desagües medidos en escala diaria además de la infiltración y la evaporación. Los estanques afectan la oferta puesto que se genera un almacenamiento de agua que no estará disponible aguas abajo del mismo.
- **Redistribución:** la redistribución del agua ocurre a nivel subterráneo luego de eventos de precipitación o irrigación que dan paso a la entrada del agua al suelo; la redistribución hace referencia al movimiento del agua desde un punto cercano a la superficie del suelo hasta zonas más alejadas, esta depende del contenido de agua en los diferentes perfiles del suelo y se ve afectada por la conductividad saturada del medio y la temperatura.

- **Flujos laterales:** la simulación de los flujos subsuperficial se desarrolla a través de un modelo cinemático de almacenamiento, los flujos laterales están relacionados con la redistribución puesto que ambos procesos se desarrollan por debajo de la superficie del suelo, sin embargo, estos no se producen dentro del mismo perfil, sino que, similar a la escorrentía superficial, se generan de forma horizontal.
- **Flujo base:** los flujos de retorno son calculados por el SWAT con base en el establecimiento de dos sistemas de acuíferos, el primero se relaciona con las corrientes dentro de la cuenca, mientras que el segundo contribuye al flujo de regreso de las corrientes que se encuentran fuera de la cuenca.

- **Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico**

Esta fase considera las perdidas por evaporación mientras el agua fluye dentro de la cuenca y el canal, para su modelación SWAT determina la frecuencia y velocidad del flujo en las HRU a través de la ecuación de Manning, así mismo, emplea el método de transito hidrológico de Muskingum para modelar los volúmenes que son almacenados a lo largo de la longitud del canal.

El modelo SWAT considera que los canales que conforman las cuencas tienen forma trapezoidal, de esta manera simplifica el cálculo de los caudales al requerir como datos de entrada la profundidad de agua en el canal, el ancho del canal y la longitud del cauce principal.

$$q_{ch} = \frac{A_{ch} * R_{ch}^{2/3} * slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

$$v_c = \frac{R_{ch}^{2/3} * slp_{ch}^{1/2}}{n}$$

Donde

A_{ch} = Área transversal del flujo en el canal

q_{ch} = Índice de flujo en el canal

R_{ch} = Radiohidráulico

slp_{ch} = Inclinación longitudinal del canal

n = Coeficiente de Manning

v_c = Velocidad del flujo

A partir del índice de flujo y velocidad, calculado con la ecuación de Manning, se emplea el método de Muskingum para el cálculo de los volúmenes de almacenaje de los cauces, este método desarrolla la simulación al considerar varios segmentos dentro del cauce que se ven afectados por la entrada y salida de agua de cada uno, además del almacenamiento que se dé en los casos en que la entrada de agua sea mayor a la salida.

Este método asume que el área de flujo transversal es directamente proporcional a la descarga de agua para un segmento del cauce, tal como se supone al aplicar la ecuación de Manning. Con base en lo anterior, el volumen de almacenamiento puede ser calculado en función de la descarga en una escala de tiempo, que a su vez es determinada por la proporción del almacenaje, el caudal almacenado en un segmento del cauce es calculado a través de la siguiente ecuación:

$$V_{stored} = K * q_{out} + K * X * (q_{in} - q_{out})$$

Donde

V_{stored} = Volumen almacenado en el segmento

q_{in} = Caudal de entrada al segmento

q_{out} = Caudal de salida o descarga del segmento

K = Tiempo de almacenamiento en el segmento

X = Factor que relaciona importancia relativa del flujo de entrada y salida

3.1.6 MODELO TETIS

TETIS es un modelo físicamente basado y distribuido que representa el ciclo hidrológico a través de cinco tanques que se encuentran perfectamente interconectados (intercepción, almacenamiento estático, superficie, almacenamiento gravitacional, acuífero), el flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos. El balance hídrico representado por los tanques se realiza para cada celda y se presenta en la figura 56 (Universitat Politècnica de Valéncia, 2014).

- **Intercepción:** Representa el agua interceptada por la cubierta vegetal y solo sale de ella por evaporación de las hojas, hasta que no se llene este tanque no se deja pasar agua hacia los siguientes tanques. La cantidad de agua que ingresa a este tanque se calcula de la siguiente forma (Universitat Politècnica de Valéncia, 2014):

$$D_6 = X_1 - X_6$$

$$X_6 = \text{Max}(0, X_1 - \lambda_v * I_{\text{máx}} + H_6)$$

Donde:

D_6 = Cantidad de precipitación que ingresa al tanque de intercepción

X_6 = Lluvia superficial

X_1 = Precipitación directa

$I_{\text{máx}}$ = Alm.máx.tanque de intercepción (depende del tipo de vegetación)

λ_v = Factor de vegetación que modifica el $I_{\text{máx}}$ (un valor por cada mes)

Cantidad de agua actual en el tanque:

$$H_6 = H_6 + X_1 - X_6$$

La evaporación directa que se dan en el tanque de intercepción se calcula como

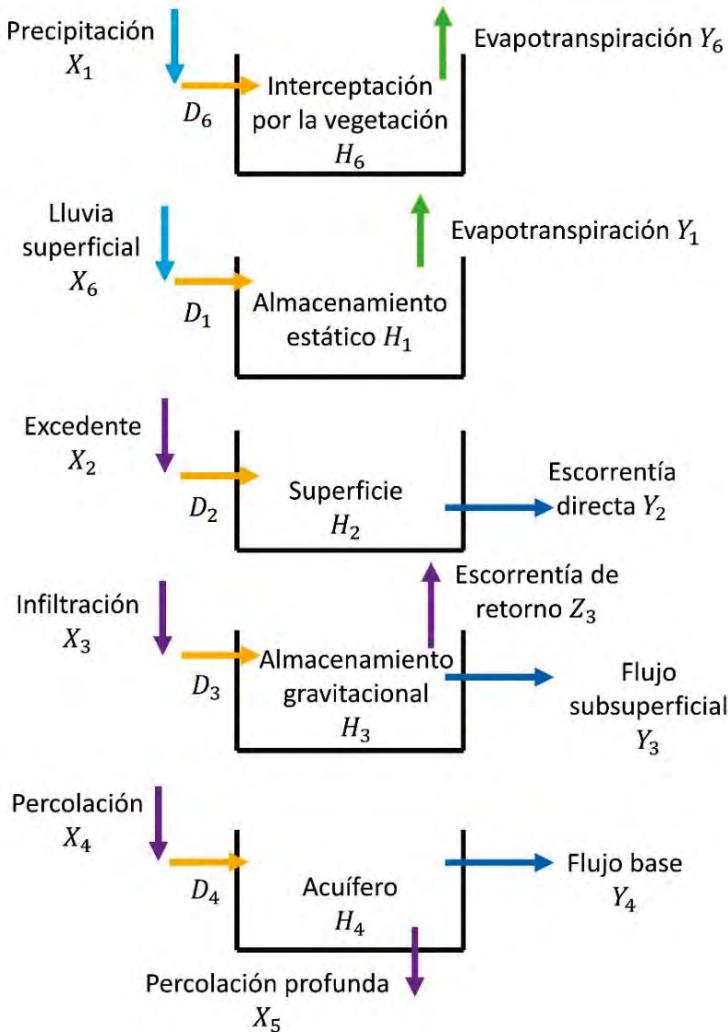
$$Y_6 = \text{Min}(ETP * \lambda_v * FC_2, H_6)$$

Donde

FC_2 = Factor corrector cercano a uno

ETP = Evapotranspiración potencial

Figura 56. Esquema de tanques modelo TETIS



Fuente: adaptado de Universitat Politècnica de València (2014).

- **Almacenamiento estático y evapotranspiración:** este tanque representa el agua que transita por la cuenca y sale de ella por evapotranspiración, no hace parte de la escorrentía (detención de agua en los charcos), esta agua se retiene en el suelo por fuerzas capilares. La cantidad de agua que ingresa a este tanque depende del contenido de humedad, las características del suelo y la lluvia superficial, de la siguiente forma (Universitat Politècnica de València, 2014):

$$D_1 = \text{Min}[(X_6 + Y_0) \left(1 - \frac{H_1}{H_u * FC_1}\right)^{p_1}, H_u * FC_1 - H_1]$$

Donde:

Y_0 = Aporte por fusión de nieve

H_1 = Contenido de agua en el tanque de almacenamiento estático

p_1 = Exponente que determina cuando empieza a haber excedente (X_2)

FC_1 = Factor corrector cercano a\uno

H_u = Capacidad máxima de almacenamiento en el tanque estático

Nota: para un $p_1=0$ significa que para que haya excedente el tanque debe estar lleno, si este exponente es superior a 0, implica que hay excedente antes que el tanque se llene. FC_1 representa la capacidad de almacenamiento estático, para valores superiores a uno significa que incrementa la capacidad de almacenamiento y viceversa, el agua en este tanque no entra en el proceso de infiltración.

La lluvia excedente que pasa a la superficie se expresa como

$$X_2 = \text{Max}(0, X_6 + Y_0 - D_1)$$

La evapotranspiración en este tanque se expresa como

$$Y_1 = \text{Min}((ETP * FC_2 - Y_0) \lambda_v * f(\theta), H_1)$$

Donde:

$f(\theta)$ = Contenido de humedad en función de tres umbrales

Nota: la evapotranspiración potencial debe ser calculada aparte, TETIS no incluye internamente modelos de evapotranspiración, se recomienda calcularla por el método de Penman-Monteith.

- **Almacenamiento superficial y escorrentía directa:** este tanque representa el agua que es susceptible a moverse por la superficie o a infiltrarse al nivel inferior. El flujo que ingresa del tanque superior al tanque de almacenamiento superficial se calcula de la siguiente forma (Universitat Politècnica de Valéncia, 2014):

$$X_3 = \text{Min}(X_2, \Delta t * k_s * FC_3)$$

$$D_2 = X_2 - X_3$$

$$H_2 = H_2 + X_2 - X_3 + Z_3$$

Donde:

X_3 = Infiltración gravitacional

k_s = Capacidad de campo

FC_3 = Factor de corrección por escala espacial y temporal ($\approx 0,2$)

D_2 = Agua que ingresa al tanque de almacenamiento superficial

H_2 = Almacenamiento en el tanque superficial

Z_3 = Escorrentía de retorno del tanque gravitacional

Nota: un aumento en el FC_3 indica que se aumenta la conductividad hidráulica del suelo o la velocidad de infiltración, por lo que una mayor parte del flujo se infiltra a estratos más profundos.

La escorrentía directa que transita por las laderas se estima teniendo en cuenta la velocidad con la cual transita por el terreno, de la siguiente forma:

$$Y_2 = H_2 * \alpha_1$$

$$\alpha_1 = 1 - \frac{\Delta x}{v_t * FC_4 * \Delta t + \Delta x}$$

$$v_t = 1,4141 * S_o^{0,5}$$

Donde:

α_1 = Coeficiente de descarga de escorrentía directa

v_t = Vel. del flujo (se puede asumir entre 0,01 - 1 m/s o calcularla con S_o)

S_o = Pendiente

FC_4 = Factor de corrección puede variar entre 0,01-10

- **Almacenamiento gravitacional y flujo subsuperficial:** el almacenamiento gravitación se entiende como el agua almacenada en el suelo, una parte de esta pasa al acuífero por percolación, otra se convierte en flujo subsuperficial y otra puede convertirse en escorrentía de retorno. El flujo subsuperficial es aquel que fluye de forma horizontal a través de las laderas y se va concentrando en pequeñas grietas o conductos en una capa delgada de suelo (es aquel que produce los deslizamientos) hasta que sale a la red de drenaje. El flujo de escorrentía de retorno se produce cuando el almacenamiento del suelo supera su máxima capacidad.

$$X_4 = \text{Min}(X_3, \Delta t * k_p * FC_5)$$

$$D_3 = X_3 - X_4$$

$$H_3 = \text{Min}(H_3 + X_3 - X_4, H_{3máx})$$

$$Z_3 = \text{Max}(0, H_3 + X_3 - X_4 - H_{3máx})$$

Donde:

D_3 = Cantidad de agua que ingresa al tanque de alm.gravitacional

X_4 = Percolación

k_p = Capacidad de percolación- Conductividad hidráulica

FC_4 = Factor de corrección ($\approx 0,2$)

H_3 = Almacenamiento en el tanque gravitacional

$H_{3máx}$ = Máxima capacidad de almacenamiento en el tanque gravitacional

Z_3 = Escorrentía de retorno

El flujo subsuperficial se expresa en términos no solo de volumen, sino que tiene en cuenta el tránsito dentro del suelo, de la siguiente forma:

$$Y_3 = H_3 * \alpha_2$$

$$\alpha_2 = 1 - \frac{\Delta x}{FC_6 * k_{ss} * \Delta t + \Delta x}$$

Donde:

FC_6 = Corrector de la conductividad hidráulica saturada (0,001-100000)

k_{ss} = Conductividad hidráulica saturada

- **Almacenamiento subterráneo y flujo base:** este corresponde al almacenamiento en el acuífero, de allí sale el flujo base que va a retornar al cauce y la percolación profunda, la cual se considera pérdidas del sistema. Esta percolación profunda puede ser estimada de la siguiente forma, aunque se puede asumir como 0:

$$X_5 = \text{Min}(X_4, \Delta t * k_{ps} * FC_6)$$

$$D_4 = X_4 - X_5$$

Donde:

X_5 = Percolación profunda

k_{ps} = Velocidad de percolación en la zona profunda del suelo

D_4 = Agua que ingresa al almacenamiento subterráneo

El flujo base se expresa igualmente con base en la conductividad hidráulica o velocidad con la cual el agua se mueve en el subsuelo de la siguiente forma:

$$Y_4 = H_4 * \alpha_3$$

$$\alpha_3 = 1 - \frac{\Delta x}{FC_8 * k_{sa} * \Delta t + \Delta x}$$

Donde:

Y_4 = Flujo base

α_3 = Coeficiente de descarga de agua subterránea (flujo base)

k_{sa} = Conductividad hidráulica horizontal saturada del substrato

FC_8 = Factor de corrección (0,001-100000)

3.1.7 COMPARACIÓN DE MODELOS HIDROLÓGICOS

A continuación, se presenta una breve comparación entre los modelos hidrológicos descritos anteriormente y algunos otros modelos que pueden ser evaluados para su uso en este tipo de análisis.

Tabla 31. Comparación de modelos hidrológicos

Modelo	Clasificación por variabilidad espacial	Clasificación por grado cognoscitivo	Interfaz	Características generales
TOPMO-DEL	Semidistribuido por índice topográfico de humedad	Físicamente basado	Fortran/R	Modela explícitamente las interacciones entre el agua superficial, subsuperficial y subterránea. Realiza balance hídrico en el suelo y depende del índice topográfico de humedad (Tarboton, 2003).
HEC-HMS	Semidistribuido por subcuencas	Físicamente basado	Propia	Diseñado para modelar procesos en cuencas dendríticas, puede modelar tránsito de crecientes y tiempo continuo. El modelo de tiempo continuo se basa en un modelo de tanques (SMA) (U.S. Army Corps of Engineers, 2000).
SWAT	Semidistribuido por unidades de respuesta hidrológica	Físicamente basado	GIS	Desarrollado para predecir el impacto de las prácticas de manejo del suelo en la generación de agua, sedimentos y sustancias químicas agrícolas en cuencas complejas. Incluye el modelo del número de curva, más un balance hídrico completo en el suelo (Netsch et al., 2011).

Modelo	Clasificación por variabilidad espacial	Clasificación por grado cognoscitivo	Interfaz	Características generales
TETIS	Distribuido por celdas rectangulares	Físicamente basado	Propia	Obtención de resultados en cualquier punto de la cuenca, mejor representación de la variabilidad espacial. Puede modelar intervalos de tiempo de
GR4J	Agregado	Conceptual	Propia - RS-MINERVE	Es un modelo agregado, aunque puede convertirse en semidistribuido si se modelan varias subcuenca interconectadas. Realiza un balance hídrico simple incluyendo únicamente 4 parámetros: máxima capacidad en el tanque de producción, coeficiente de intercambio de aguas subterráneas, capacidad máxima de tránsito en canales y tiempo base del hidrograma UH1 (Carvajal y Roldán, 2006).

Modelo	Clasificación por variabilidad espacial	Clasificación por grado cognoscitivo	Interfaz	Características generales
MIKE SHE	Semidistribuido	Físicamente basado	Propia	Utiliza MIKE Hydro River para simular el flujo en el canal. Incluye la ecuación de Richards para la infiltración y la ecuación de Darcy para el flujo subterráneo, adicionalmente realiza modelación de onda difusiva para la escorrentía superficial (DHI, 2017).
TOPKAPI	Distribuido por celdas cuadradas	Físicamente basado	GIS	TOPographic Kinematic APproximation and Integration tiene en cuenta ecuaciones de onda cinemática en combinación con la topografía, se le asignan valores de parámetros físicos a cada celda y se genera movimiento en las celdas con un esquema de diferencias finitas (Todini y Mazzetti, 2008).
USGS-PR-MS-IV	Semidistribuido por HRU	Físicamente basado	Fortran	El ciclo hidrológico es simulado mediante 17 procesos y 39 módulos (Markstrom et al., 2015)

Fuente: elaboración propia.

3.2 EJEMPLO MODELACIÓN HIDROLÓGICA – QUEBRADA LA NEGRA, ÚTICA, CUNDINAMARCA

3.3 DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO – EJEMPLO

La quebrada La Negra se encuentra ubicada en los municipios de Útica (cuenca baja) y Quebradanegra (cuenca Alta), Cundinamarca, nace en el Alto el Palmar en el límite entre los municipios de Villeta y Quebradanegra con el nombre de quebrada El Naranjal; su cuenca se encuentra entre las cotas 2 065 y 497 m.s.n.m. El municipio de Útica se encuentra en la margen derecha de la quebrada La Negra en la desembocadura de esta con el río Negro (Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química y Universidad Nacional de Colombia, 2009).

En la cuenca se han generado consistentemente procesos de deforestación lo que ha aumentado la detonación de deslizamientos los cuales ya son comunes debido a la inestabilidad intrínseca de los materiales geológicos, los cuales se componen principalmente de limos y arcillas. Esto, sumado a las altas pendientes y constantes lluvias, ha detonado varios eventos de avenida torrencial que han afectado el casco urbano del municipio de Útica.

El caso de estudio de ejemplo, para el cual se realizó la modelación y calibración de los modelos, fue el del 17 de noviembre de 1988, evento de avenida torrencial que afectó el área urbana del municipio de Útica, Cundinamarca ocasionando la pérdida de 3 vidas humanas, inundaciones, daños en el puente del ferrocarril, el cementerio y otras instalaciones de la población.

Se identificó que durante los 30 días previos al evento cayeron en la cuenca 470 mm de precipitación, valor de lluvia estimada con período de retorno de 50 años. Estas fuertes lluvias generaron el represamiento de la quebrada La Papaya, afluente de la quebrada La Negra, esta presa natural se rompió generando un flujo de lodos que se sumó al flujo generado por múltiples deslizamientos en la cuenca alta de la quebrada La Negra. Este flujo de lodos provocó la inundación del municipio de Útica con profundidades de 0,2 – 1,5 m y el arrastre de bloques de roca de gran tamaño (Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química y Universidad Nacional de Colombia, 2009).

Este ejemplo de modelación fue tomado de una de las autoras del presente libro y puede encontrarlo en detalle en (Páez, 2016); aunque presenta algunas pequeñas diferencias con la metodología expuesta aquí de forma general sigue los mismos pasos metodológicos propuestos en este documento. En la figura 57 se presenta la imagen satelital con los principales afluentes de la quebrada La Negra, mientras que en la figura 58 se presentan cada una de las subcuenca en las cuales fue dividida la cuenca.

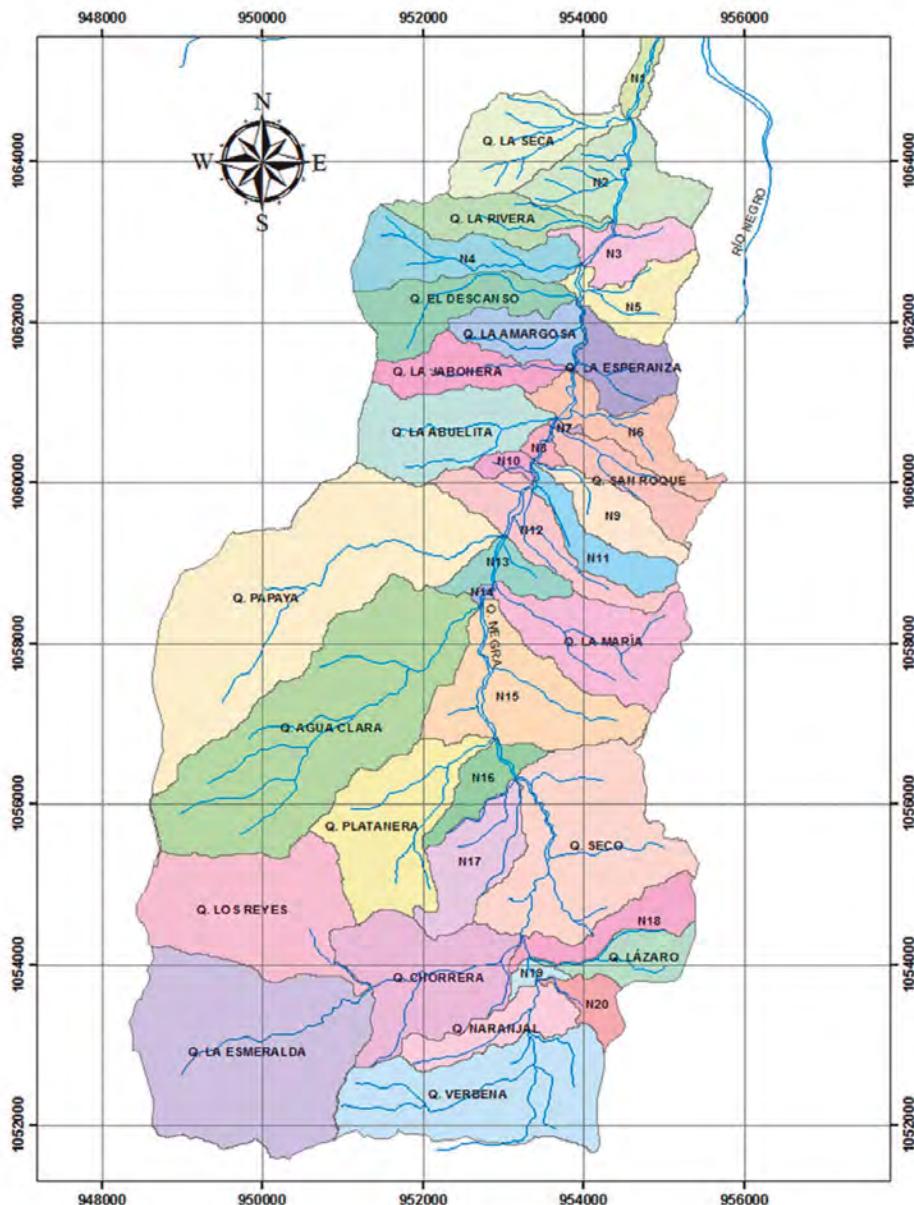
En la cuenca se han generado consistentemente procesos de deforestación lo que ha aumentado la detonación de deslizamientos los cuales ya son comunes debido a la inestabilidad intrínseca de los materiales geológicos, los cuales se componen principalmente de limos y arcillas. Esto, sumado a las altas pendientes y constantes lluvias, ha detonado varios eventos de avenida torrencial que han afectado el casco urbano del municipio de Útica.

Figura 57. Principales drenajes quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

Figura 58. Subcuencas quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

3.2.2 IMPLEMENTACIÓN TOPMODEL QUEBRADA LA NEGRA, ÚTICA, CUNDINAMARCA

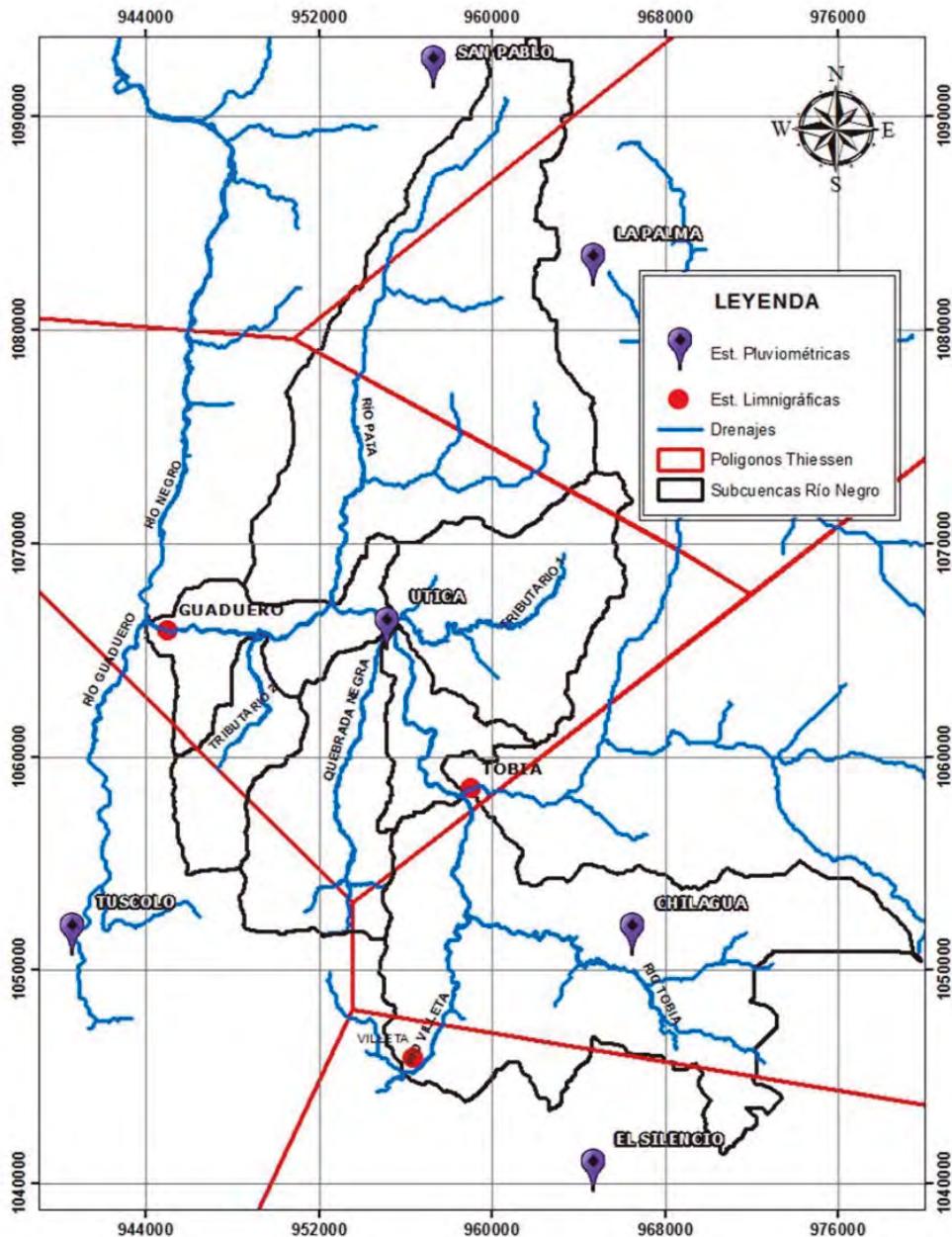
El modelo hidrológico implementado en este caso de estudio corresponde al TOPMODEL, a continuación, se describe la implementación de este.

- **Análisis de precipitación**

Para el análisis de precipitación se utilizaron 3 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Negro y subcuenca de la quebrada La Negra. Se realizaron polígonos de Thiessen (ver figura 59) para determinar el área aferente a cada una de las estaciones, estas cuentan con información diaria (Páez, 2016).

Para el análisis de precipitación se utilizaron 3 estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Negro y subcuenca de la quebrada La Negra

Figura 59. Polígonos de Thiessen subcuenca río Negro



Fuente: Páez (2016).

- **Análisis de la evaporación**

Debido a que no se contaba con información climatológica para calcular la evapotranspiración se realizó una aproximación con la evaporación del tanque de la estación más cercana a la cuenca La Esperanza (23025020). La evaporación del tanque fue corregida con los coeficientes de la FAO (ver tabla 32) teniendo en cuenta que la humedad relativa promedio de la zona del 75,1 % y de acuerdo con el *Atlas de viento de Colombia* es de 1,5 – 2 m/s (Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales [IDEAM] y Unidad de Planeación Minero Energética [UPME], 2006).

$$Ev_{QN} = Ev_{es} * C$$

Donde:

Ev_{QN} = Evaporación diaria en la cuenca de la quebrada La Negra

Ev_{es} = Evaporación diaria en la estación La Esperanza

C = Coeficiente del tanque evaporímetro

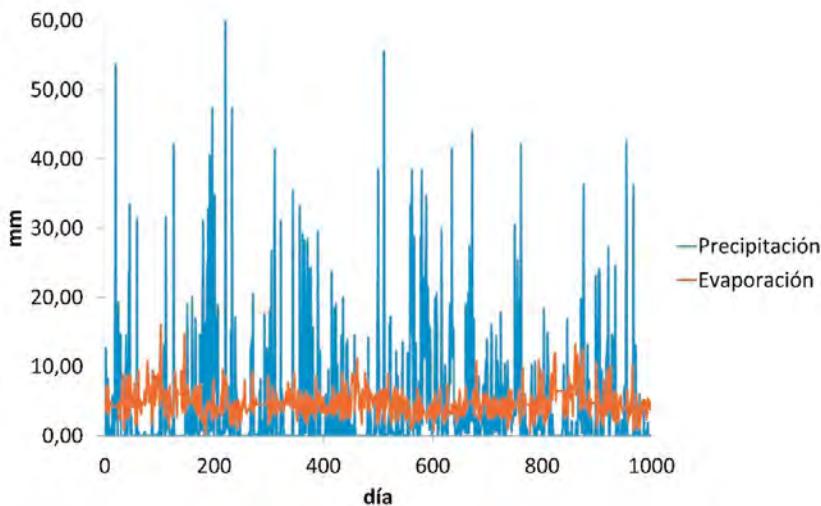
Tabla 32. Coeficiente del tanque evaporímetro tipo A

HR media		Baja <40%	Media 40 %-70 %	Alta > 70 %
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)			
Baja < 2	1	0,55	0,65	0,75
	10	0,65	0,75	0,85
	100	0,7	0,8	0,85
	1000	0,75	0,85	0,85

HR media			Media	
		Baja <40%	40 %-70 %	Alta > 70 %
Velocidad del viento (m/s)	Distancia del cultivo a barlovento (m)			
	1	0,5	0,6	0,65
	10	0,6	0,7	0,75
	100	0,65	0,75	0,8
Moderada 2 - 5	1000	0,7	0,8	0,8
	1	0,45	0,5	0,6
	10	0,55	0,6	0,65
	100	0,6	0,65	0,7
Alta 5 - 8	1000	0,65	0,7	0,75
	1	0,4	0,45	0,5
	10	0,45	0,55	0,6
	100	0,5	0,6	0,65
Muy alta > 8	1000	0,55	0,6	0,65

Fuente: Allen et al. (2006).

Figura 60. Precipitación y evaporación cuenca quebrada La Negra (8 de abril de 1987 – 31 de diciembre de 1989)



Fuente: Páez (2016).

- **Caudales para calibración**

Debido a que para la fecha del evento no se contaba con información de caudales o niveles medidos, fue necesario calcular un caudal aproximado con base en la diferencia de caudales medidos en 2 estaciones sobre el río Negro, aguas arriba Tobia (2306706) y aguas abajo Guaduero (2306705) y teniendo en cuenta las áreas de los drenajes tributarios al río Negro en ese tramo, de acuerdo con lo siguiente (Páez, 2016):

$$Q_G - Q_T = Q_v + Q_n + Q_{t1} + Q_p + Q_{t2}$$

Donde:

Q_G = Caudal estación Guaduero

Q_T = Caudal estación Tobia

Q_v = Caudal río Villeta

Q_n = Caudal quebrada La Negra

Q_{t1} = Caudal tributario 1

Q_p = Caudal río Patá

Q_{t2} = Caudal tributario 2

Ya que no se cuenta con caudales medidos para cada uno de los tributarios, se asignó un porcentaje del caudal del tramo ($Q_G - Q_T$) de acuerdo con la precipitación de cada una de las subcuenca y su escorrentía potencial de acuerdo con la siguiente fórmula, obteniendo los caudales que se presentan en la figura 61.

$$C_n = \frac{V_n}{\sum V_i} * 100$$

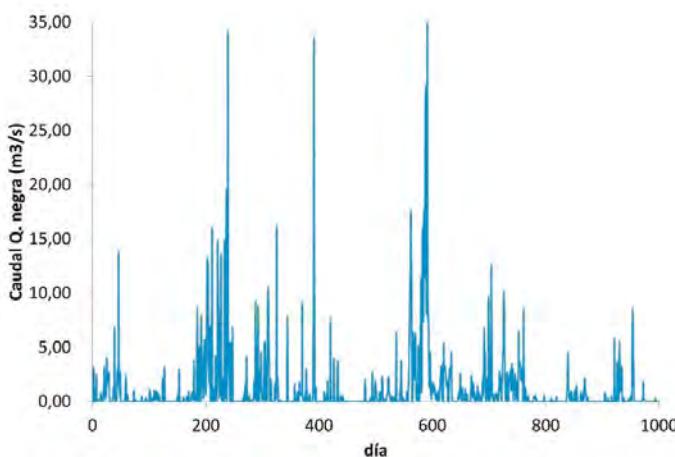
Donde:

C_n = Porcentaje del caudal del tramo ($Q_G - Q_T$) correspondiente a la Q. La Negra

V_n = Volúmen de precipitación diaria Q. La Negra

V_i = Volumen de precipitación diaria en cada una de las subcuenca del tramo

Figura 61. Caudales estimados para calibración quebrada La Negra (8 de abril de 1987 – 31 de diciembre de 1989)



Fuente: Páez (2016).

- **Cálculo del índice topográfico de humedad**

El índice topográfico de humedad fue calculado por medio de la siguiente expresión:

$$ITH = \ln\left(\frac{a}{\tan \beta}\right) \text{ (Ec. 32)}$$

Donde:

ITH = Índice topográfico de humedad

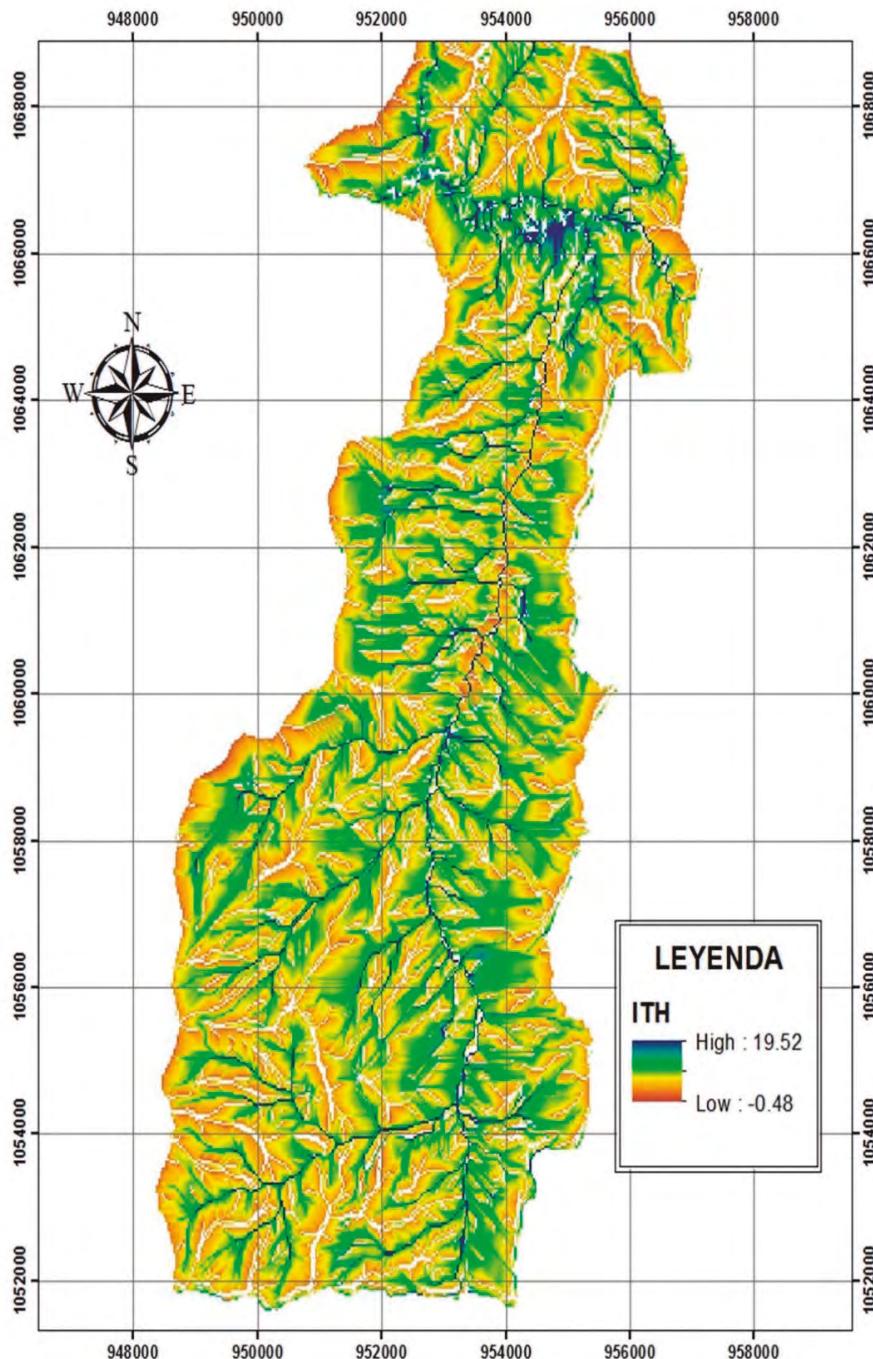
a = Área local que drena a cada punto de cálculo (acumulación del flujo)

β = Ángulo de inclinación del terreno

En la figura 62 se presenta el mapa del índice topográfico de humedad para la cuenca de la quebrada La Negra, un valor alto del ITH indica zonas de mayor concentración de escurrimiento y por tanto más propensas a la saturación.

En la figura 62 se presenta el mapa del índice topográfico de humedad para la cuenca de la quebrada La Negra, un valor alto del ITH indica zonas de mayor concentración de escurrimiento y por tanto más propensas a la saturación

Figura 62. Índice topográfico de humedad quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

- **Calibración del modelo**

Para la calibración del TOPMODEL en primer lugar se tuvo en cuenta el caudal base de la quebrada, para lo cual se utilizaron 4 aforos con trazadores sobre la quebrada La Negra realizados el 26 de julio de 2006 en época muy seca por el Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química (INGEOMINAS), dando como resultado un caudal base aproximado de 178,7 L/s.

La calibración del modelo se realizó por medio de simulaciones de Monte-Carlo, dando valores aleatorios a los parámetros del modelo en los rangos iniciales sugeridos por Beven y Kirkby (1979) y posteriormente teniendo en cuenta los resultados de una primera calibración se modificaron los rangos con el fin de obtener una calibración más satisfactoria (Páez, 2016).

Tabla 33. *Rangos de calibración parámetros TOPMODEL*

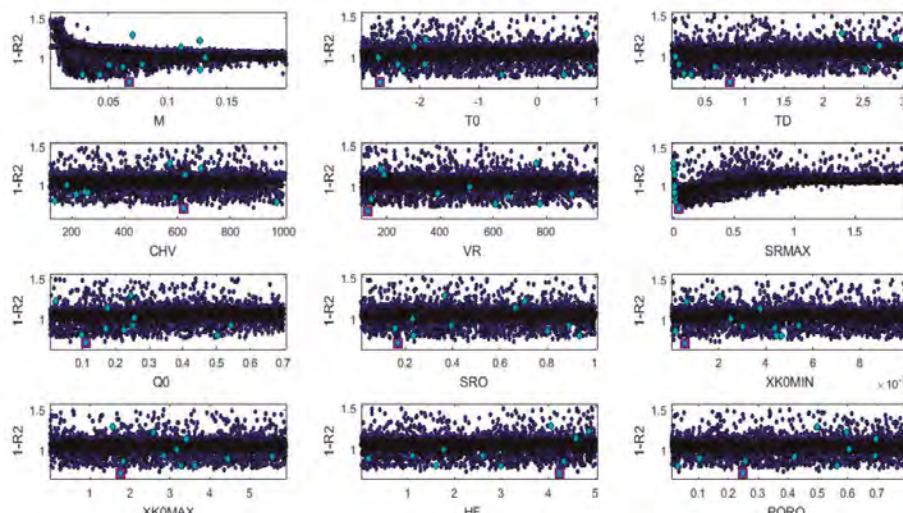
Parámetro	Rango inicial	Rango modificado
m (m/m)	0,0001 – 0,2	0,0001 – 0,15
T_0 ($\ln(m^2/h)$)	-2 – 1,0	-3 – 1,0
SR_{\max} (m)	0,1 – 3,0	0,0005 – 1,0
SR_o (m)	0,01 – 2,0	0,01 – 1,0
CHV (m/h)	100 - 2500	100 - 1000
VR (m/h)	100 - 2500	100 - 1000
T_d (h/m)	0,01 – 3,0	0,005 – 3,0
Q_o (m/día)	0,001 – 1,0	0,001 – 0,7
$d\theta(-)$	0 – 5,0	0 – 5,0

Parámetro	Rango inicial	Rango modificado
XKmín (m/h)	0 – 0,01	0 – 0,01
XKmáx (m/h)	0,1 – 5,0	0,1 – 6,0
Poro (-)	0,01 – 0,6	0,01 – 0,8

Fuente: Beven y Kirkby (1979).

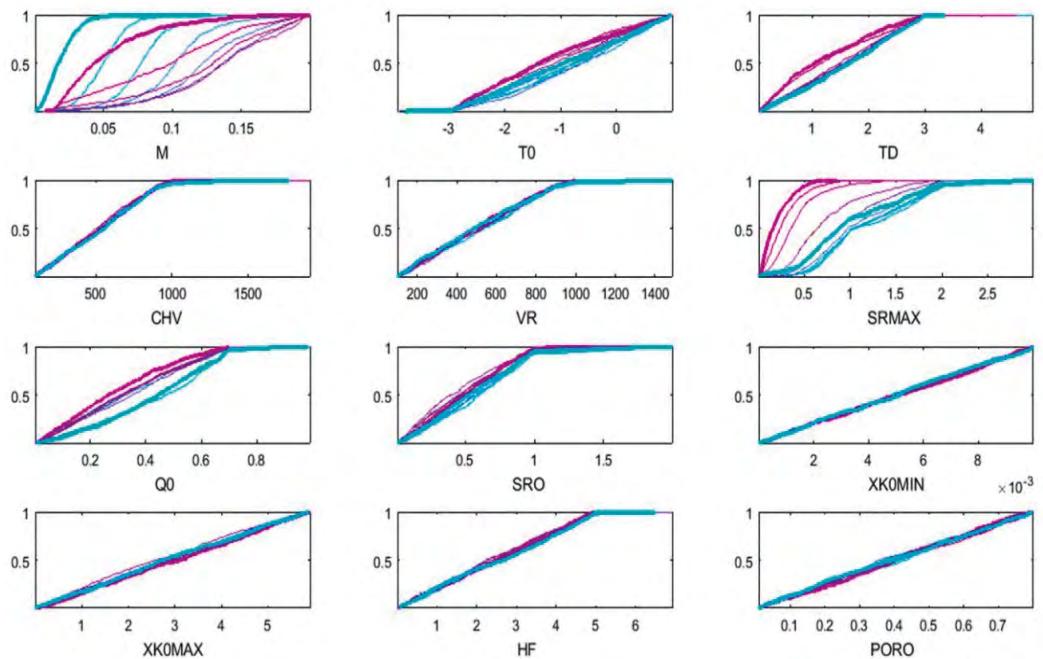
Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros por medio de la metodología GLU, el cual se presenta en la figura 63, donde los puntos azul claro corresponden a las 10 mejores simulaciones para cada parámetro. Adicionalmente, en la figura 64 se presenta la sensibilidad de los parámetros, donde se observa que la mayoría de los parámetros son poco identificables y tienen valores óptimos en todo el rango de calibración. Sin embargo, el parámetro m es bastante identificable con valores óptimos entre 0,025 y 0,05 y SRMAX el cual tiene valores óptimos que tienen a cero, además se observa que es posible que exista algo de interacción paramétrica entre T_0 y M ; debido a que T_0 es poco identificable para valores óptimos de m puede no resultar en simulaciones satisfactorias. Los parámetros CHV, VR, XK0MIN, XK0MAX, HF y PORO son completamente insensibles, por lo cual cualquier valor dentro del rango de calibración podría dar tanto buenos como malos coeficientes de Nash (Páez, 2016).

Figura 63. Ajuste a la función objetivo para cada parámetro TOPMODEL



Fuente: Páez (2016).

Figura 64. Sensibilidad regional de los parámetros TOPMODEL



Fuente: Páez (2016).

Finalmente, en la tabla 34 se presentan los resultados de escorrentía directa $q(it)$, caudal subsuperficial q y caudal por exceso de saturación para las 5 mejores corridas del TOPMODEL para el día del evento de avenida torrencial analizado.

Tabla 34. Resultados 17 de noviembre de 1988 para las 5 mejores simulaciones

Coef. Nash	$q(i)$ (m/día)	qof (m/día)	q (m/día)
0,304	1,31E-02	5,77E-03	3,71E-03
0,258	1,62E-02	2,93E-03	5,10E-03
0,275	1,36E-02	5,77E-03	2,87E-03

Coef. Nash	q(i) (m/día)	qof (m/día)	q (m/día)
0,287	1,64E-02	5,77E-03	5,39E-03
0,286	1,48E-02	5,77E-03	4,65E-03
Promedio	1,48E-02	5,20E-03	4,34E-03

Fuente: Páez (2016).

3.3 MODELACIÓN DE MECANISMOS DETONANTES – DESLIZAMIENTOS GENERADOS POR LLUVIAS

Como se mencionó en el primer numeral del presente documento las causas de las avenidas torrenciales son múltiples, sin embargo, la más común de ellas son los deslizamientos generados por lluvias. Es importante recalcar que el detonante no es únicamente una lluvia de altísima intensidad, sino que lluvias de moderada a alta intensidad que se presentan durante varios días generan saturación del suelo e inestabilidad del terreno, cuando se genera una lluvia muy intensa se detona el evento provocando deslizamientos de tierra y transporte de este por el cauce a altas velocidades; por lo cual la modelación de los deslizamientos debe realizarse para la lluvia antecedente, mientras que la modelación de la propagación de la avenida se realiza para la lluvia detonante del evento.

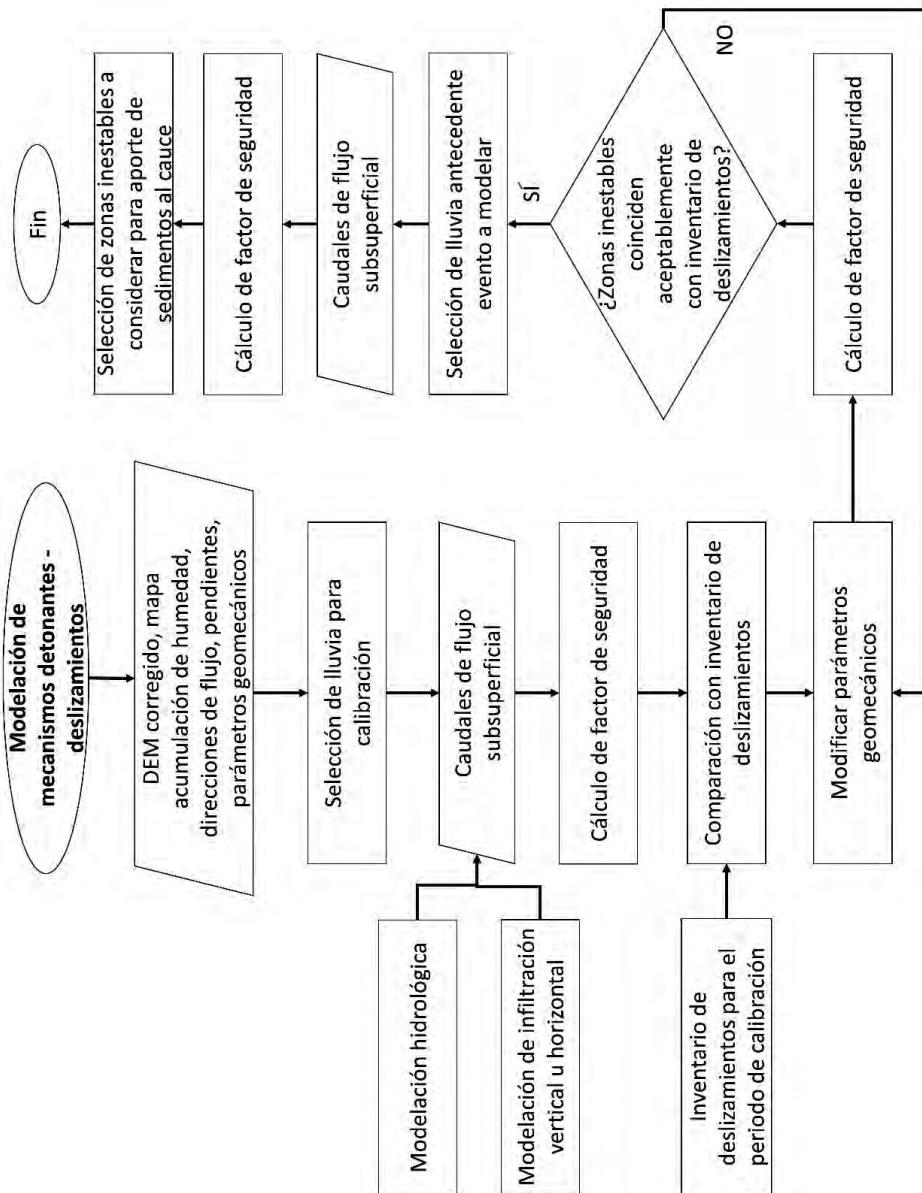
Existen diversas aproximaciones para la modelación de estabilidad de taludes, unas más complejas que otras, la mayoría de los modelos tienen en cuenta una aproximación al flujo de agua en el suelo, modelando el flujo de forma horizontal, mientras que otros modelos más complejos realizan la modelación de flujo vertical, la selección del modelo dependerá de la cantidad de información disponible y del propósito del estudio. La limitante de estos modelos es que permiten calcular las áreas inestables mas no la probabilidad de ocurrencia, lo cual sería necesario para un análisis completo de amenaza, sin embargo, estas áreas inestables pueden ser tomadas como las que aportan sedimentos para realizar la propagación de la avenida torrencial.

Algunos modelos como el SHALSTAB producen resultados menos detallados, sin embargo, si se tiene un buen inventario de deslizamientos y se calibra adecuadamente el modelo puede ser una herramienta útil y de bajo costo, en combinación con modelos cualitativos de propagación. Mientras que si se quiere realizar un análisis muy detallado se puede utilizar el modelo TRIGRS del USGS, el cual utiliza el modelo de Richards para el cálculo de la infiltración vertical. Ahora bien, en el presente documento se expone un punto intermedio con un buen nivel de detalle correspondiente al modelo de taludes infinitos, con el cual es posible calcular el factor de seguridad.

En la figura 65 se presenta el diagrama de flujo del proceso general para desarrollar una modelación de estabilidad de taludes mediante modelos cuantitativos (taludes infinitos o TRIGRS, entre otros).

Existen diversas aproximaciones para la modelación de estabilidad de taludes, unas más complejas que otras, la mayoría de los modelos tienen en cuenta una aproximación al flujo de agua en el suelo, modelando el flujo de forma horizontal, mientras que otros modelos más complejos realizan la modelación de flujo vertical, la selección del modelo dependerá de la cantidad de información disponible y del propósito del estudio.

Figura 65. Modelación de mecanismos detonantes - deslizamientos generados por lluvia



Fuente: elaboración propia.

- La susceptibilidad se determina con la modelación de los factores detonantes, mientras que la amenaza se determina con la modelación hidráulica de propagación de la avenida.
- Como se mencionó en apartados anteriores si se tiene un modelo hidrológico que calcule explícitamente los caudales de flujo subsuperficial pueden utilizarse estos caudales para la modelación de deslizamientos, en caso contrario se puede recurrir a modelos simplificados de infiltración o en algunos casos el modelo de deslizamientos incluye el modelo de infiltración; como es el caso del modelo TRIGRS que incluye el modelo de Richards de infiltración vertical.
- La calibración del modelo de deslizamientos puede realizarse tanto para el evento de estudio (evento de calibración del modelo conjunto de avenidas torrenciales) si se tiene información suficiente de inventario de deslizamientos de meses antecedentes, como para un periodo de tiempo seleccionado con buena información de inventario de deslizamientos o para la condición media de lluvia; aclarando que este último escenario va a generar una alta incertidumbre, ya que el inventario de deslizamientos que se utilice será el provocado para múltiples condiciones hidrológicas y no necesariamente para la condición media.
- Los modelos de deslizamientos incluyen parámetros geomecánicos que son objeto de calibración, como lo son la cohesión, el ángulo de fricción interna y la densidad del suelo, los cuales dependen del suelo deslizado, aquí se debe tener en cuenta que no solo depende de la geología sino también de los suelos superficiales ya que esta última capa es la que va a deslizarse en mayor o menor medida.
- Es importante considerar que estos modelos incluyen parámetros de movimiento del agua en el suelo, como la transmisividad hidráulica o la conductividad hidráulica, por lo cual es importante tener mediciones en campo de estos parámetros, así como de los parámetros geomecánicos, así podría evitarse el paso de calibración o en su defecto lograr una calibración más satisfactoria.
- Una vez simulado el evento de lluvia seleccionado es necesario considerar las zonas con factores de seguridad inferiores a 1, es posible tomar todas estas zonas para simular la peor condición posible, sin embargo, de las zonas inestables se debe evaluar cuáles realmente podrían aportar sedimentos al cauce de acuerdo con la cercanía a este y a sus afluentes.

A continuación, se presentan los fundamentos teóricos de algunos modelos de estabilidad de taludes que pueden ser utilizados para el análisis de avenidas torrenciales.

3.3.1 MODELO SHALSTAB

Este es un modelo simple que puede utilizarse si se tiene poca información, sin embargo, si se utiliza este modelo se debe así mismo utilizar un modelo cualitativo de propagación, ya que no genera suficiente información para utilizar un modelo cuantitativo de propagación como FLO2D, FLATModel o RIVERFLOW2D, a menos que se tenga un muy buen inventario de deslizamientos con el cual pueda ser óptimamente calibrado el modelo (Bateman y Medina, 2019).

El modelo SHALSTAB se basa en la ley de falla de Mohr-Coulomb, en la cual el esfuerzo cortante necesario para que el talud falle es igual a la resistencia generada por la cohesión del suelo y la resistencia a la fricción debido a la tensión normal. De acuerdo con lo anterior, el modelo asume que la resistencia a lo largo de los lados y los extremos no es significativa.

Otra simplificación del modelo es que puede asumir la cohesión como cero o con un valor constante espacialmente, de esta forma es posible realizar el análisis para zonas extensas de forma muy rápida. Existen otras versiones del modelo en las cuales es posible variar la profundidad y cohesión del suelo espacialmente y la conductividad hidráulica verticalmente. De acuerdo con lo anterior, la expresión que utiliza el modelo corresponde a la siguiente y puede ser simplificada de acuerdo con el comportamiento de los parámetros de cohesión, profundidad y transmisividad hidráulica (Dietrich y Montgomery, 1998).

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin \theta}{\frac{a}{b}} \left(\left(\frac{C}{\rho_w g z \cos^2 \alpha \tan \phi} \right) + \left(\frac{\rho_s}{\rho_w} \right) \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right) \right)$$

Donde:

q = Flujo subsuperficie (m/día)

T = Transmisividad\ hidráulica del suelo (m²/día)

α = Pendiente

a/b = Área de drenaje acumulada por unidad de ancho de flujo (m)

C = Cohesión del suelo (Pa)

ϕ = Ángulo de fricción interna

P_s = Densidad del suelo

P_w = Densidad del agua

z = Espesor del suelo (m)

Conforme a lo anterior, el modelo no calcula directamente el factor de seguridad sino la saturación necesaria para que el suelo falle, a partir de los valores de esta relación q/T se genera una clasificación de estabilidad de acuerdo con lo presentado en la tabla 35, teniendo en cuenta que incondicionalmente estable implica que ninguna tormenta puede causar que falle y por otro lado incondicionalmente inestable indica que la zona es inestable incluso estando completamente seco, en ambos casos podría tratarse de afloramientos rocosos (Dietrich y Montgomery, 1998).

Tabla 35. Clasificación de estabilidad en el modelo SHALSTAB

Clasificación de estabilidad	Condición
Incondicionalmente estable, saturado	$\tan \alpha \tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right)$ $\frac{a}{b} > \frac{T}{q} \sin \alpha$
Incondicionalmente estable, no saturado	$\tan \alpha \tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right)$ $\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \alpha$
Inestable, saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi} \right) \left(\frac{T}{q} \right) \sin \alpha$ $\frac{a}{b} > \frac{T}{q} \sin \alpha$ $\tan \phi > \tan \alpha \tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s} \right)$

Clasificación de estabilidad	Condición
Inestable, no saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) \left(\frac{T}{q}\right) \sin \alpha$ $\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \alpha$ $\tan \phi > \tan \alpha \tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$
Estable, no saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \alpha}{\tan \phi}\right) \left(\frac{T}{q}\right) \sin \alpha$ $\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \alpha$ $\tan \phi > \tan \alpha \tan \phi \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right)$
Incondicionalmente inestable, saturado	$\tan \phi > \tan \alpha$ $\frac{a}{b} > \frac{T}{q} \sin \alpha$
Incondicionalmente inestable, no saturado	$\tan \phi > \tan \alpha$ $\frac{a}{b} < \frac{T}{q} \sin \alpha$

Fuente: Dietrich y Montgomery (1998).

La susceptibilidad en términos del $\log(q/T)$ puede ser clasificada de acuerdo con lo presentado en la tabla 36.

Tabla 36. Clasificación de la susceptibilidad con modelo SHALSTAB

Susceptibilidad	Log (q/T)
Alta	<-2,9
Media	<-2,4 y > -2,9
Baja	≥-2,4

Fuente: Bateman y Medina (2019).

3.3.2 MODELO DE TALUDES INFINITOS

El modelo de taludes infinitos es válido para suelo granular y condiciones iniciales de suelo seco, combina el mecanismo de falla de Mohr-Coulomb con el flujo horizontal de estado estable tomando en cuenta el área de drenaje acumulada y la pendiente local (Beven y Kirkby, 1979). El modelo permite calcular el factor de seguridad de acuerdo con la siguiente expresión:

$$FS = \frac{C_r + C_s + \cos^2\theta[\rho_s g(z - D_w) + (\rho_s g - \rho_w g)D_w]\tan\phi}{z\rho_s g \sin\theta \cos\theta}$$

Donde:

$$C_r = \text{Cohesión de las raíces} \left(\frac{N}{m^2} \right)$$

$$C_s = \text{Cohesión del suelo (N/m}^2\text{)}$$

$$\Theta = \text{Ángulo de inclinación del terreno (pendiente)}$$

$$P_s = \text{Densidad del suelo húmedo (kg/m}^3\text{)}$$

$$P_w = \text{Densidad del agua (kg/m}^3\text{)}$$

$$z = \text{Profundidad vertical del suelo}$$

$$D_w = \text{Altura de la tabla de agua}$$

$$\phi = \text{Ángulo de fricción interna}$$

Sin embargo, como los modelos hidrológicos proporcionan valores de caudal de flujo subsuperficial y no de tabla de agua directamente, la expresión puede simplificarse para que quede en términos del flujo subsuperficial de acuerdo con lo siguiente:

$$h = z \cos\theta$$

$$w = \frac{D_w}{z} = \frac{h_w}{h}$$

$$C = \frac{C_r + C_s}{h \rho_s g}$$

$$FS = \frac{C + \cos \theta [1 - wr] \tan \phi}{\sin \theta}$$

Donde:

h = Profundidad en el sentido de la pendiente (**m**)

$r = P_w / P_s$ **i** densidad relativa

El flujo subsuperficial “ q ” por unidad de longitud (**m^2/h**) corresponde a:

$$q = R * a$$

$$a = \frac{A}{b} = \frac{\text{Área contribuyente (m}^2\text{)}}{\text{ancho del área contribuyente (m)}} = \frac{m^2}{m}$$

Asumiendo que la transmisividad hidráulica es constante y homogénea y no decrece con la profundidad, se tiene la siguiente expresión para **w** .

$$w = \text{Min} \left(\frac{R * a}{T \sin \theta}, 1 \right)$$

El modelo arroja diferentes condiciones de estabilidad de acuerdo con el valor de factor de seguridad como se presenta en la tabla 37. Al igual que el modelo SHALSTAB la condición de incondicionalmente inestable se refiere a zonas inestables en condiciones secas, estas áreas se relacionan con zonas muy empinadas que en la práctica son afloramientos rocosos que no deberían tenerse en cuenta porque no van a deslizarse al tratarse de rocas (Bateman y Medina, 2019).

Tabla 37. Clasificación de estabilidad modelo de taludes infinitos

FS	Clasificación de estabilidad
FS>1,5	Incondicionalmente estable
1,5>FS>1,25	Moderadamente estable
1,25>FS>1,0	Cuasi estable
1>FS>0,5	Inestable - Límite inferior
0,5>FS>0	Inestable - Límite superior
0>FS	Incondicionalmente inestable

Fuente: Pack et al. (2005).

Nota: es posible desarrollar un mapa de susceptibilidad para diferentes periodos de retorno de lluvia considerando que zonas inestables para periodos de retorno bajos tienen una susceptibilidad muy alta y viceversa.

3.3.3 MODELO STEP TRAMM

El modelo STEP TRAM está diseñado especialmente para la modelación de avenidas torrenciales ya que permite modelar la reacción en cadena de pequeñas fallas que desencadenan los deslizamientos y además permite modelar la movilización del material hasta los drenajes principales. El modelo se divide en 3 módulos: 1. Deslizamientos, 2. Progresión de la falla, 3. Movilización del flujo (ETH Zürich, 2020).

- **Módulo de deslizamientos**

Este módulo calcula la cantidad promedio de agua en la columna de suelo, la cual progresivamente va afectando la resistencia mecánica del suelo. El modelo tiene en cuenta que para que se genere un deslizamiento debe existir un desequilibrio de las fuerzas que se ejercen sobre el suelo (fuerzas impulsoras y fuerzas de resistencia), la fuerza impulsora se compone por el peso de la columna de suelo y la fuerza que ejercen las columnas de suelo vecinas, mientras que las fuerzas de resistencia incluyen la cohesión y la fricción (ETH Zürich, 2020).

La resistencia a la tracción que genera la falla y que además se transfiere a las columnas de suelo vecinas está basada en el criterio de Mohr-Coulomb y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau_t = \frac{2 \sin \phi}{1 + \sin \phi} \rho_w g h \chi + \frac{2C_s \cos \phi}{1 + \sin \phi} + C_r$$

Donde:

ϕ = Ángulo de fricción interna

h = Presión capilar

C_s = Cohesión del suelo

C_r = Cohesión de las raíces

χ = Coeficiente que define la relación entre fuerza capilar y presión capilar

Mientras que la resistencia a la compresión se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\tau_c = \frac{2 \sin \phi}{1 - \sin \phi} \rho_w g h \chi + \frac{2C_s \cos \phi}{1 - \sin \phi}$$

- **Módulo de progresión de la falla**

El modelo representa las interacciones mecánicas del suelo mediante enlaces mecánicos conceptuales en los cuales interconecta las columnas de suelo vecinas y la interfaz de suelo-roca con umbrales de resistencia bien definidos, de tal forma que cada enlace está representado por un FBM o “paquete de fibra” que se rompe en el umbral predefinido, sin embargo, antes se generan fallas locales que desencadenan una falla general de toda la columna (ETH Zürich, 2020).

Los FBM son numerosos elementos mecánicos que se denominan fibras, cuando las fibras más débiles se rompen sus respectivas cargas se redistribuyen en las demás fibras que posteriormente también pueden romperse, lo que desencadena una reacción en cadena de rotura de fibras generando así la falla de toda la columna de suelo, teniendo en cuenta además las columnas de suelo vecinas. La resistencia de cada fibra σ_{th} se elige aleatoriamente de una distribución Weibull definida de la siguiente forma (ETH Zürich, 2020):

$$p(\sigma_{th}) = \frac{m}{k} \left(\frac{\sigma_{th}}{k} \right)^{m-1} \exp \left(-\frac{(\sigma_{th})^m}{k} \right)$$

- **Módulo de movilización del flujo**

El modelo está acoplado con estimaciones simples de distancias y trayectorias del flujo de tierra deslizado, muy similar a los modelos empíricos. STEP TRAMM implementa el modelo empírico propuesto por Rickenmann en 1999 el cual relaciona el volumen del deslizamiento (V) con la diferencia de elevación entre la libración de la masa y la depositación (H) y finalmente la longitud de entre ambos puntos (L) de la siguiente forma (ETH Zürich, 2020):

$$L = 1.9V^{0.16}H^{0.83}$$

$$L = 15V^{\frac{1}{3}}$$

El módulo debe ser calibrado con datos observados de deslizamientos de tierra y flujos de tierra.

3.3.4 MODELO TRIGRS – USGS

El *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Bases Regional Slope – Stability Model* (TRIGRS) es un modelo desarrollado por el USGS en Fortran y diseñado para modelar los deslizamientos poco profundos detonados por lluvias. Este modelo calcula los cambios progresivos en la presión de poros y los cambios en el factor de seguridad debido a la infiltración de la lluvia, incluye su propio modelo de infiltración vertical unidimensional para condiciones saturadas y no saturadas.

Es una versión más compleja del modelo de taludes infinitos ya que además del flujo subsuperficial incluye el flujo en la zona no saturada por encima del nivel freático o del nivel del flujo subsuperficial por medio del modelo de Richards de infiltración vertical.

- **Modelo de infiltración para condiciones iniciales húmedas**

Este modelo se basa en la solución linealizada de Inversor de la ecuación de Richards, en la cual la infiltración depende de la profundidad inicial del nivel freático y una tasa de infiltración constante. Mientras que el gradiente hidráulico vertical es constante y es función de la pendiente la tasa inicial de infiltración y la conductividad hidráulica saturada. La solución de la ecuación de infiltración vertical que utiliza TRIGRS se presenta a continuación:

$$\psi(Z, t) = (Z - d)\beta + 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} \left(H(t - t_n) [D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}} ierfc \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_n)]^{\frac{1}{2}}} \right] \right) - 2 \sum_{n=1}^N \frac{I_{nZ}}{K_s} \left(H(t - t_{n+1}) [D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}} ierfc \left[\frac{Z}{2[D_1(t - t_{n+1})]^{\frac{1}{2}}} \right] \right)$$

Donde:

Ψ = Cabeza de presión del agua subterránea

t = Tiempo

$Z = z / \cos \delta$; profundidad vertical del suelo

d = Profundidad de la tabla de agua para estado estable en dirección vertical

δ = Ángulo pendiente

$$\beta = \cos^2 \delta - \left(\frac{I_{ZLT}}{K_s} \right)$$

K_s = Conductividad hidráulica saturada en la dirección Z

I_{ZLT} = Flujo superficial inicial

I_{nZ} = Flujo en la superficie dado por una intensidad para intervalo de tiempo

$$D_1 = \frac{D_o}{\cos^2 \delta}; D_o = \text{es la difusividad de la conductividad hidráulica saturada}$$

$$D_o = \frac{K_s}{S_s}; S_s = \text{es el almacenamiento específico}$$

$H(t - t_n)$ = Función de Heaviside para el paso de tiempo

La función $ierfc$ corresponde a:

$$ierfc(\eta) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \exp(-\eta^2) - \eta erfc(\eta)$$

$erfc(\eta)$ es otra función complementaria de error

Nota: este modelo es muy sensible a las condiciones iniciales por lo cual si no se tienen mediciones en campo confiables no es recomendable utilizarlo ya que es un modelo muy complejo que podría perder confiabilidad por la ausencia de información de calidad.

- **Modelo de infiltración para condiciones iniciales no saturadas**

Este modelo trata el suelo como un sistema de dos capas, una la zona saturada con una franja capilar sobre el nivel freático, superpuesta por una capa no saturada que se extiende hasta la superficie del suelo. La zona no saturada absorbe parte del agua que se infiltra y otra parte pasa y se acumula en la base de esta zona por encima del nivel freático inicial y por tanto eleva el nivel freático, esta carga de agua se propaga hacia abajo como ondas de presión difusiva aumentando la presión de poros, este proceso se describe igualmente con una forma unidimensional de la ecuación de Richards de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left[K(\psi) \left(\frac{1}{\cos^2 \delta} \frac{\partial \psi}{\partial Z} - 1 \right) \right]$$

$$K(\psi) = K_s \exp(\alpha \psi^*)$$

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \exp(\alpha \psi^*)$$

$$\psi^* = \psi - \psi_o$$

Donde:

Ψ = Cabeza de presión

θ = Contenido volumétrico de agua

θ_r = Contenido residual de agua

θ_s = Contenido de agua de saturación

3.4 MODELACIÓN DE MECANISMOS DETONANTES-ROTURA DE PRESAS

Otro de los mecanismos detonantes de avenidas torrenciales en conjunto con los deslizamientos son el represamiento de los cauces ocasionado por un gran deslizamiento en una zona encañonada del cauce o en uno de sus afluentes. Es de aclarar que la

modelación de represamientos naturales puede realizarse de forma independiente o conjunta con la modelación de estabilidad de taludes, pues no necesariamente los deslizamientos en sí son los que generan la avenida torrencial sino la presa como tal.

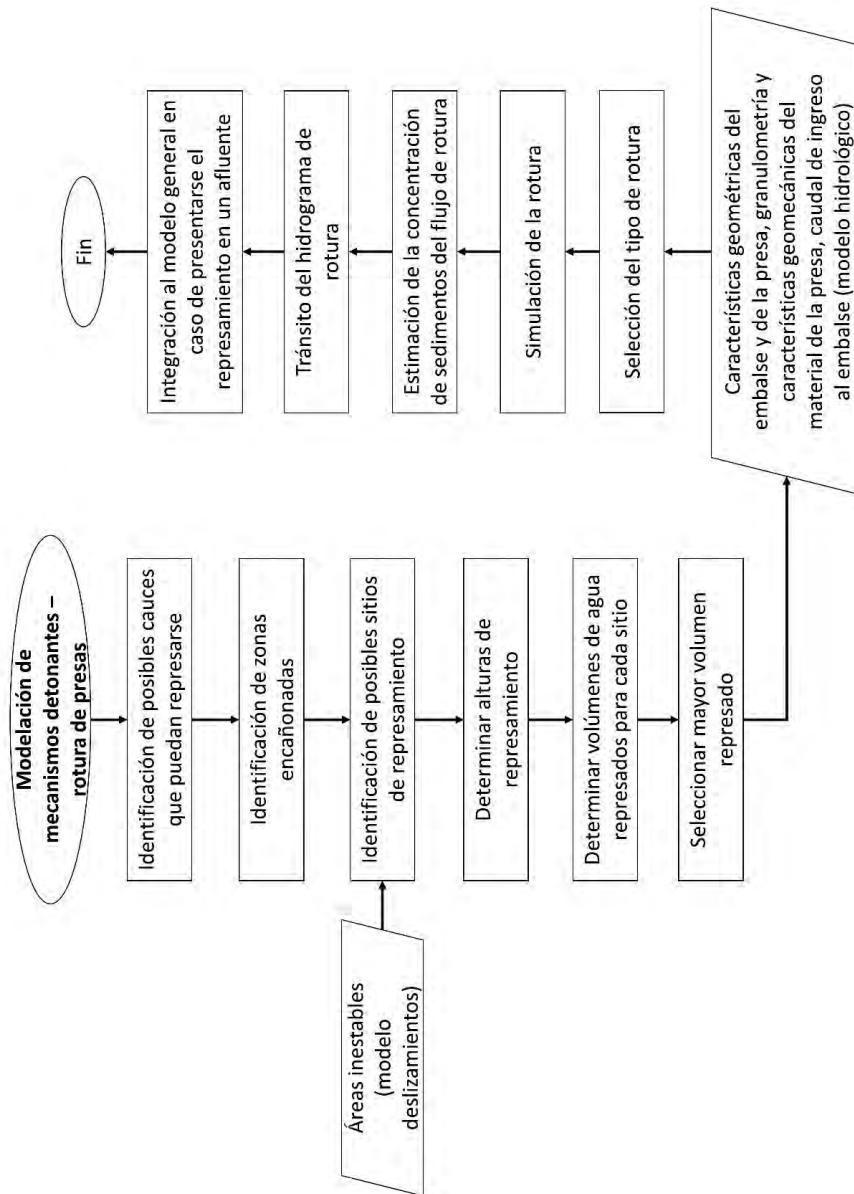
Con arreglo a lo anterior, pueden incluirse los sedimentos aportados por deslizamientos en toda la cuenca como se explicó en el numeral anterior o únicamente se realiza el análisis de estabilidad para las zonas vulnerables a represamientos y solamente se incluyen los sedimentos aportados por el represamiento.

En la figura 66 se presenta el procedimiento general para la modelación de rotura de presas naturales como mecanismo detonante de avenidas torrenciales y a continuación se presentan algunas aclaraciones frente a esta modelación:

- Las presas naturales pueden generarse por deslizamientos en cualquier parte de la cuenca, sin embargo, para que se genere represamiento de una cantidad de agua suficiente para detonar una avenida torrencial se requieren alturas relativamente grandes y en zonas donde el cauce se estreche lo suficiente para que se obstruya completamente.
- La modelación de represamientos puede estar sujeta a calibración, sin embargo, no es usual que se tenga información al respecto, sin embargo, sí se puede tomar como referencia el inventario de deslizamientos y encontrar algunos deslizamientos de gran magnitud que puedan ser candidatos para ser los generadores del represamiento.
- El deslizamiento que genera el represamiento puede presentarse muchos días antes del evento, por lo cual como se indicó anteriormente, estos deslizamientos tienen en cuenta la lluvia antecedente, sin embargo, la presa se rompe cuando se genera un evento de lluvia detonante que genere una creciente de gran magnitud que supere la presa y la erosione o que genere exceso de presión de poros y se empiece a erosionar por tubificación.
- Es importante cuando se realiza la modelación de rotura de presa seleccionar el mecanismo de rotura, siendo la tubificación una de las más comunes para las presas naturales.
- Los modelos de rotura de presas naturales tienen en cuenta las características del material de la presa, por lo cual es muy importante contar con información de campo de las características geomecánicas del suelo de la zona que posiblemente se deslice.
- Los modelos de rotura de presa tienen en cuenta el área del embalse generado por el represamiento, por lo cual es fundamental contar con un DEM de

buenas resoluciones para realizar un estimativo del volumen y área embalsada en cierto punto del cauce.

Figura 66. Diagrama de flujo modelación mecanismos detonantes–rotura de presas



Fuente: elaboración propia.

3.4.1 MODELO DE ROTURA DE PRESA BREACH

Existen diversos modelos de rotura de presa físicamente basados y empíricos, entre los más destacados se encuentran el NWS-DAMBRK, BOSS-DAMBRK y algunos modelos hidráulicos que incluyen módulos de rotura. En el presente documento se describe el modelo BREACH el cual es un modelo físicamente basado y está diseñado para modelar el rompimiento de presas naturales, bien sea construidas o generadas naturalmente por deslizamientos; por lo cual se constituye como una buena herramienta para la modelación de presas que generan avenidas torrenciales.

El modelo BREACH modela la erosión de la presa y no solo el sobre flujo de esta, también incluye un modelo de rotura por tubificación, que es una gran ventaja sobre otros modelos que únicamente incluyen la rotura por sobre flujo, lo que hace que se requieran unas condiciones muy específicas para la rotura, por lo cual este modelo puede representar de forma más acertada las condiciones de rotura de una presa generada por deslizamientos.

La presa puede ser de material homogéneo o de dos materiales: 1) Zona externa; 2) Núcleo interno, cada uno con valores diferentes de cohesión, ángulo de fricción, D50 y peso unitario. La cara de aguas debajo de la presa puede tener 3 diferentes condiciones: 1) Cubierta de hierba de longitud especificada de buen o regular soporte; 2) Material idéntico a la parte exterior de la presa; 3) Material de tamaño de grano mayor que el exterior de la presa.

- **Rotura por sobre flujo**

Para la modelación de la rotura por sobre flujo el modelo asume que cuando se inicia la erosión en la presa se forma un canal de 1 ft de profundidad por 2 ft de ancho, el flujo en este canal se calcula como

$$Q_b = 3 B_o (H - H_c)^{1.5}$$

Donde:

Q_b = Caudal en el canal de brecha

B_o = Ancho instantáneo del canal rectangular inicial

H = Elevación de la superficie de agua

H_c = Elevación de la parte inferior de la brecha

Una vez se inicia la rotura la velocidad del agua en la cara de aguas abajo se calcula con la siguiente expresión, sin embargo, si la cara de aguas debajo de la presa contiene hierba la velocidad del flujo se calcula con la ecuación de Manning.

$$q = 3(H - H_c)^{1,5}$$

$$y = \frac{qn'}{1,49 \left(\frac{1}{ZD} \right)^{0,5}}$$

$$n' = aq^b$$

$$v = \frac{q}{y}$$

Donde:

q = Caudal de desbordamiento por **ft** de longitud de cresta

$H - H_c$ = Cabeza hidrostática sobre la cresta en **ft**

n' = Coeficiente de Manning para canales con hierba

b = Coeficiente dado por Chow

ZD = Representa la pendiente de la cara de aguas abajo

- **Rotura por tubificación**

Si se simula una rotura por tubificación el modelo asume que la tubificación se erosiona a la misma velocidad hacia arriba y hacia abajo, el flujo por la tubificación se puede representar con la ecuación de orificio:

$$Q_b = A \left(\frac{2g(H - H_p)}{1 + \frac{fl}{D}} \right)^{0,5}$$

Donde:

Q_b = Caudal que pasa por el orificio (**cfs**)

g = Gravedad

A = Área del orificio (***ft***²)

H-H_p = Cabeza hidrostática en el orificio (***ft***)

l = Longitud del orificio (***ft***)

D = Diámetro del orificio (***ft***)

f = Factor de fricción de Darcy

Cuando la presa se ha erosionado lo suficiente hacia arriba el flujo empieza a ser tipo vertedero, por lo cual a partir de ese momento el flujo es calculado por medio de la ecuación de rotura por sobre flujo, asumiendo que la brecha tiene una forma rectangular.

$$Q_b = A \left(\frac{2g(H - H_p)}{1 + \frac{fl}{D}} \right)^{0.5}$$

Donde:

B_o = Diámetro orificio en el instante de transición de tubificación a vertedero

B_r = Factor basado en la sección hidráulicamente óptima

y = Profundidad del flujo en la brecha

Sin embargo, la brecha cambia a ser trapezoidal cuando los lados colapsan, por lo cual se alcanza una profundidad crítica que es calculada de la siguiente forma, de tal forma que el flujo se puede simular como uniforme con la ecuación de Manning, aclarando que el ***n*** de Manning debe ser calculado con base en el diámetro promedio del material de la presa.

$$H'_k = \frac{4 C \cos \phi \sin \theta'_{k-1}}{\gamma (1 - \cos(\theta'_{k-1} - \phi))} \text{ Para } k = 1,2,3$$

$$a = \cos \theta (1 - 1,54 \tan \theta)$$

$$\theta = \tan^{-1} S$$

$$R^* = 1524 D_{50} (DS)^{0,5}$$

$$\tau'_c = \frac{0,122}{R^{*0,97}} \text{ Para } R^* < 3$$

$$\tau'_c = \frac{0,056}{R^{*0,266}} \text{ Para } 3 \leq R^* \leq 10$$

$$\tau'_c = \frac{0,0205}{R^{*0,173}} \text{ Para } R^* > 10$$

Donde:

H'_k = Profundidad crítica

ϕ = Ángulo de fricción interna

k = Condiciones sucesivas del colapso

Θ = Ángulo que forma la pared de la brecha con la horizontal

C = Cohesión del suelo

γ = Peso unitario

$$n = 0,013 D_{50}^{0,67}$$

D_{50} = Diámetro promedio del grano

- **Transporte de sedimentos en el flujo de rotura**

La tasa de erosión de la brecha depende de la capacidad de transporte de sedimentos por el flujo de rotura, para calcular este caudal sólido el modelo utiliza la ecuación de Meyer-Peter y Müller para canales empinados:

$$Q_s = 3,64 \left(\frac{D_{90}}{D_{50}} \right)^{0,2} P \frac{D^{\frac{2}{3}}}{n} S^{1,1} (DS - \Omega)$$

Donde:

Q_s = Caudal de sedimentos (cfs)

D = Profundidad hidráulica (ft)

$$S = \frac{1}{ZD}$$

$\Omega = 0,0054 t_c D_{50}$ no cohesivo

$$\Omega = \frac{b'}{62,4} (PI)^{c'} \text{ cohesivo}$$

PI=Índice de plasticidad para suelos cohesivos

b', c' =Coeficientes empíricos

3.5 MODELACIÓN DE MECANISMOS DETONANTES-PROCESOS *IN-CHANNEL*

Los procesos *in-channel* corresponden a eventos en los cuales un caudal de gran magnitud puede generar erosión del canal y transporte de material generando concentraciones de sedimentos por encima del 20 %, aunque estos procesos no generan eventos de gran magnitud pueden ser incluidos en cauces donde se evidencien procesos erosivos en el canal. Para la modelación de este mecanismo se tiene en cuenta la ecuación de Takahashi (19991), el esfuerzo cortante del flujo movilizado:

$$\tau_m = [(zC + hC)(\rho_s - \rho_w) + (z + h)\rho]g * \cos\alpha * \sin\alpha$$

Donde:

z = Espesor de la capa de suelo saturado

C = Concentración de sedimentos

h = Profundidad del agua

P_s = Densidad del suelo

P_w = Densidad del agua

α = Pendiente

Este método permite calcular la concentración límite de equilibrio o máxima de sedimentos que el flujo va a transportar, de acuerdo con lo siguiente:

$$C_{\infty} = \frac{\tan \alpha}{(\rho_s - \rho_w)(\tan \phi - \tan \alpha)}$$

Donde:

C_∞ = Concentración de sedimentos de equilibrio

φ = Ángulo de fricción interna del *debris flow*

s = Profundidad\ erosionada

Nota: es de aclarar que el ángulo de fricción interna que se incluye en la ecuación de la concentración de sedimentos de equilibrio de Takahashi no necesariamente corresponde al ángulo de reposo del material de lecho, sino al ángulo de fricción del flujo (combinación de agua y sedimento) que corresponde de forma general al ángulo para el cual el flujo se detiene y empieza a depositarse, este ángulo puede medirse en campo observando los depósitos de flujos históricos o puede ser sujeto de calibración.

3.6 MODELACIÓN DE MECANISMOS DETONANTES-INCORPORACIÓN DE CARGA DE LAVADO

La carga de lavado corresponde a los sedimentos aportados por la erosión hídrica del suelo de la cuenca que es transportada con la escorrentía, esta no es como tal un mecanismo detonante, sin embargo, puede aportar sedimentos, lo que sumado con los deslizamientos generen una alta concentración llegando a generarse un compor-

tamiento no newtoniano, sobre todo cuando nos referimos a flujos de lodos, por lo cual se puede incluir esta carga para realizar un análisis más completo y realista de la concentración de sedimentos del flujo. El método más recomendado para el cálculo de la carga de lavado corresponde a la Ecuación Universal de pérdida de suelo (USLE), la cual se describe a continuación:

$$E = R * K * LS * C * P$$

Donde:

E = Potencial pérdida de suelo

R = Erosividad de la lluvia

K = Factor de erodabilidad

LS = Factor de longitud de pendiente

C = Factor por cobertura vegetal

P = Factor por prácticas de conservación de suelos

- **Erosividad de la lluvia (R)**

La lluvia puede disgregar las partículas de suelo cuando caen y estas partículas son transportadas por la escorrentía hasta el cauce, este impacto de las gotas depende de la energía cinética de la gota, por lo cual dependerá de la magnitud de la precipitación. Para el cálculo de este factor existen diversas aproximaciones, las cuales se presentan a continuación (Díaz-Granados, 2014).

Para un evento de precipitación:

$$E = \sum_{j=1}^n (916 + 331 \log_{10} * I_j) \Delta P_j$$

ΔP_j = Profundidad de precipitación en el intervalo **j** pulgadas

I_j = Intensidad de lluvia en el intervalo **j** (*pulgadas/hora*)

n = Número total de intervalos de discretización del hietograma

$$R = 0.01 \sum_{i=1}^N (EI_{30})_i$$

N = Número de tormentas por año

Ecuación de Pérez y Mesa (2002) aplicable a Colombia:

$$R = 0.00001193 P_{ma}^{1.70148}$$

R = Factor de erosividad de la lluvia promedio anual (**KJ/m²**) (**mm/h**)

PMA = Precipitación media anual (**mm/h**)

Ecuación general Diaz-Granados:

$$R = 3,49N - 0,1375H_m + 0,1631P_{ma} - 140$$

N = Número de días con lluvia promedio anual

H_m = Altura media de la cuenca (**msnm**)

P_{ma} = Precipitación media anual (**mm**)

- **Erodabilidad del suelo (K)**

La erodabilidad es una medida de la susceptibilidad de las partículas del suelo al desprendimiento por la lluvia y transporte por la escorrentía, este parámetro depende de los siguientes factores (Díaz-Granados, 2014):

- Textura: partículas finas tipo arcillas se resisten más por la formación de agregados cohesivos, mientras que los limos y arenas finas son menos resistentes.
- Contenido de minerales y materiales orgánicos que permiten la formación de agregados por enlaces químicos.
- Tamaño de poros y contenido de humedad del suelo.

De acuerdo con lo anterior, el factor **K** puede ser calculado de la siguiente forma:

$$100K = 0,00021M^{1,14}(12 - a) + 3,25(b - 2) + 2,5(c - 3)$$

Donde:

$$M = \% \text{ partículas (0,002 a 0,1 mm)} * (100 - \% \text{ partículas (>0,002 mm)})$$

a= Contenido orgánico

b = Índice de estructura

c = Índice de permeabilidad

Los factores **b** y **c** pueden determinarse por literatura de acuerdo con lo indicado en la tabla 38 o se puede tomar el valor del factor **K** directamente de la literatura de acuerdo con lo indicado en la tabla 39.

Tabla 38. Índices de estructura y permeabilidad por textura

Textura	Índice de estructura	Índice de permeabilidad
Arcillosa	1	1
Arcillo-limosa	1	1
Arcillo-arenosa	1	2
Limosa	1	2
Franco-arcillosa	2	3
Franco-arcillo-limosa	2	3
Franco-arcillo-arenosa	2	3
Franco-limosa	2	4
Franca	2	4
Franco-arenosa	3	5

Textura	Índice de estructura	Índice de permeabilidad
Arenoso-franca	3	6
Arenosa	3	6

Fuente: Díaz-Granados (2014).

Tabla 39. Factor *K* de la USLE en ton/ha

Textura	% MO <2 %	% MO >2 %
Clay	0,54	0,47
Clay loam	0,74	0,63
Coarse Sandy loam		0,16
Fine sand	0,20	0,13
Fine sand loam	0,49	0,38
Heavy clay	0,43	0,34
Loam	0,76	0,58
Loamy fine sand	0,34	0,20
Loamy sand	0,11	0,09
Loamy very fine sand	0,99	0,56
Sand	0,07	0,02
Sandy clay loam		0,45
Sandy loam	0,31	0,27

Textura	% MO <2 %	% MO >2 %
Silt loam	0,92	0,83
Silty clay	0,61	0,58
Silty clay loam	0,79	0,67
Very fine sand	1,03	0,83
Very fine Sandy loam	0,92	0,74

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

- **Factor de longitud de la pendiente (LS)**

El factor **LS** representa la relación de la pérdida de suelo para determinadas condiciones estándar (9 % de pendiente y 22,13 metros de longitud de pendiente), respecto a las condiciones propias de la cuenca; entre mayor y más larga sea la pendiente mayor es el riesgo de erosión (Díaz-Granados, 2014). El factor **LS** puede calcularse por medio de algunas de las ecuaciones que se presentan a continuación o tomada y/o interpolada directamente de la tabla 41.

De acuerdo con Stone y Hilborn (2001):

$$LS = (0,065 + 0,0456S + 0,006541S^2) \left(\frac{L}{22,1} \right)^{NN}$$

Tabla 40. Factor *NN*

S (%)	<1	1≤ S < 3	3≤ S < 5	≥5
NN	0,2	0,3	0,4	0,5

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

Tabla 41. Factor LS para diferentes pendientes y longitudes de pendiente

Longitud de pendiente (m)	Pendiente (%)	Factor LS
30,5	10	1,38
	8	1,00
	6	0,67
	5	0,54
	4	0,40
	3	0,30
	2	0,20
	1	0,13
	0	0,07
	10	1,95
61	8	1,41
	6	0,95
	5	0,76
	4	0,53
	3	0,39
	2	0,25
	1	0,16
	0	0,08

Longitud de pendiente (m)	Pendiente (%)	Factor LS
122	10	2,76
	8	1,99
	6	1,35
	5	1,07
	4	0,70
	3	0,52
	2	0,30
	1	0,20
	0	0,09
244	10	3,9
	8	2,82
	6	1,91
	5	1,52
	4	0,92
	3	0,68
	2	0,37
	1	0,24
	0	0,11

Longitud de pendiente (m)	Pendiente (%)	Factor LS
488	10	5,52
	8	3,99
	6	2,70
	5	2,15
	4	1,21
	3	0,90
	2	0,46
	1	0,30
975	0	0,12
	10	7,81
	8	5,64
	6	3,81
	5	3,03
	4	1,60
	3	1,19
	2	0,57
	1	0,36
	0	0,14

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

- **Factor *C* de cobertura vegetal**

La cobertura vegetal incluye en la pérdida del suelo ya que es una capa protectora contra la erosión, adicionalmente, esta puede absorber parte de la energía de la lluvia y reducir así la erodabilidad del suelo y el arrastre de partículas. Sin embargo, esto aplica en mayor medida para la cobertura vegetal de baja altura. El factor *C* puede calcularse por medio de la siguiente expresión (Díaz-Granados, 2014):

$$C = C_1 * C_2 * C_3$$

$$C_1 = 1 - \exp(-0,339H * FC)$$

$$C_2 = \exp\left(-b * S_p \left(\frac{0,61}{R_s}\right)^{0,08}\right)$$

Donde:

***C*₁** = Protección foliar que reduce la velocidad de la lluvia

***C*₂** = Residuos vegetales en el suelo que reduce la velocidad de la escorrentía

***C*₃** = Efectos residuales del uso de la tierra-materia orgánica

H = Altura de caída

FC = Fracción de cubrimiento forestal

S_p = % de cubrimiento de residuos vegetales

b = 0,05 a 0,07

R_s = Rugosidad de la superficie (cm)

Tabla 42. Factor de cobertura vegetal C_3

Contenido de materia orgánica	% MO	C_3 Pasto	C_3 matorral
Muy bajo	10	0,44	0,40
Bajo	25	0,41	0,32
Medio a bajo	35	0,40	0,27
Medio	50	0,37	0,21
Medio a alto	65	0,36	0,15
Alto	75	0,35	0,12
Muy alto	85	0,34	0,11

Fuente: Díaz-Granados (2014).

El factor C para cultivos puede tomarse directamente de la tabla 43 y tabla 44 y multiplicar ambos valores.

Tabla 43. Factor C por tipo de cultivo

Tipo de cultivo	Factor C
Maíz en grano	0,40
Maíz en silo, fríjoles y canola	0,50
Cereales	0,35
Cultivos de hortalizas	0,50
Árboles frutales	0,10
Heno y pasto	0,02

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

Tabla 44. Factor C por tipo de labranza

Tipo de labranza	Factor C
Arado en otoño	1,0
Arado en primavera	0,90
Mulch tillage	0,60
Ridge tillage	0,35
Zone tillage	0,25
No - till	0,25

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

El modelo empleado fue el de taludes infinitos implementado dentro de la plataforma SINMAP compatible con GIS, este modelo tiene la ventaja que acepta rangos para los parámetros geomecánicos.

- **Factor *P* de prácticas de conservación de suelos**

Este factor *P* representa las prácticas utilizadas para disminuir la erosión, este va de 0 – 1 donde 1 indica que no se utiliza ninguna práctica de conservación. Estas prácticas están relacionadas con el tipo de labranza o técnica de cultivo (Díaz-Granados, 2014). Para determinar este factor se debe acudir a literatura, se presentan algunos valores en la tabla 45 a la tabla 47.

Tabla 45. Factor *P* para cultivos a nivel

Pendiente (%)	Factor P
1 – 2	0,4
2 – 7	0,5
7 -12	0,6
Pendiente (%)	Factor P
12 – 18	0,8
18 – 24	0,9

Fuente: Díaz-Granados (2014).

Tabla 46. Factor *P* para cultivos en fajas

Pendiente (%)	Factor P
1 – 2	0.45
3 – 5	0.38
6 – 8	0.38
9 – 12	0.45

Pendiente (%)	Factor P
13 – 16	0.52
17 – 20	0.60

Fuente: Díaz-Granados (2014).

Tabla 47. Factor P para diferentes prácticas agrícolas

Práctica	Factor P
Pendiente transversal	0,75
Agricultura de contorno	0,50
Cultivo en fajas y pendiente transversal	0,37
Cultivo en fajas y contorno	0,25

Fuente: Stone y Hilborn (2001).

3.7 EJEMPLO MODELACIÓN DE MECANISMOS DETONANTES-QUEBRADA LA NEGRA, ÚTICA, CUNDINAMARCA

Para el caso de estudio de la quebrada La Negra, Páez (2016) implementó un modelo de taludes infinitos en conjunto con un modelo de rotura de presa, esto debido a que se generaron múltiples deslizamientos en la cuenca alta de la quebrada La Negra y a su vez se presume, de acuerdo con los informes de las entidades de gestión del riesgo, que se generó un represamiento de uno de los afluentes correspondiente a la quebrada La Papaya, a continuación se describe la implementación de ambos modelos de iniciación o detonantes.

3.7.1 MODELO DE TALUDES INFINITOS – SINMAP

El modelo empleado fue el de taludes infinitos implementado dentro de la plataforma SINMAP compatible con GIS, este modelo tiene la ventaja que acepta rangos para los parámetros geomecánicos (ángulo de fricción y cohesión) y no un único valor, lo que permite generar un umbral superior e inferior para representar la probabilidad de inestabilidad superior e inferior al 50 % (Pack et al., 2005).

La implementación del modelo en GIS requiere de los siguientes pasos: 1. Corrección del DEM, 2. Cálculo de las pendientes, 3. Cálculo de la dirección del flujo con el método de Tarboton, 4. Cálculo del área de captación o Flow accumulation, 5. Cálculo de la acumulación de humedad en la cuenca, 6. Cálculo del índice de estabilidad y calibración de los parámetros geomecánicos.

- **Calibración modelo SINMAP**

Debido a que no se contaba con inventario de deslizamientos para el evento de avenida a simular, la calibración del modelo fue realizada para las condiciones medias de lluvia y tomando 383 deslizamientos de un inventario realizado por INGEOMINAS (figura 68), sin embargo, como se indicó en numerales anteriores puede seleccionarse un determinado periodo de tiempo de registro en el cual se tenga información de deslizamientos para realizar la calibración (Páez, 2016).

De acuerdo con lo anterior, para incluir las condiciones medias de lluvia se manejaron valores de T/R (donde T es la transmisividad hidráulica y R el flujo subsuperficial del modelo TOPMODEL) entre 2000 y 3000. Para la calibración de los parámetros geomecánicos de ángulo de fricción, cohesión y densidad del suelo se asignaron diferentes rangos para cada una de las unidades geológicas de las cuencas a partir de sus características litológicas y el análisis del inventario de deslizamientos de cada unidad (Páez, 2016).

La mayoría de las unidades geológicas de la cuenca corresponden a materiales finos tipo limolitas, lutitas, arcillolitas, rocas sedimentarias y depósitos fluviotorrenciales arcillosos y limosos, como se observa en la figura 67 y describe en la tabla 48 (INGEOMINAS y Universidad Nacional de Colombia, 2009).

Una vez identificadas las características de las unidades geológicas se establecieron rangos de calibración para los parámetros geomecánicos de acuerdo con la literatura y el análisis del inventario de deslizamientos, como se observa en la tabla 49.

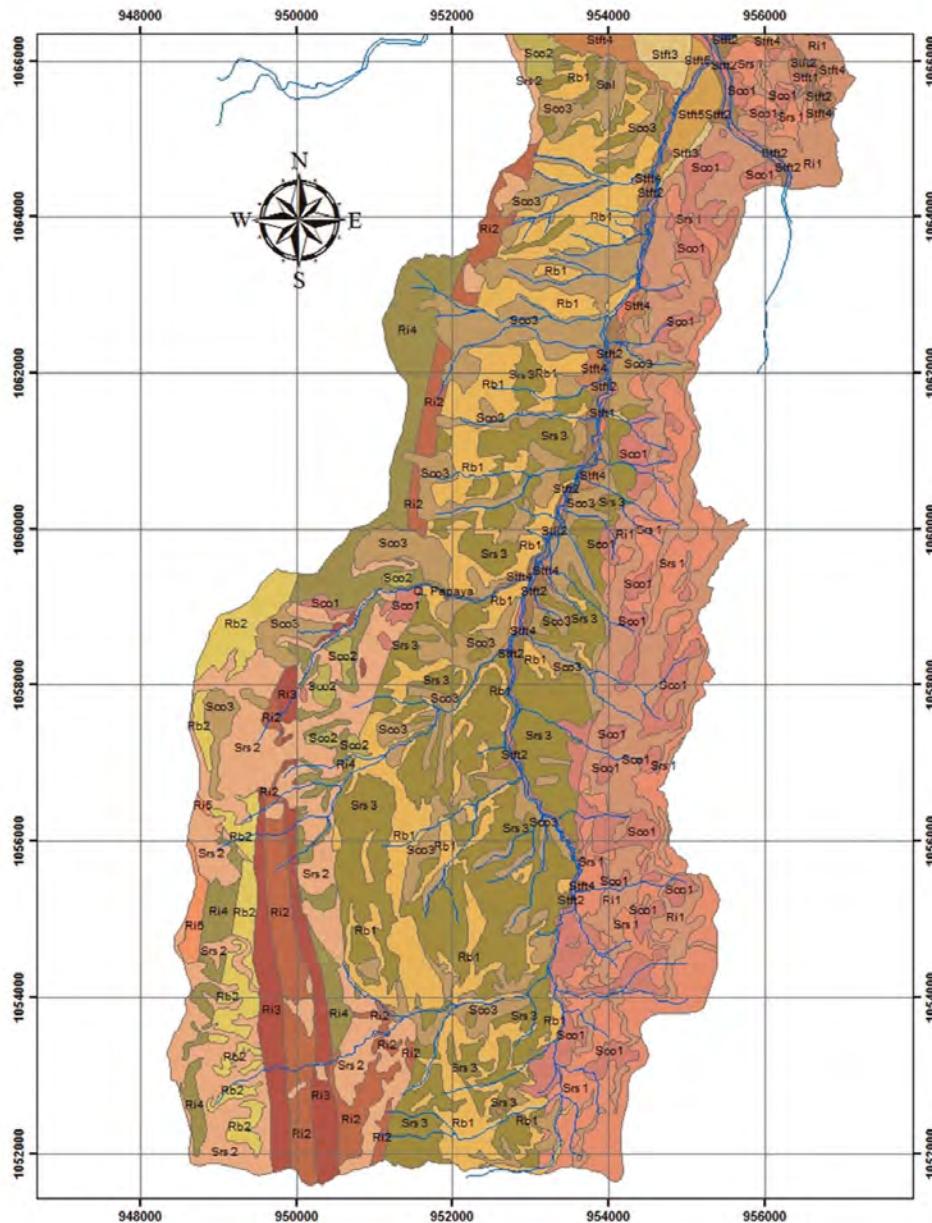
Tabla 48. Caracterización unidades geológicas cuenca quebrada La Negra

Símbolo	Tipo	Tipo de UGS
Ri1	Unidades de roca	Areniscas cuarzosas intercaladas con limolitas y lutitas. Las calizas son frecuentes en esta unidad.
Ri2		Secuencia interestratificada de arcillolitas y limolitas silíceas ocasionalmente calcáreas.
Ri3		Secuencia interestratificada de lutitas calcáreas, a veces silíceas y limolitas silíceas.
Ri4		Capas muy delgadas de chert, liditas y limolitas silíceas.
Ri5		Secuencia interestratificada de limolitas silíceas y lodoítas calcáreas ocasionalmente silíceas, intercaladas con areniscas de cuarzo finas a medianas.
Rb1		Lutitas negras, ocasionalmente silíceas y calcáreas con intercalaciones esporádicas de calizas y areniscas.
Rb2		Lutitas calcáreas negras, con concreciones calcáreas e intercalaciones de limonita silícea ocasionalmente chert y calizas arenosas.
Srs1		De roca parental de granulometría fina a media, predominantemente arenosa. Arenosa con arcillas y limos en menor proporción.
Srs2		De roca parental de granulometría fina, predominantemente limosa. Limosa con arcillas y arenas en menor proporción.
Srs3		De roca parental de granulometría fina a muy fina, predominantemente arcillosa. Arcillosa con limos y arenas en menor proporción.

Símbolo	Tipo	Tipo de UGS
Sco1		Matriz arenosa, derivados los macizos rocosos de la formación Útica. Arenosa con limos y arcillas en menor proporción.
Sco2	Suelo coluvial	Matriz limosa, derivados de los macizos rocosos de la formación Socotá, Capotes, Hiló, Lidita Interior, Nivel de lutitas y Areniscas y Grupo Guaguaqui. Limosa con arenas y arcillas en menor proporción.
Soc3		Matriz arcillosa, derivados de los macizos rocosos de la formación Trincheras. Arcillosa con arenas y limos en menor proporción.
Stft1		Abanicos aluviales recientes, cauces actuales de drenajes principales. Arcillosa, limosa y arenosa en diferentes proporciones.
Stft2		Terrazas aluviales. Arcillosa, limosa y arenosa en diferentes proporciones.
Stft3	Suelo fluvio-torrencial	Abanicos aluviales. Grava fina, arena limo y arcilla.
Stft4		Conos de deyección, matriz arenosa, limosa o arcillosa. Matriz de arenas, limos y arcillas en diferentes proporciones.
Stft5		Flujos de detritos. Matriz arenolimosa y limoarcillosa.

Fuente: INGEOMINAS y Universidad Nacional de Colombia (2009).

Figura 67. Mapa geológico cuenca quebrada La Negra



Fuente: INGEOMINAS y Universidad Nacional de Colombia (2009).

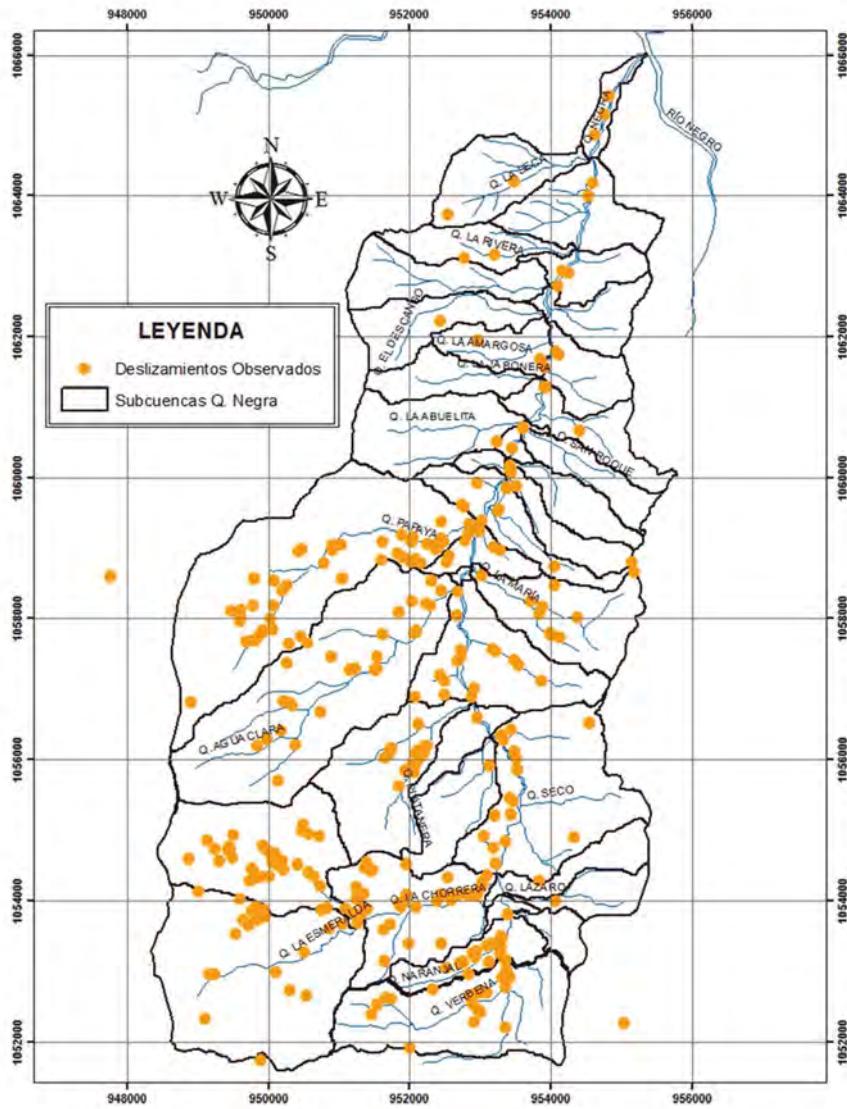
Tabla 49. Parámetros calibrados SINMAP

Unidad geológica	Parámetro	Rango/valor	Referencias bibliográficas utilizadas	Unidad geológica	Parámetro	Rango /valor	Referencias bibliográficas utilizadas
Ri1	ϕ	35 – 45	(Suárez, 1998)	Srs3	ϕ	25 – 35	(Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0,05 – 0,15	(Navarro, 2008) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)		C	0 – 0,13	
	ρ_s	2 150	(Suárez, 1998)		ρ_s	1 729	
Ri2	ϕ	25 – 35	(Suárez, 1998) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)	Sco1	ϕ	25 – 35	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Hoek y Bray, 1981)
	C	0,12 – 0,58			C	0 – 0,12	
	ρ_s	2 249	(Suárez, 1998)		ρ_s	1 878	
Ri3	ϕ	25 – 35	(Suárez, 1998) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)	Sco2	ϕ	25 – 35	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0,12 – 0,58			C	0,12 – 0,58	
		2 249	(Suárez, 1998)			1 729	
Ri4	ϕ	30 – 40	(Suárez, 1998) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)	Sco3	ϕ	25 – 35	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0,05 – 0,15			C	0 – 0,01	
	ρ_s	2 700	(Suárez, 1998)		ρ_s	1729	
Ri5	ϕ	25 – 35	(Suárez, 1998) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)	Stft1	ϕ	30 – 40	(Suárez, 1998) (Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0,12 – 0,58			C	0 – 0,01	
	ρ_s	2 249	(Suárez, 1998)		ρ_s	2 134	

Unidad geológica	Parámetro	Rango/valor	Referencias bibliográficas utilizadas	Unidad geológica	Parámetro	Rango /valor	Referencias bibliográficas utilizadas
Rb1	ϕ	25 – 35	(Suárez, 1998)	Stft2	ϕ	30 – 40	(Suárez, 1998)
	C	0,12 – 0,58	(Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)		C	0 – 0,01	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	ρ_s	1 937	1986)		ρ_s	2 163	(Suárez, 1998)
Rb2	ϕ	25 – 35	(Suárez, 1998)	Stft3	ϕ	30 – 40	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0,12 – 0,58	(Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)		C	0 – 0,01	(Suárez, 1998)
	ρ_s	1 937	1986)		ρ_s	2 134	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
Srs1	ϕ	30 – 35	(Wyllie y Mah, 2004) (Hoek y Bray, 1981)	Stft4	ϕ	30 – 40	(Suárez, 1998)
	C	0,05 – 0,15			C	0 – 0,01	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	ρ_s	1 755			ρ_s	2 134	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
Srs2	ϕ	25 – 35	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)	Stft5	ϕ	25 – 30	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	C	0 – 0,13			C	0,09 – 0,44	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)
	ρ_s	1 729			ρ_s	1 729	(Bañon y Bevía, 2000) (Wyllie y Mah, 2004) (Instituto Geológico y Minero de España, 1986)

Fuente: Páez (2016).

Figura 68. Mapa inventario de deslizamientos cuenca quebrada La Negra



Fuente: INGEOMINAS y Universidad Nacional de Colombia (2009).

Con la calibración del modelo fue posible identificar que la cohesión es un parámetro sensible y que la reducción de esta reduce el índice de estabilidad, mientras que la densidad del suelo es el parámetro menos sensible no siendo significativo el cambio de la estabilidad en relación con la modificación de este. El ángulo de fricción interna es el parámetro más sensible del modelo modificando sustancialmente la estabilidad del talud (Páez, 2016). De acuerdo con lo anterior, lo más recomendable es realizar mediciones en campo de este tipo de parámetros para lograr simulaciones con menor incertidumbre.

Respecto al parámetro T/R se observa un límite en su sensibilidad para valores superiores a 2 000, mientras que para valores inferiores a 1 000 se presentan cambios sustanciales en la estabilidad del modelo (Páez, 2016), esto podría indicar ciertos umbrales de precipitación – flujo subsuperficial que generan los procesos de inestabilidad.

Una vez calibrados los parámetros del modelo con los deslizamientos observados se reclasificó la estabilidad de la cuenca en 4 categorías, de acuerdo con su valor del factor de seguridad como se presenta en la tabla 50 y de esta manera se obtuvo el mapa de estabilidad para las condiciones medias, presentado en la figura 69.

Tabla 50. Clasificación estabilidad modelo SINMAP

Clasificación Estabilidad	Factor de seguridad
Completamente inestable	0 – 0,01
Límite inferior inestabilidad	0,01 – 0,5
Límite superior inestabilidad	0,5 – 1
Estable	>1

Fuente: adaptado de Pack et al. (2005).

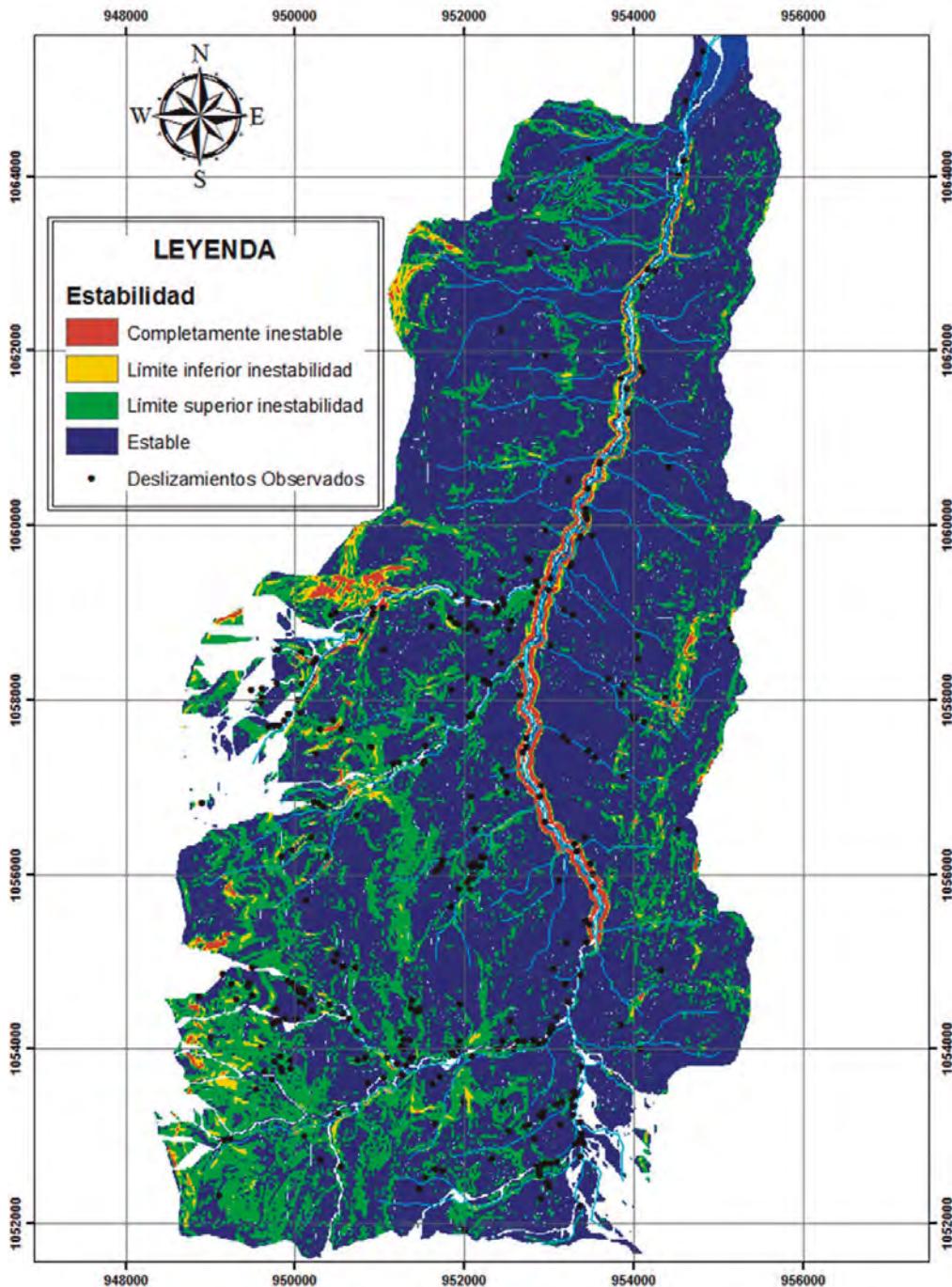
- **Simulación de las condiciones antecedentes al evento de avenida torrencial del 17 de noviembre de 1988**

Una vez calibrado el modelo se simularon las condiciones de flujo subsuperficial de los 30 días anteriores al evento de avenida torrencial del 17 de noviembre de 1988,

para ello se tomaron los valores de flujo subsuperficial del modelo TOPMODEL (R), tomando valores de T/R entre 400 – 550 y obteniendo el mapa de estabilidad que se presenta en la figura 70.

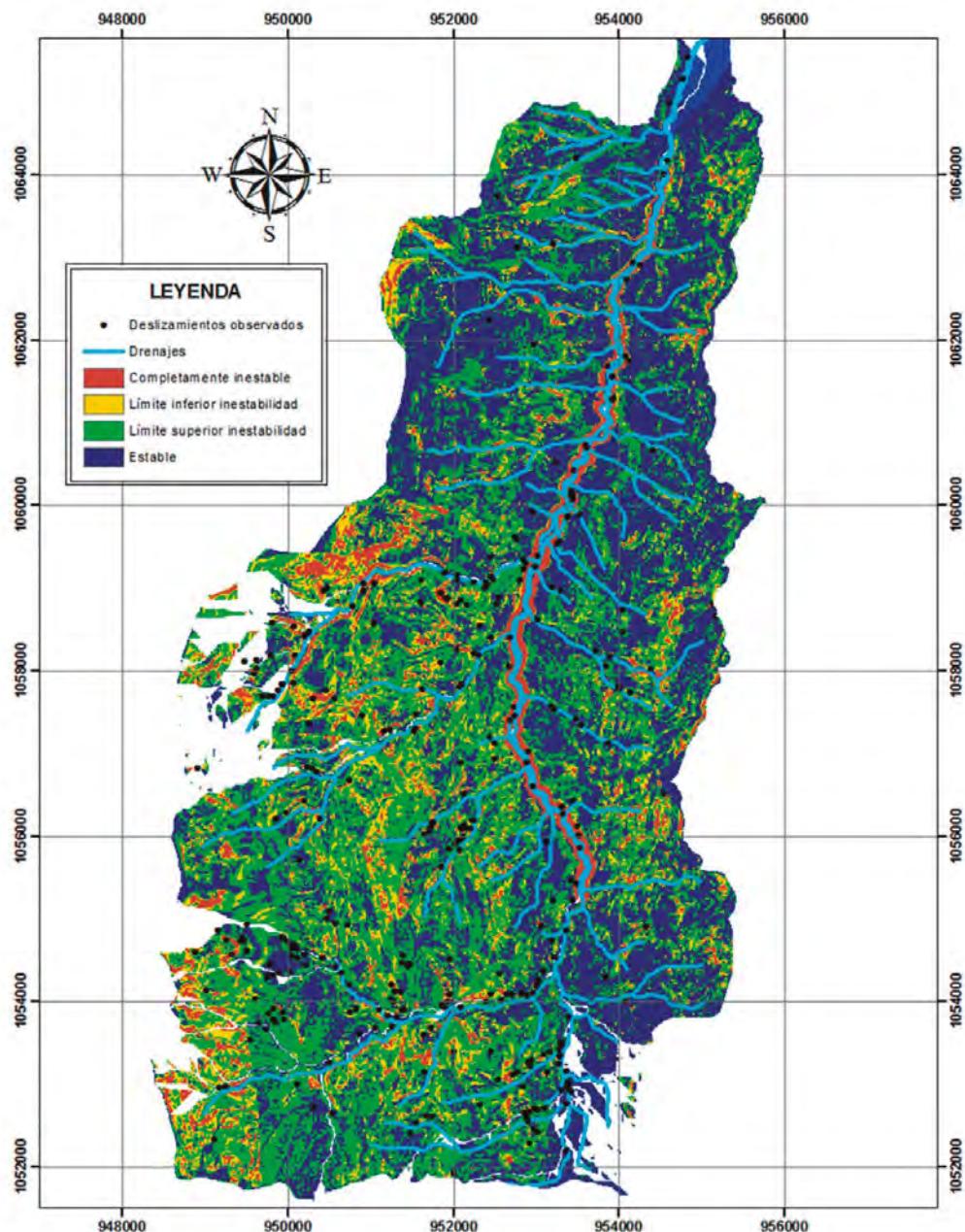
Se observa que las condiciones de inestabilidad para los días antecedentes al evento de avenida torrencial son muy diferentes a las condiciones medias y que la lluvia antecedente juega un papel fundamental en el proceso de generación de deslizamientos ya que muchas zonas estables pasaron a ser inestables generando en la mayoría de la cuenca valores del factor de seguridad inferiores a 1. Posteriormente, se describirá qué áreas inestables fueron tomadas como zonas de aporte de sedimentos al flujo de avenida torrencial (Páez, 2016).

Figura 69. Mapa de estabilidad para condiciones de humedad medias cuenca quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

Figura 70. Mapa de estabilidad para las condiciones de humedad antecedente al evento de avenida torrencial del 17 de noviembre de 1988 cuenca quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

3.7.2 MODELO DE ROTURA DE PRESA

Para la modelación de la rotura de la presunta presa generada en la quebrada La Pa-paya, afluente de la quebrada La Negra se utilizó el modelo BREACH y se aplicó el método de rotura por tubificación, ya que esta rotura es gradual y conlleva a la remoción casi total de la estructura de la presa (Estudios y Asesorías Ingenieros Consultores Ltda., 2012).

- **Identificación de sitios y alturas de represamiento**

Teniendo en cuenta que no se contaba con información de la ubicación del represamiento para el evento de avenida torrencial del 17 de noviembre de 1988 fue necesario identificar, a partir del modelo de deslizamientos, zonas con deslizamientos de gran magnitud para determinar así los posibles sitios de represamiento. Una vez identificados los sitios de posible deslizamiento se calculó el volumen deslizado utilizando una relación a área vs volumen generada a partid de la base de datos de deslizamientos de INGEOMINAS para cada una de las unidades geológicas (Páez, 2016).

Esta relación se calculó de la siguiente forma (Suárez, 2009) obteniendo como resultado las relaciones área–volumen para cada unidad geológica presentadas en la tabla 51.

$$\text{Área} = W_r * L_r$$

$$\text{Volumen} = \left(\frac{1}{6} \pi * D_r * W_r * L_r \right) F_{ex}$$

Una vez identificados los sitios de posible deslizamiento se calculó el volumen deslizado utilizando una relación a área vs volumen generada a partid de la base de datos de deslizamientos de INGEOMINAS para cada una de las unidades geológicas

Donde:

W_r = Ancho de la superficie de falla (m)

L_r = Longitud de la superficie de falla (m)

Dr = Profundidad de la superficie de falla (m)

F_{ex} = Factor de expansión del suelo

Tabla 51. Relaciones área-volumen para cada unidad geológica

Unidad geológica	Relación área (x) vs volumen (y)
Ri1	$y = 0,9491x - 148,53$ $R^2 = 0,9992$
Ri2	$y = 0,4227x + 1,0691$ $R^2 = 0,8431$
Ri3	$y = 0,2404x + 1,1677$ $R^2 = 0,8015$
Ri4	$y = 5,5347x - 1208,2$ $R^2 = 0,988$
Ri5	No hay deslizamientos observados
Rb1	$y = 0,4869x + 1,1838$ $R^2 = 0,784$
Rb2	No hay deslizamientos observados
Srs1	$y = 14,934x + 0,6939$ $R^2 = 0,6201$
Srs2	$y = 3,0245x - 599,4$ $R^2 = 0,8359$

Unidad geológica	Relación área (x) vs volumen (y)
Srs3	$y = 0,5222x1,1747$ $R^2 = 0,8314$
Sco1	$y = 0,5026x1,2244$ $R^2 = 0,7572$
Sco2	No hay deslizamientos observados
Sco3	$y = 0,2477x1,2573$ $R^2 = 0,8903$
Stft1	$y = 2,5876x - 243,91$ $R^2 = 0,9051$
Stft2	$y = 0,1221x1,437$ $R^2 = 0,9857$
Stft3	No hay deslizamientos observados
Stft4	$y = 0,4784x1,2918$ $R^2 = 0,9168$
Stft5	No hay deslizamientos observados

Fuente: Páez (2016).

Finalmente, a partir del volumen deslizado se calculó la altura de cada posible presa, de acuerdo con lo indicado a continuación y representado en la figura 71.

$$V_d = \left(\left(\frac{(H_p * L/2)}{2} \right) * 2 \right) * B$$

$$\frac{L}{2} = \frac{H_p}{\tan \phi}$$

$$H_p = \sqrt{\frac{V_d * \tan \phi}{B}}$$

Donde:

H_p = Altura de la presa (**m**)

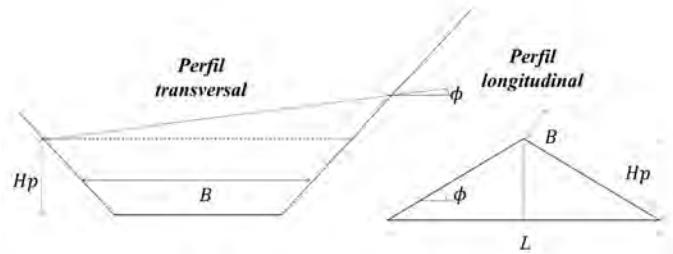
V_d = Volúmen del deslizamiento (**m^3**)

L = Longitud base de la presa (**m**)

B = Ancho medio de la sección transversal del cauce (**m**)

ϕ = Ángulo de fricción interna (grados)

Figura 71. Geometría para cálculo de profundidad de represamientos



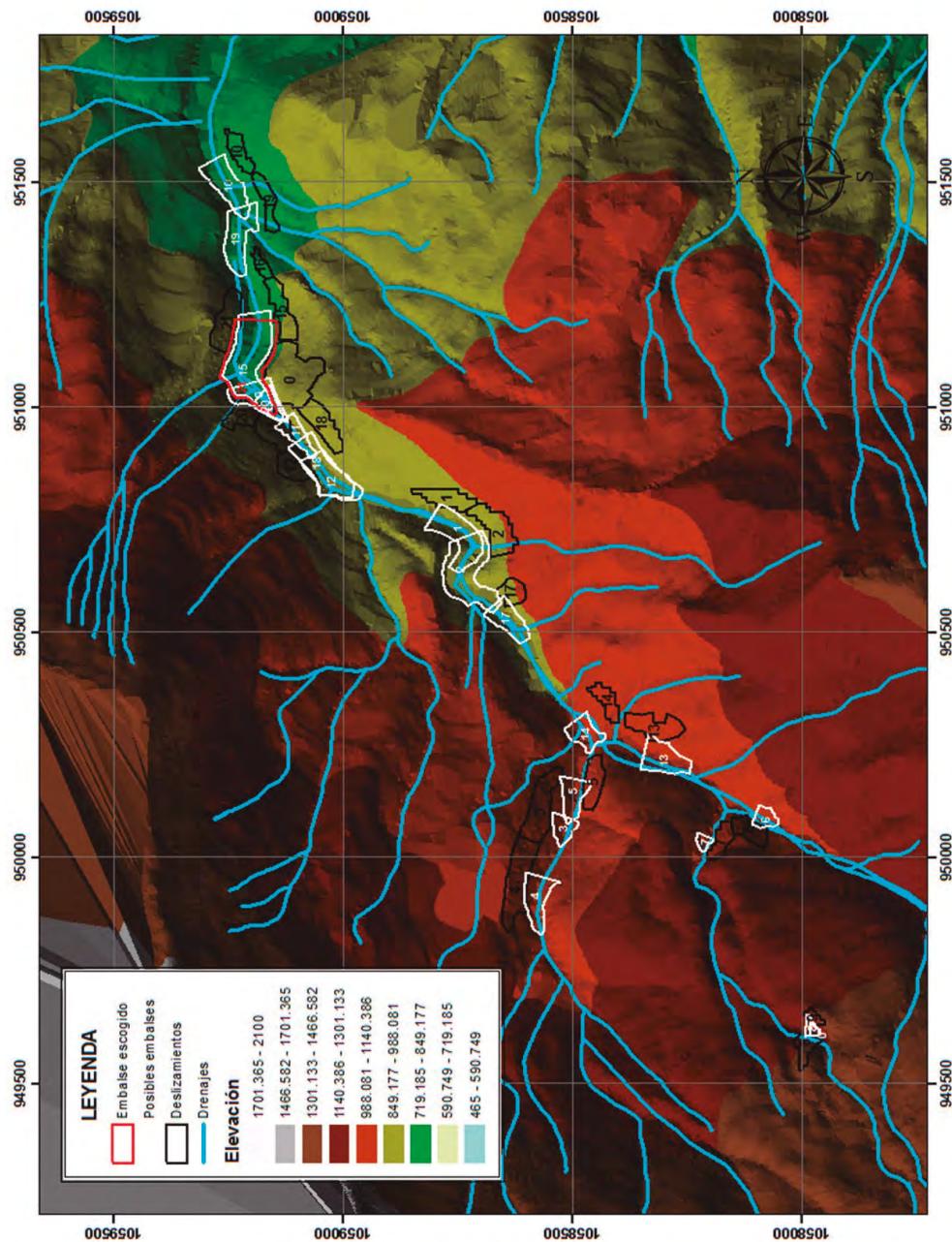
Fuente: Páez (2016).

- **Selección de la presa a modelar**

Una vez se calcularon las profundidades de represamiento se determinaron las áreas y volúmenes embalsados para cada caso, con base en un modelo digital de terreno (ver figura 72). Finalmente, se seleccionó el embalse número 21, el cual genera el mayor volumen embalsado y altura de represamiento de 28 metros (Páez, 2016).

Es de aclarar, que la presa no se escogió por su altura ya que dependiendo del sitio donde se genere el deslizamiento el volumen de agua embalsada va a ser diferente por la topo-batimetría del cauce.

Figura 72. Ubicación posibles embalses generados en la quebrada La Papaya



Fuente: Páez (2016).

- **Implementación del modelo BREACH**

Para la implementación del modelo BREACH se tomaron los datos presentados en la tabla 52. Adicionalmente, el n del material de la presa se calculó mediante del análisis del inventario de deslizamientos para la unidad geológica Ri4. Mientras que el n de Manning del cauce se calculó con la ecuación de Strickler, utilizando como 1,9 mm tomado de la curva granulométrica de la quebrada La Papaya (Páez, 2016).

Tabla 52. Descripción parámetros BREACH

Parámetro	Descripción	Valor embalse escogido
HI	Elevación inicial de la superficie de agua en el embalse (ft)	92,17
HU	Elevación de la presa (ft)	92,17
HL	Elevación del fondo de la presa (generalmente la elevación del lecho del río) (ft)	0
HPI	Elevación para la cual comienza la falla por tubificación (si no existe tubificación dejar espacio en blanco) (ft)	90
HSP	Elevación de la cresta del rebosadero (si no existe rebosadero dejar espacio en blanco) (ft)	-
PI	Índice de plasticidad de la arcilla para presas con material predominantemente arcilloso	-
CA	Coeficiente para el esfuerzo cortante crítico de la arcilla	-
CB	Coeficiente para el esfuerzo cortante crítico de la arcilla	-
QIN(I)	Caudal de entrada al embalse (hidrograma)	-
TIN(I)	Tiempo asociado al caudal de entrada al embalse	-
RSA	Área del embalse (acres)	Ver tabla 53
HSA	Elevación (ft) asociada con el área del embalse	Ver tabla 53

Parámetro	Descripción	Valor embalse escogido
HSTW(l)	Elevación asociada con la parte superior de la sección transversal	Ver tabla 53
BSTW(l)	Anchos de la sección transversal asociada con la elevación HSTW	Ver tabla 53
CMTW	Coeficiente de Manning asociado con cada ancho de la sección transversal	0,017
ZU	Pendiente de la cara de aguas arriba de la presa (1:ZU)	1,43
ZD	Pendiente de la cara de aguas arriba de la presa (1:ZD)	1,43
ZC	Pendiente promedio de las caras de aguas arriba y aguas debajo del núcleo interno de la presa (si no existe núcleo se deja vacío)	-
GL	Longitud promedio de la hierba (in) (si no hay hierba se deja vacío)	-
GS	Condición del pasto 1: buena, 2: mala o no existe	-
VMP	Máxima velocidad permisible (ft/s) para canales recubiertos de hierba o pasto (si no hay hierba dejar vacío)	-
SEDCON	Concentración máxima de sedimentos de 0,4 – 0,5 (si se deja en blanco se asumirá como 0,5)	0,5
D50C	D_{50} (mm) del núcleo. Si no hay núcleo dejar vacío	-
PORC	Porosidad del núcleo. Si no hay núcleo dejar vacío	-
UWC	Peso específico del material del núcleo. Si no hay núcleo dejar vacío (lb/ft ³)	-
CNC	n de Manning del núcleo. Si no hay núcleo dejar vacío	-
AFRC	Ángulo de fricción interna del núcleo (grados). Si no hay núcleo dejar vacío	-
COHC	Cohesión (lb/ft ²) del núcleo. Si no hay núcleo dejar vacío	-

Parámetro	Descripción	Valor embalse escogido
UNFCC	Cociente entre D_{50} y del núcleo. D_{30} Si no hay núcleo dejar vacío	-
D50S	D_{50} (mm) del material exterior de la presa	7,0
PORS	Porosidad del material exterior de la presa	0,25
UWS	Peso específico del material exterior de la presa (lb/ft ³)	168,5
CNS	n de Manning del material exterior de la presa	0,034
AFRS	Ángulo de fricción interna del material exterior de la presa (grados)	35
COHS	Cohesión (lb/ft ²) del material exterior de la presa	208,71
UNFCS	Cociente entre D_{90} y D_{30} del material exterior de la presa. Si se deja vacío se asume como 10	10
BR	Relación entre el ancho y la profundidad de flujo para la brecha rectangular inicial. Usualmente se utiliza 2 para brechas por sobre flujo y 1 para brechas por tubificación	1
WC	Ancho de la cresta (ft)	0
CRL	Longitud de la cresta (ft)	293,5
SM	Pendiente de río aguas abajo (ft/miles)	262,3
D50DF	D_{50} (mm) del primer ft de la parte superior de la cara de aguas debajo de la presa. Si se deja en blanco se asume igual D50S	7,0
UNFCDF	Cociente entre D_{90} y D_{30} de la cara de aguas abajo de la presa	10
BMX	Ancho máximo para la parte inferior de la brecha, restringida por la sección transversal del valle (ft)	93,6

Parámetro	Descripción	Valor embalse escogido
BTMX	Ancho máximo para la parte superior de la brecha, restringida por la sección transversal del valle (f)	293,5
DTH	Delta de tiempo de corrida del modelo (hr)	0,01
DBG	Indica que resultados se quieren mostrar en el archivo de salida	0,0
H	Profundidad inicial de la brecha (ft). Si se deja vacío se asume como 0,1	-
TEH	Duración de la simulación (hrs)	2
ERR	Tolerancia del error para las iteraciones	0,01
FTP	Intervalo de tiempo para el cual se graficará el caudal de salida	0,01
SPQ(l)	Caudal del rebosadero (cfs)	-
SPH(l)	Profundidad del flujo sobre el rebosadero correspondiente al caudal rebosado SPQ(l) (ft)	-

Fuente: Fread (1988) y Páez (2016).

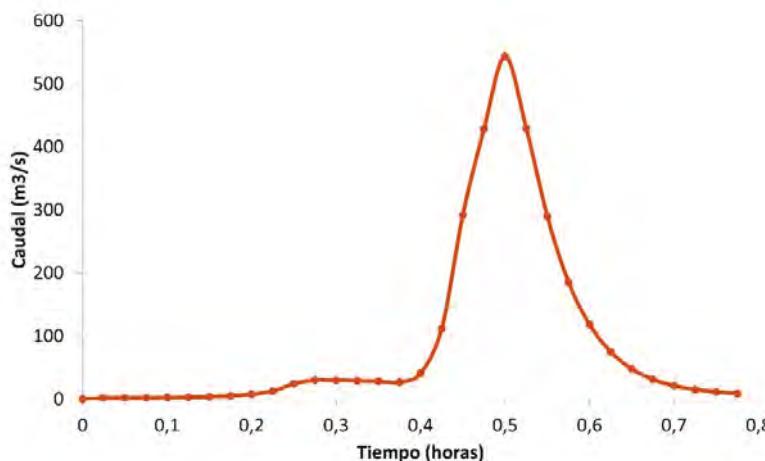
Tabla 53. Área y ancho vs altura embalse

RSA(acres)	4,20	3,79	3,40	2,99	2,30	1,22	0,44	0
HSA (ft)	92,2	79,0	65,8	52,6	39,4	26,2	13,0	0,0
Cota HSA (msnm)	905,2	892,0	878,8	865,6	852,4	839,2	826,0	813,0
HSTW (m)	0,0	13,4	26,6	39,7	52,8	65,9	79,0	92,2
BSTW (m)	0,0	93,6	126,3	151,5	197,7	238,1	267,8	293,5

Fuente: Páez (2016).

Finalmente, se obtuvo un hidrograma de rotura con duración de rotura de 46,5 minutos y un caudal pico de 543 m³/s que se logra a los 3 minutos, como se observa en la figura 73.

Figura 73. *Hidrograma de rotura presa quebrada La Papaya*

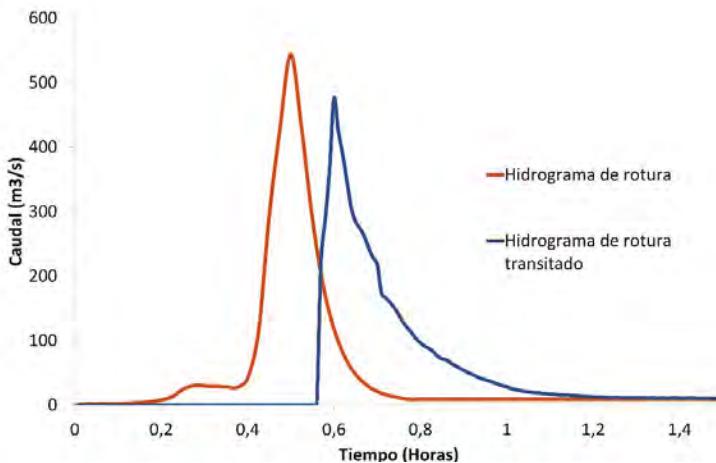


Fuente: Páez (2016).

- **Tránsito hidrograma de rotura**

Teniendo en cuenta que la rotura de la presa en la quebrada La Papaya se presentó 2 km aguas arriba de la desembocadura de este afluente con la quebrada La Negra fue necesario transitar el hidrograma hasta la desembocadura mediante un modelo hidráulico (RIVERFLOW 2D), proceso que será descrito con detalle en el apartado de modelación hidráulica. De tal forma que se obtuvo el hidrograma transitado que se presenta en la figura 74.

Figura 74. Hidrograma de rotura de presa quebrada La Papaya transitado hasta la desembocadura con quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

3.8 EJEMPLO GENERACIÓN DE HIDROGRAMAS LÍQUIDOS Y SÓLIDOS–QUEBRADA LA NEGRA, ÚTICA, CUNDINAMARCA

Una vez se cuenta con los caudales líquidos del modelo hidrológico y las áreas inestables del modelo de deslizamientos, en conjunto con el hidrograma de rotura de la presa de la quebrada La Papaya, se deben generar hidrogramas para cada una de las subcuencas de tal forma que puedan ser ingresados al modelo hidráulico para ser transitados hasta la zona del valle de inundación donde se encuentra el casco urbano del municipio de Útica.

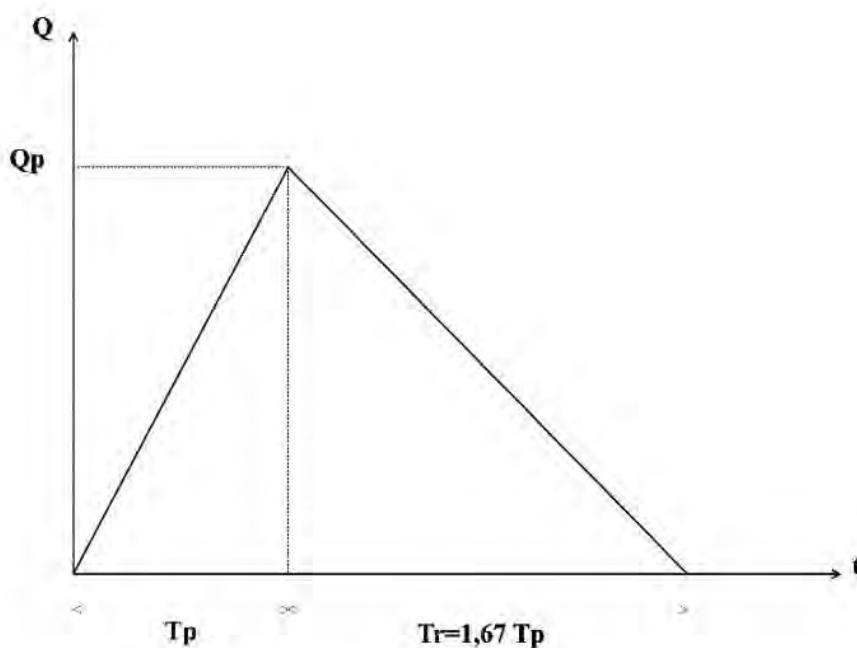
- **Hidrogramas líquidos**

Teniendo en cuenta que se cuenta con información diaria y que no se tiene información de la duración del evento, se generaron hidrogramas sintéticos de avenida para cada una de las 37 subcuencas de la quebrada La Negra, por medio del hidrograma triangular del SCS, el cual posteriormente fue suavizado con una función gamma (Páez, 2016).

Es de aclarar que existen otras metodologías que pueden ser aplicadas para la generación de hidrogramas sintéticos y en caso que se tenga algún conocimiento de la duración del evento se puede complementar el análisis con esta información.

El hidrograma triangular del *Soil Conservation Service* (SCS) de Estados Unidos estima el caudal pico con base en el volumen total de escorrentía, que en este caso corresponde al volumen diario y el tiempo al pico y la duración del hidrograma con base en el tiempo de concentración, como se observa en la figura 75. El tiempo de concentración fue calculado como el promedio de las ecuaciones de Témez, Kirpich y Giandotti (Páez, 2016).

Figura 75. *Hidrograma triangular del SCS*



Fuente: Páez (2016).

$$Q_p = \frac{2Q}{T_p + T_r}$$

$$T_p = 0,7 T_c$$

$$T_r = 1,67 T_p$$

Donde:

Q_p = Caudal pico

Q = Volumen de escorrentía (m³)

T_p = Tiempo al pico (s)

T_r = Tiempo de recesión (s)

T_c = Tiempo de concentración (s)

- **Hidrogramas sólidos**

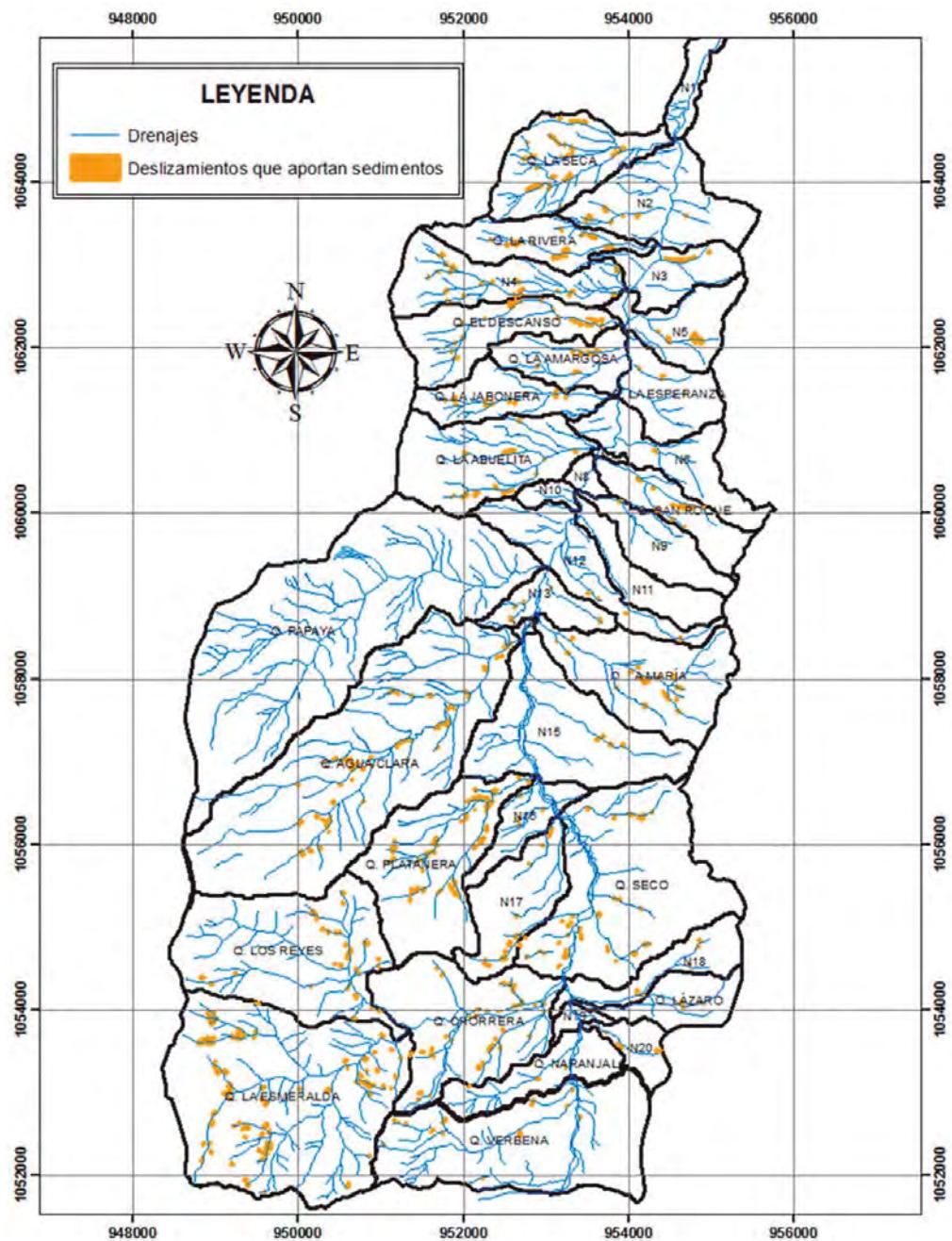
Para la generación de hidrogramas sólidos en primer lugar se seleccionaron los deslizamientos del modelo de taludes infinitos que podían potencialmente aportar sedimentos al cauce, los cuales se presentan en la figura 76.

El volumen deslizado se calculó mediante las relaciones área–volumen para cada unidad geológica, halladas mediante el análisis del inventario de deslizamientos como ya se mencionó anteriormente. Finalmente, el volumen de sedimentos fue calculado teniendo en cuenta la porosidad, de la siguiente forma (Páez, 2016):

$$\text{Volumen sedimentos} = \text{Volumen deslizado} (1 - \text{Porosidad})$$

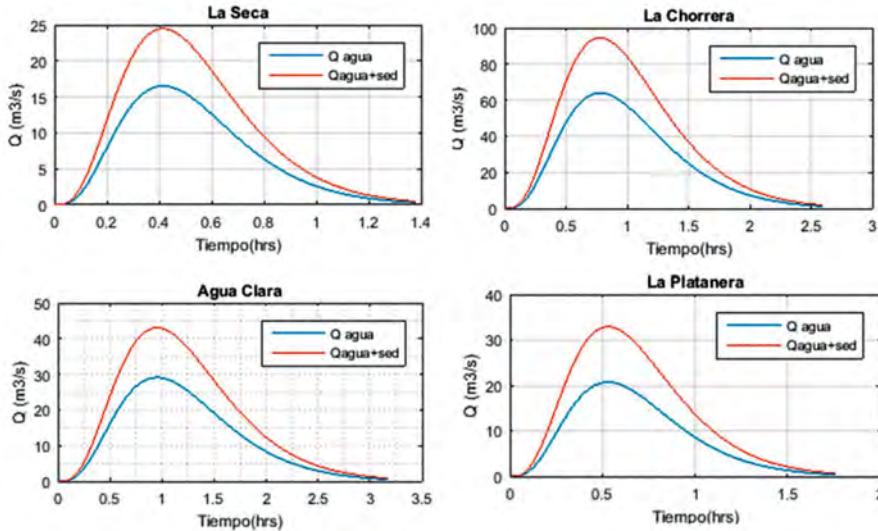
Se asumió una concentración de sedimentos constante a lo largo de todo el hidrograma de tal forma que se generaron hidrogramas sólidos con la misma forma que los hidrogramas líquidos. En la figura 77 se presentan los hidrogramas de agua y avenida torrencial (agua y sedimentos) de algunas de las subcuenca de la parte alta de la quebrada La Negra.

Figura 76. Deslizamientos que potencialmente aportan sedimentos al flujo



Fuente: Páez (2016).

Figura 77. Hidrogramas sintéticos de agua y avenida torrencial subcuenca quebrada La Negra



Fuente: Páez (2016).

3.9 MODELACIÓN HIDRÁULICA DE LA PROPAGACIÓN DE LA AVENIDA Y CALIBRACIÓN DE LA REOLOGÍA

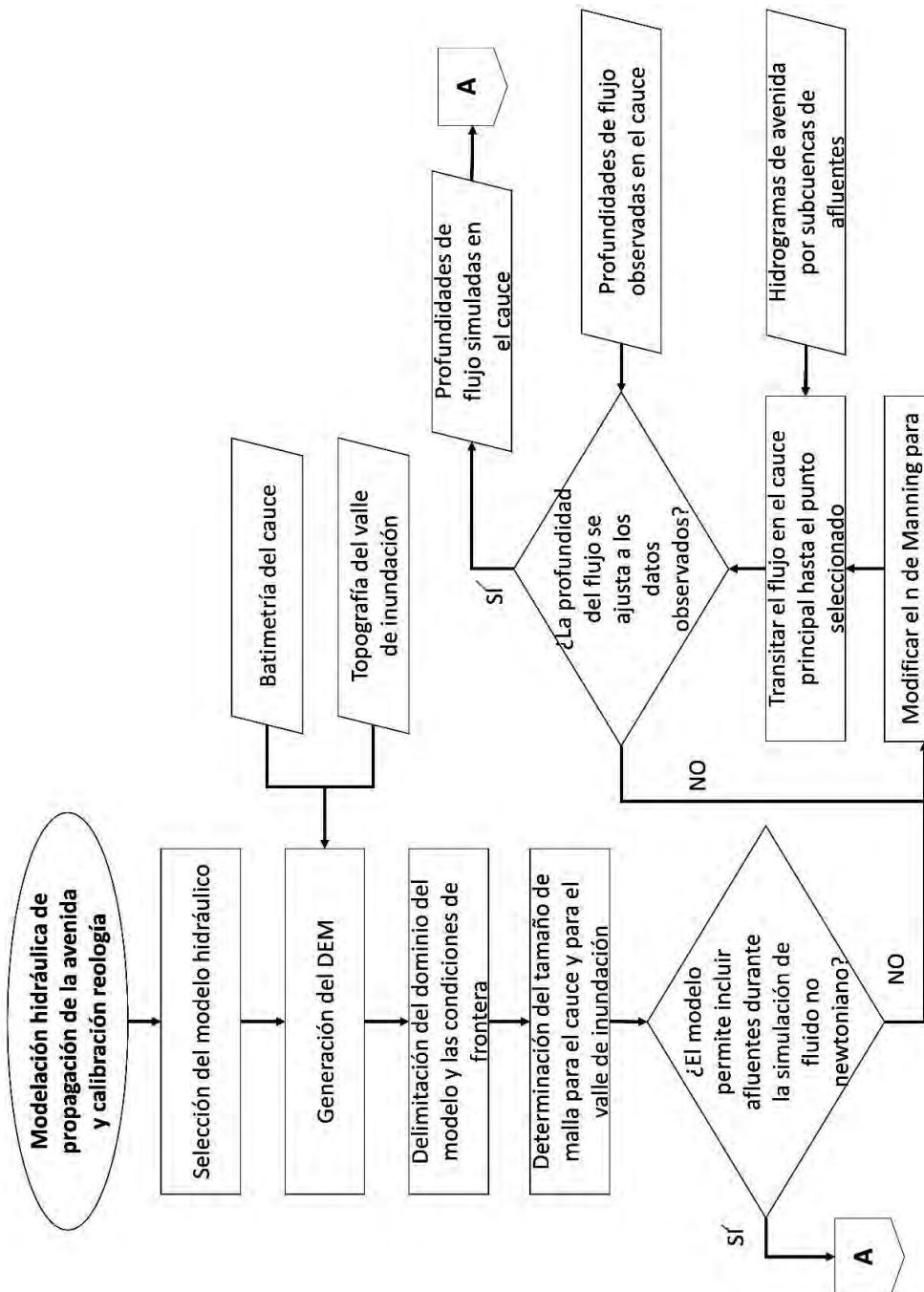
Una vez se cuenta con los hidrogramas de avenida para cada uno de los afluentes es necesario transitar estos caudales por el cauce principal hasta el valle de inundación, para ello se debe utilizar un modelo hidráulico que incluya modelos reológicos. Si bien, para ciertos casos es posible utilizar el modelo de fluido newtoniano, es decir simular como agua con transporte de sedimentos y un n de Manning superior, es recomendable utilizar un modelo hidráulico que incluya modelos de fluido no newtoniano que puedan representar de mejor forma el comportamiento del flujo en el valle de inundación. Así mismo, dependiendo del propósito y nivel de detalle del estudio se recomienda utilizar modelos bidimensionales, ya que estos representan de forma adecuada el comportamiento espacial y temporal del flujo.

En la figura 78 y figura 79, se presenta el diagrama de flujo para el desarrollo de una modelación hidráulica de propagación de la avenida torrencial por el cauce principal y el valle de inundación, sin embargo, se presentan las siguientes aclaraciones:

- Algunos modelos pueden representar la erosión del canal al tiempo que se transita el hidrograma de avenida, lo cual puede representar más adecuadamente la realidad, sin embargo, son muy pocos los modelos que tienen esta capacidad, por lo cual este aspecto no es indispensable para una adecuada modelación.
- Es muy importante que se tenga una muy buena resolución de la topografía del valle de inundación, de tal forma que se minimice la incertidumbre del modelo en esta zona, ya que al ser zonas tan planas el modelo puede caer en inestabilidades o errores sustanciales debido a la resolución de la malla.
- Si el modelo hidráulico permite la aplicación de un modelo reológico mientras ingresan los afluentes se puede realizar el tránsito de esta forma desde la cabecera de la cuenca, sin embargo, generalmente los modelos asumen que al inicio del tramo se encuentra la totalidad del caudal por lo cual no es posible modelar los afluentes mientras se modela la reología. Adicionalmente, es posible que la reología cambie a lo largo de cauce por los aportes de los afluentes y los modelos hidráulicos no tienen la capacidad de modelar estos cambios de reología.
- De acuerdo con lo anterior, se recomienda modelar el tránsito en el canal principal con el aporte de los afluentes como agua con transporte de sedimentos hasta determinado punto del canal principal, donde se evidencie un cambio de pendiente o donde el aporte de afluentes no sea muy relevante y a partir de allí se debe realizar un nuevo tránsito con el modelo reológico seleccionado hasta el valle de inundación.
- Se recomienda realizar un análisis de sensibilidad con dos o más modelos reológicos con el fin de determinar con mayor certeza la reología del flujo, sobre todo en los flujos que se encuentran en el límite de transición de flujo de lodos a flujo hiperconcentrado y de flujo hiperconcentrado a flujo de detritos, ya que la reología juega un papel fundamental en los tiempos de inundación, velocidades y profundidades, lo cual puede generar una diferencia en cuanto al nivel de amenaza. Sin embargo, si se consigue una buena calibración y se tiene cierta certeza del tipo de flujo que se presenta en el cauce se puede obviar este paso.

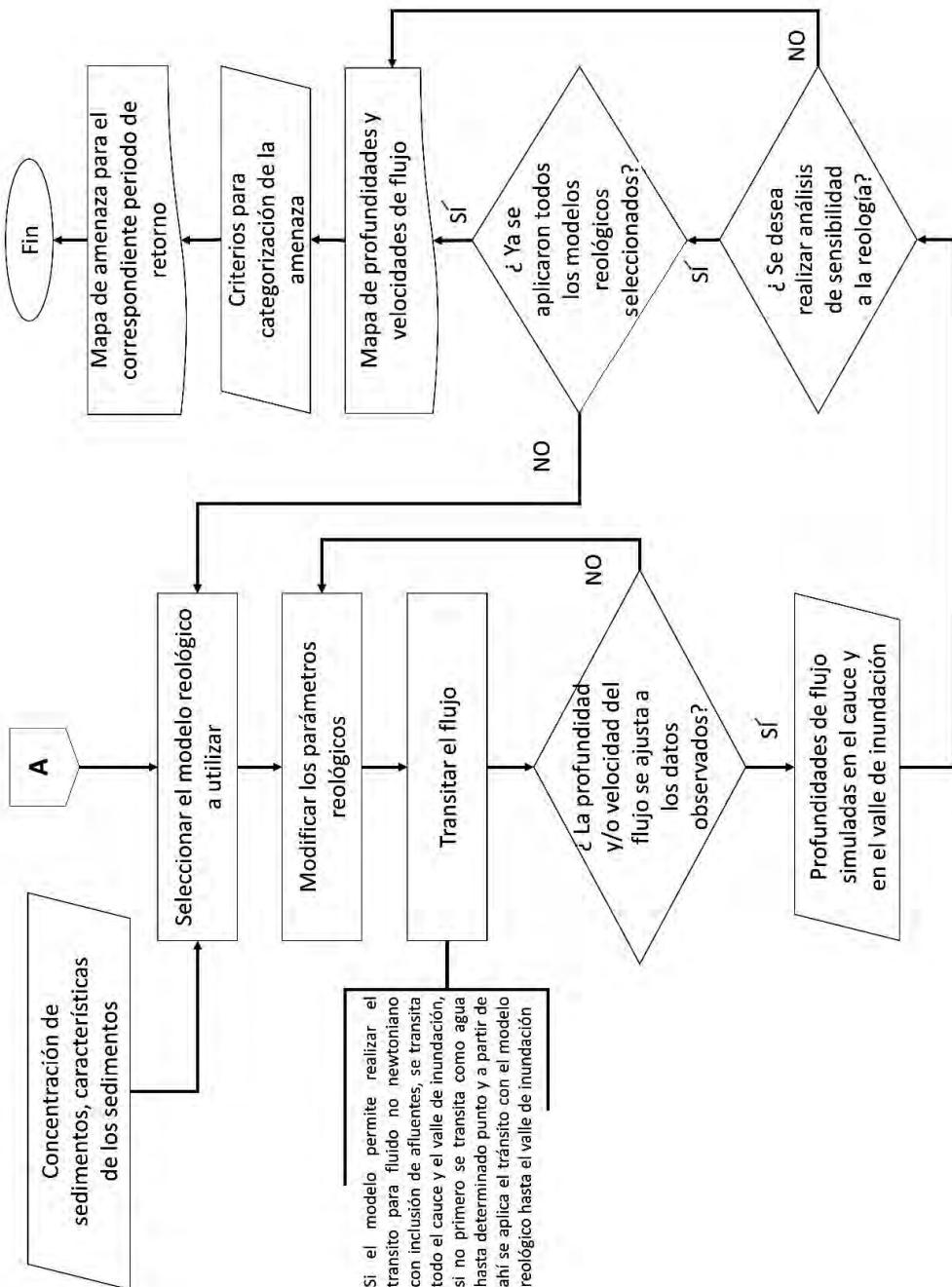
- Los parámetros reológicos siempre son sujetos de calibración, sin embargo, si es posible se debe tratar de contar con información de campo y descripciones del evento para lograr una calibración más satisfactoria.
- Una vez se ha realizado la calibración de la reología es posible generar escenarios de amenaza para diferentes condiciones hidrológicas, teniendo en cuenta que el comportamiento del flujo está determinado por la concentración y el tipo de sedimentos, por lo que una cuenca va a tender a generar eventos con un comportamiento reológico siempre similar (Bateman y Medina, 2019).
- Para generar un completo análisis de amenaza se deben simular escenarios para diferentes periodos de retorno, ya que la modelación hidráulica permite determinar la intensidad del evento, pero la probabilidad de ocurrencia está dada por el periodo de retorno, por lo que en conjunto se construye la amenaza.

Figura 78. Diagrama de flujo modelación hidráulica y calibración de la reología



Fuente: elaboración propia.

Figura 79. Diagrama de flujo modelación hidráulica y calibración de la reología



Fuente: elaboración propia.

3.9.1 MODELOS HIDRÁULICOS

Los modelos hidráulicos de tránsito utilizados para la modelación de avenidas torrenciales son bidimensionales y solucionan las ecuaciones de Navier-Stokes en un esquema de volúmenes finitos, calculada para una malla triangular o rectangular que puede ser de tamaño variable para diferentes zonas del cauce. Las ecuaciones de aguas poco profundas se describen por medio de las ecuaciones de momentum y conservación de la masa expresadas de la siguiente forma (Hydroina, 2014):

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} + \frac{\partial G(U)}{\partial y} = S(U, x, y)$$

$$U = (h, q_x, q_y)^T, q_x = uh, q_y = vh$$

$$F = \left(q_x, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} gh^2, \frac{q_x q_y}{h} \right)^T$$

$$G = \left(q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2} gh^2 \right)^T$$

$$S = \left(o, gh(S_{ox} - S_{fx}), gh(S_{oy} - S_{fy}) \right)^T$$

$$S_{ox} = -\frac{\partial z_b}{\partial x}, S_{oy} = -\frac{\partial z_b}{\partial y}$$

$$S_{fx} = \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}, S_{fy} = \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}}$$

Donde:

u, v = Componentes de la velocidad en las coordenadas **x, y**

$\frac{1}{2} gh^2$ = Término que se obtiene a partir de una distribución hidrostática de presiones

n = Coeficiente de rugosidad de Manning

Por otra parte, algunos modelos incluyen el transporte de sedimentos expresado de la siguiente forma (Hydroina, 2014):

$$\frac{\partial(h\phi_p)}{\partial t} + \frac{\partial(hu\phi_p)}{\partial x} + \frac{\partial(hv\phi_p)}{\partial x} = R_p$$

Cambio en la elevación del lecho:

$$\frac{\delta z(1 - p_p)}{\delta t} = - \sum_{p=1}^{N_p} w_{sp}(\phi_{*p} - \phi_p)$$

Donde:

ϕ_{*p} = Concentración de sedimentos en volumen de equilibrio

ϕ_p = Concentración de sedimentos en suspensión

w_{sp} = Velocidad de sedimentación

En la tabla 54 se presenta la comparación de algunos de los modelos hidráulicos más útiles para la modelación de avenidas torrenciales.

Teniendo en cuenta que el modelo utilizado RIVERFLOW2D no permite realizar el tránsito con afluentes y a la vez aplicando modelos reológicos de fluidos no newtonianos se dividió el tránsito en dos tramos

Tabla 54. Comparación de modelos hidráulicos para avenidas torrenciales

Modelo	¿Incluye procesos in-channel o transporte de sedimentos?	Interfaz	¿Gratis?	Modelos reológicos incluidos	Recomendado para tipos de flujo
Debris Dices	Ninguno	GNU acoplado a GIS	Sí	N/A	Cualquiera siempre que se tengan datos para calibración
RIVERFLOW2D	Transporte de sedimentos de fondo y suspensión	Propia acoplada a QGIS y ArgusOne	No / Versión gratuita limitada	Manning	
				Full Bingham	
				Bingham simplificado	Flujos de lodo
				Manning y Coulomb	Flujos hipercentrados
				Manning con esfuerzo de cedencia	Flujos de detritos
				Coulomb con esfuerzo de cedencia	
FLO2D	Transporte de sedimentos de fondo y suspensión	Propia acoplada a QGIS	Sí / Versión Pro de pago	Quadrático	Flujos de lodo
				Granular	Flujos hipercentrados

Modelo	¿Incluye procesos in-channel o transporte de sedimentos?	Interfaz	¿Gratis?	Modelos reológicos incluidos	Recomendado para tipos de flujo
FLATModel	Procesos in-channel	Fortran	Sí	Bingham	Flujos de lodos
				Herschel Bulkey	Flujos hiperconcentrados
				Voellmy	Flujos de detritos
RAMMS	Ninguno	Propia	Sí	Voellmy	Flujos hiperconcentrados
					Flujos de detritos
AVAFLOW	Flujo de dos fases Procesos in-channel	Acoplada a QGIS	Sí	N/A	Flujos hiperconcentrados
					Flujos de detritos
TELEMAC MAS-CARET	Transporte de sedimentos de fondo y suspensión	Fortran	Sí	Manning	Flujos hiperconcentrados

Fuente: elaboración propia.

3.10 EJEMPLO MODELACIÓN HIDRÁULICA-QUEBRADA LA NEGRA, ÚTICA, CUNDINAMARCA

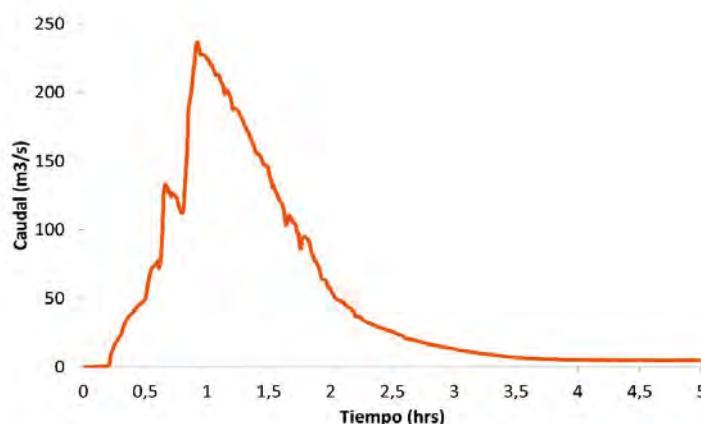
Teniendo en cuenta que el modelo utilizado RIVERFLOW2D no permite realizar el tránsito con afluentes y a la vez aplicando modelos reológicos de fluidos no newtonianos

se dividió el tránsito en dos tramos. El primero desde la cabecera de la quebrada La Negra hasta justo antes de la desembocadura de la quebrada La Papaya y el segundo desde la desembocadura de la quebrada La Papaya hasta el valle de inundación, en este último tramo se implementaron los diferentes modelos reológicos que serán mencionados más adelante (Páez, 2016).

- **Tránsito del primer tramo (cabecera-desembocadura quebrada La Papaya)**

En el primer tramo se transitó el flujo de avenida con el modelo de Manning incluyendo todos los hidrogramas sintéticos de los afluentes que se encuentran aguas arriba de la quebrada La Papaya. El n de Manning fue calculado con las ecuaciones de Strickler y de Meyer-Peter y Müller, para las 2 granulometrías de lecho disponibles, obteniendo un n de Manning promedio para el cauce de 0,021 (Páez, 2016). En la figura 80 se presenta el hidrograma transitado sobre la quebrada La Negra hasta justo antes de la desembocadura de la quebrada La Papaya.

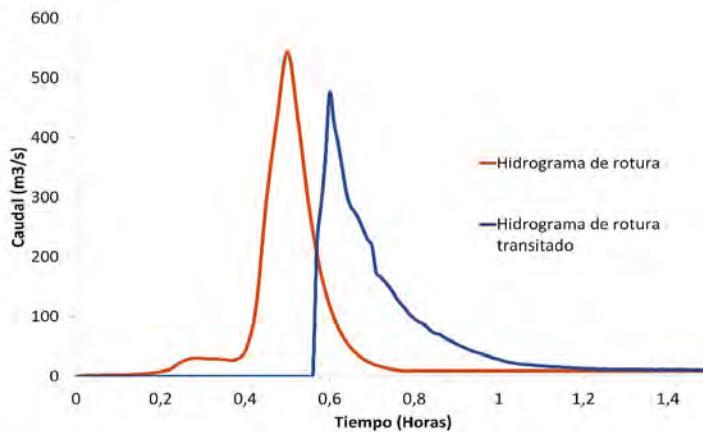
Figura 80. *Hidrograma transitado hasta el fin del tramo 1*



Fuente: Páez (2016).

Al hidrograma transitado para el tramo 1 se le sumaron los hidrogramas de rotura de presa y los hidrogramas sintéticos de los afluentes aguas debajo de la quebrada La Papaya, obteniendo el hidrograma de avenida torrencial que se presenta en la figura 81, el cual fue transitado con diferentes reologías hasta el valle de inundación.

Figura 81. Hidrograma de avenida torrencial a transitar en el tramo 2



Fuente: Páez (2016).

- **Tránsito del segundo tramo (desembocadura quebrada La Papaya a valle de inundación), calibración y comparación de modelos reológicos**

De acuerdo con los hidrogramas calculados anteriormente se determinó que la concentración media de sedimentos es del 32 % en volumen con gran cantidad de sedimentos finos, por lo cual el flujo se encuentra entre flujo de lodos y flujo hiperconcentrado granular, por lo cual se realizó el tránsito del tramo 2 hasta el valle de inundación con los siguientes modelos reológicos (Páez, 2016).

- Manning sin transporte de sedimentos
- Manning con transporte de sedimentos
- Full Bingham
- Modelo cuadrático

En la tabla 55 se presentan los parámetros reológicos calibrados para cada uno de los modelos, donde se observa que para lograr simular condiciones de avenida torrencial de tipo flujo hiperconcentrado con fluido newtoniano se debe recurrir a n de Manning muy superiores a los usuales para el agua con valores entre 0,08 y 0,12.

Tabla 55. Resultados de la calibración de los parámetros reológicos

Modelo reológico	Parámetro	Valor
Manning sin transporte de sedimentos	n de Manning	0,08
	n de Manning	0,12
Manning con transporte de sedimentos	Diámetro medio de los sedimentos (mm)	0,01
	Esfuerzo cortante de cedencia (N/m ²)	320
	Viscosidad de Bingham (Pa*s)	5
Full Bingham	Densidad (kg/m ³)	2 200
	Esfuerzo cortante de cedencia (N/m ²)	320
	Viscosidad (Pa*s)	5
Modelo cuadrático	Densidad (kg/m ³)	2 200
	n de Manning	0,035

Fuente: Páez (2016).

Por otra parte, en la tabla 56 se presentan las profundidades medidas en el valle de inundación vs las profundidades máximas simuladas para cada modelo reológico, donde se observa que todos los modelos seleccionados se ajustan relativamente bien a la realidad, sin embargo, en la tabla 57 se presenta la raíz del error cuadrático medio (RSME) el cual va de 0 a infinito, donde se observa que todos los modelos tienen errores pequeños, pero el que mejor se ajusta es el de Manning con transporte de sedimentos, lo cual confirmaría que se trata de un flujo hiperconcentrado con una alta carga de sedimentos finos.

Tabla 56. Profundidades medidas vs simuladas en el valle de inundación

Profundidad medida (m)	Profundidad máxima simulada (m)			
	Manning sin transporte de sedimentos	Manning con transporte de sedimentos	Full Bingham	Modelo cuadrático
0,7	0,716	0,808	0,563	0,455
0,8	0,541	0,604	0,428	0,427
0,9	0,624	0,697	0,488	0,443
0,9	0,482	0,859	0,360	0,31
0,3	0,488	0,538	0,607	0,526
1,5	0,357	0,532	0,349	0,35
0,3	0,671	0,426	0,885	1,082
0,5	0,605	0,669	0,930	0,715
1,0	0,769	0,752	0,392	0,715
1,5	0,642	0,904	0,689	0,638
1,0	0,181	0,727	0,492	0,421
0,4	0,831	0,137	0,657	0,528
0,5	0,268	0,452	0,434	0,403
1,0	0,441	0,264	1,082	1,303
0,3	0,670	0,496	0,340	0,26
0,2	0,713	0,773	0,801	1,179
0,5	0,785	0,769	0,581	0,472

Profundidad medida (m)	Profundidad máxima simulada (m)			
	Manning sin transporte de sedimentos	Manning con transporte de sedimentos	Full Bingham	Modelo cuadrático
1,0	0,482	0,114	0,155	0,113
0,5	0,697	0,826	0,509	0,501

Fuente: Páez (2016).

Tabla 57. RSME para los modelos reológicos seleccionados

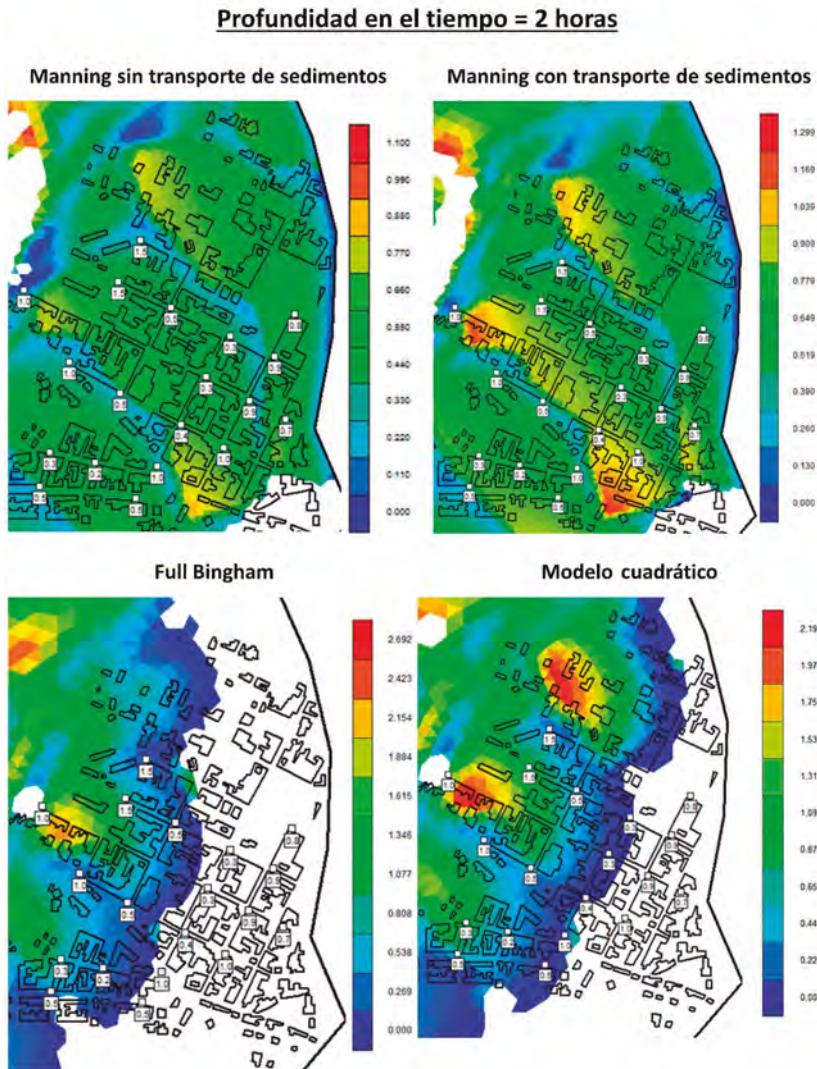
Modelo reológico	RSME
Manning sin transporte de sedimentos	0,113
Manning con transporte de sedimentos	0,099
Full Bingham	0,118
Modelo cuadrático	0,127

Fuente: adaptado de Páez (2016).

Como se mencionó anteriormente todos los modelos representaron adecuadamente las profundidades máximas, sin embargo, existen diferencias sustanciales en la duración del evento y la distribución de velocidades como se observa en la figura 82 a la figura 85.

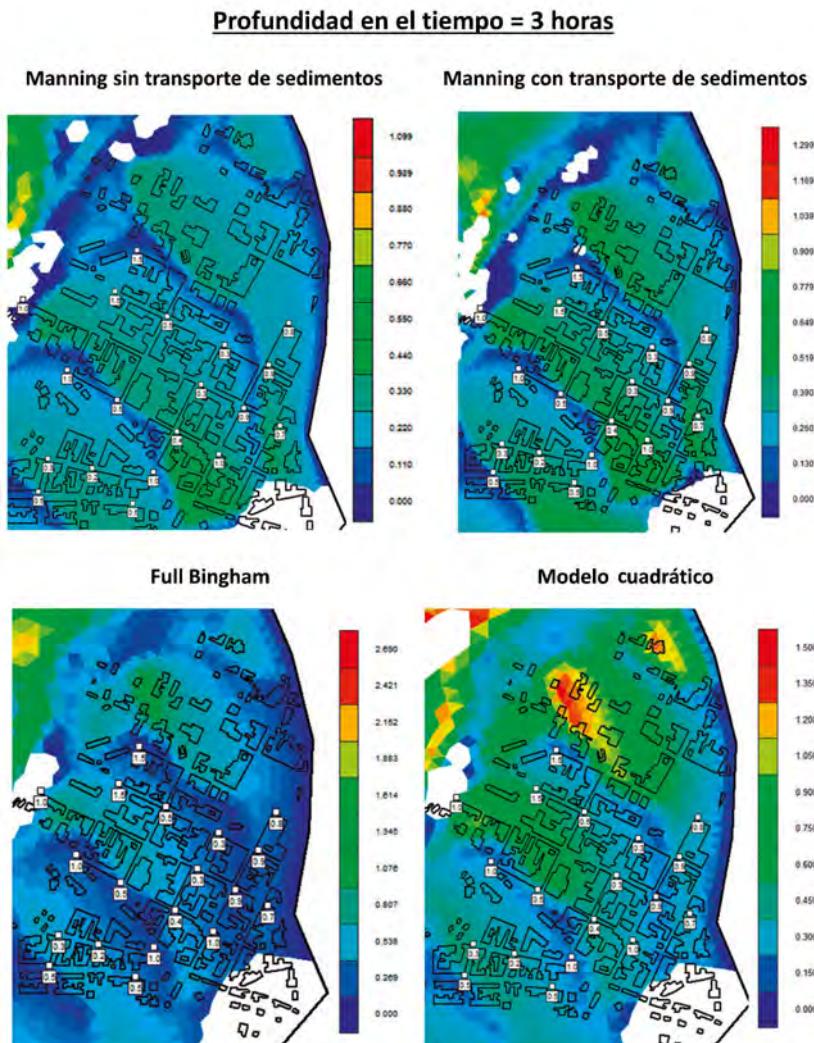
Se observa que los modelos de flujos viscosos como el Bingham y el cuadrático generan mayores profundidades, pero menores velocidades y a su vez mayores tiempos de tránsito. Mientras que los modelos de Manning generan menores profundidades y mayores velocidades de flujo.

Figura 82. Comparación de profundidades simuladas para cada modelo reológico en el $t=2$ horas



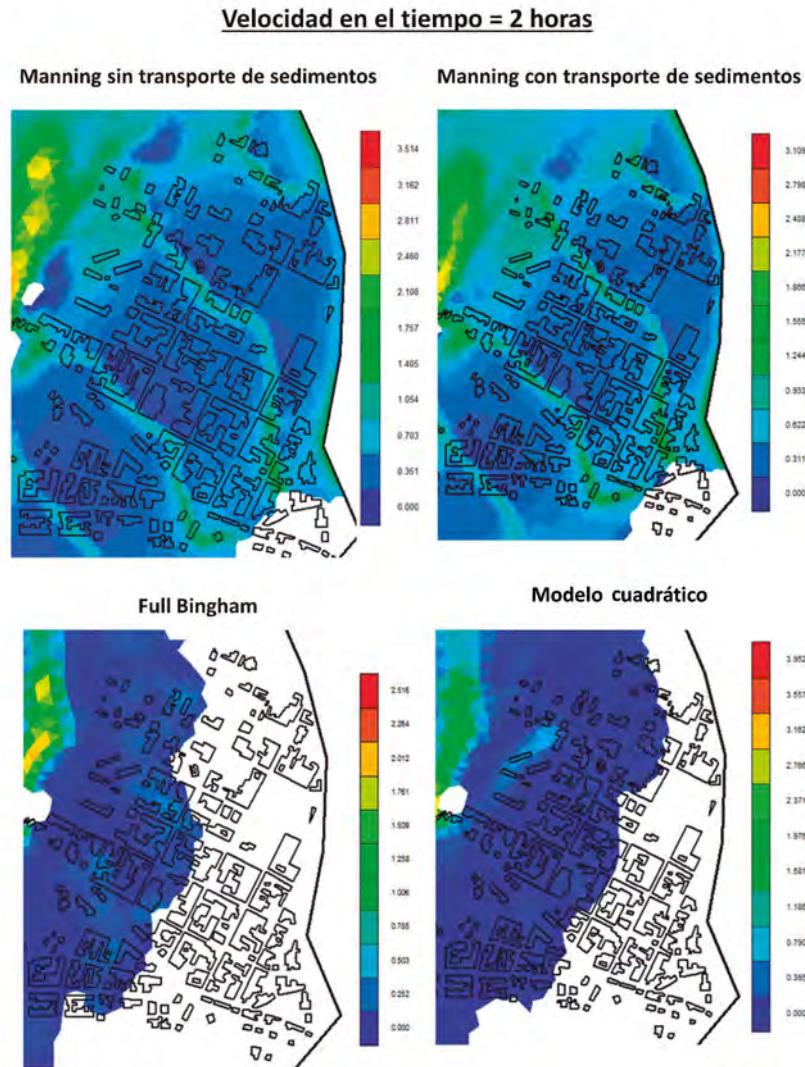
Fuente: Páez (2016).

Figura 83. Comparación de profundidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 3$ horas



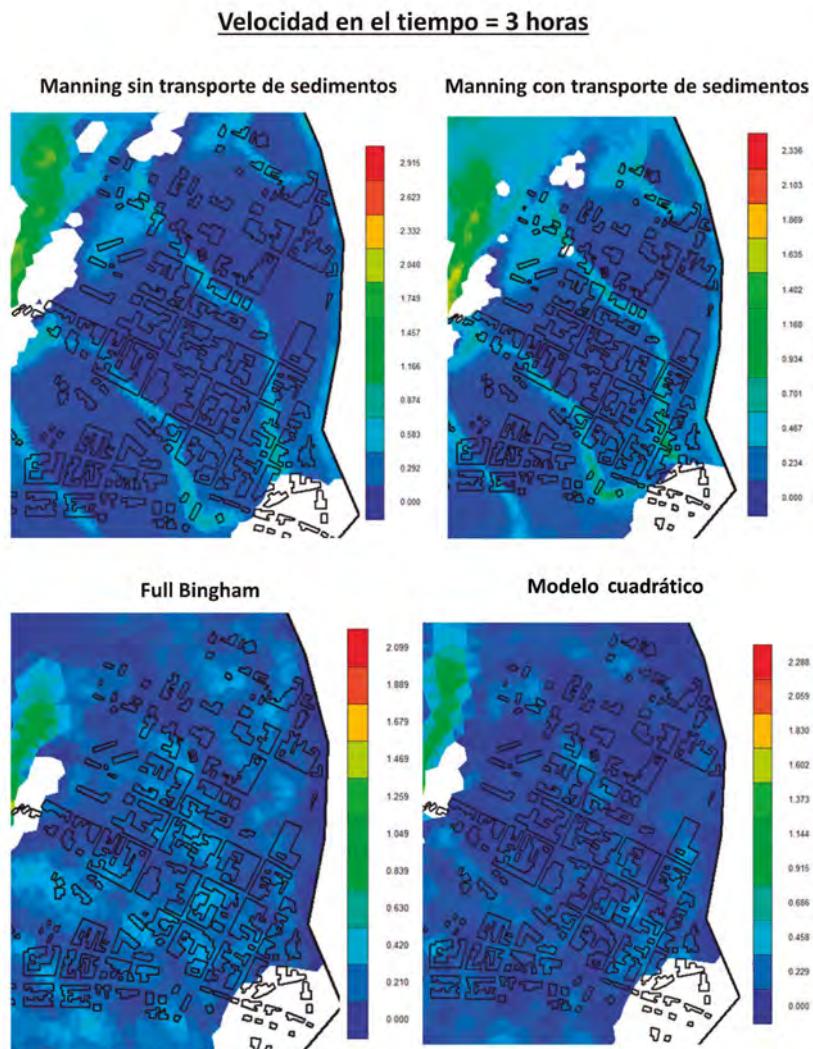
Fuente: Páez (2016).

Figura 84. Comparación de velocidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 2$ horas



Fuente: Páez (2016).

Figura 85. Comparación de velocidades simuladas para cada modelo reológico en el $t = 3$ horas



Fuente: Páez (2016).

3.11 GENERACIÓN DEL MAPA DE AMENAZA

Como se ha mencionado anteriormente, para generación de un mapa de amenaza robusto se debe incluir tanto la intensidad calculada mediante la modelación como la probabilidad representada como cada uno de los períodos de retorno, teniendo en cuenta lo siguiente:

$$\text{Amenaza} = \text{Intensidad} * \text{Probabilidad de ocurrencia}$$

Rickenmenn (2005) y Loat y Petrascheck (1997) clasifican la intensidad del evento dependiendo de la profundidad y velocidad del flujo y finalmente la amenaza de acuerdo con la probabilidad de ocurrencia conforme a los períodos de retorno, teniendo en cuenta probabilidad alta como periodo de retorno de 10 años, media de 100 años y baja de 500 años (Bateman y Medina, 2019); como se observa en la tabla 58.

Sin embargo, estos períodos de retorno pueden ser variables según el criterio del evaluador, siguiendo algunas recomendaciones de especialistas no debe aceptarse una amenaza mayor a 100 años de periodo de retorno, por lo cual podría reescalarse esta categorización con probabilidad de ocurrencia alta para 10 o 20 años de periodo de retorno, media para 50 años y baja para 100 años.

Tabla 58. Matriz de categorización de la intensidad y amenaza por avenidas torrenciales

Intensidad	Loat y Petrascheck (1997)	Rickenmenn (2005)	Categoría intensidad	Probabilidad de ocurrencia (periodo de retorno)		
				Alta	Media	Baja
h>1,0 m	h>1,0 m					
y		o	Alta	Alta	Alta	Moderada
v>1,0 m/s		v>1,5 m/s				
h<1,0 m	h<1,0 m					
o		y	Media	Moderada	Moderada	Baja
v<1,0 m/s		0,4<v<1,5 m/s				
		h<0,4 m				
No existe		y	Baja	Baja	Baja	Muy baja
		v<0,4 m/s				

Fuente: Bateman y Medina (2019).



CAPÍTULO

ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD Y RIESGO



Denisse Viviana Cortés Castillo

4.1 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD

El análisis de la vulnerabilidad de un sistema, es un paso importante en los planes de gestión del riesgo. Aunque la vulnerabilidad tiene varias definiciones, en este caso se asume como

la condición en virtud de la cual una población está expuesta o en peligro de estar afectada por un fenómeno natural o antrópico, y se refiere también a la capacidad de esta población para recuperarse de los efectos de un desastre (Centro Humboldt, 2004, p. 10).

Caracterizar la vulnerabilidad de una población implica entonces determinar los factores o dimensiones que intervienen e incrementan la condición de vulnerabilidad intrínseca del sistema.

Generalmente la vulnerabilidad se tipifica según los elementos expuestos al evento, siendo comunes la vulnerabilidad física, social, económica y ambiental. Sin embargo, dependiendo el modelo, estas categorías pueden cambiar o integrarse. A continuación, se describen las principales metodologías para el análisis y la valoración de vulnerabilidad en el marco de los Planes de Gestión del Riesgo.

4.1.1 ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN POMCAS BASADO EN MODELOS DE ÍNDICES E INDICADORES

Esta metodología ha sido integrada en el Protocolo para la incorporación de la Gestión del Riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas. En esta metodología, la vulnerabilidad se relaciona con tres elementos principales que son: la exposición de las poblaciones a la amenaza, la susceptibilidad física de los elementos expuestos a ser afectados por la ocurrencia de un evento y falta de resiliencia de las comunidades para responder ante un desastre o absorber su impacto (Minambiente, 2014).

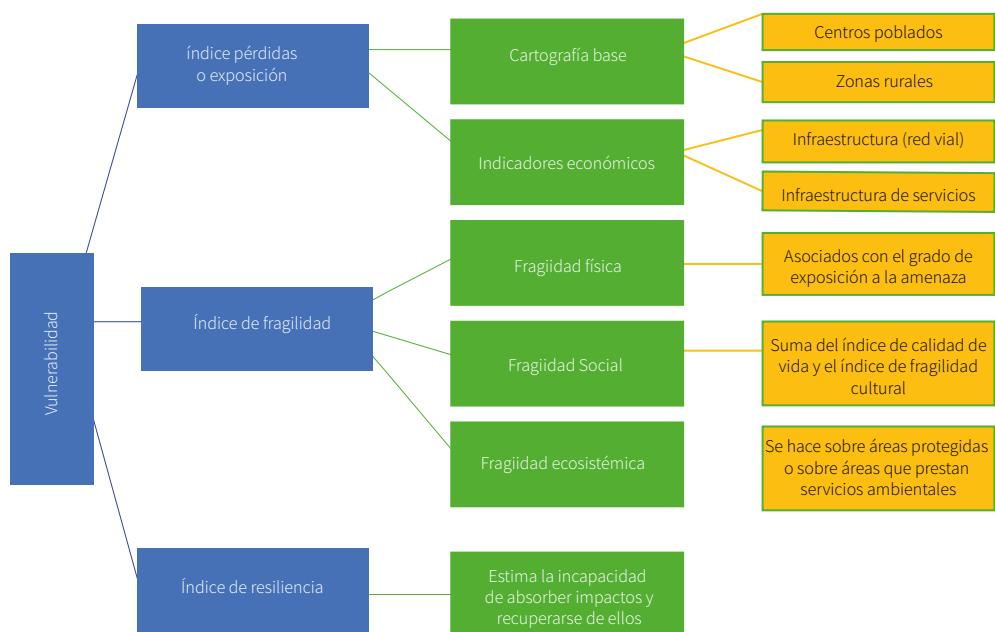
Según esta metodología, cada uno de los aspectos mencionados anteriormente se evalúa como un índice dentro del análisis de la vulnerabilidad, de modo que mediante el uso de índices la vulnerabilidad responde a la siguiente expresión:

$$\text{Vulnerabilidad} = \frac{\text{Índice de pérdidas o índice de exposición} * \text{Índice de fragilidad}}{\text{Índice de resiliencia}}$$

El índice de pérdida o exposición corresponde al inventario de bienes naturales o elementos expuestos que pueden ser afectados por los diferentes eventos amenazantes y se expresa en términos de activos y de población. El modelo puede evaluarse con diferentes niveles de resolución y cuando no se cuenta con información al detalle es necesario realizar estimaciones aproximadas que representen o den cuenta de dicho inventario de activos expuestos en forma aproximada.

El índice de fragilidad para los POMCAS se refiere al grado de fragilidad de los diferentes elementos y sectores (económico, social y ambiental) para soportar el embate de los eventos. Como se observa en la figura 86 existen tres tipos de fragilidad. La fragilidad física se refiere a la condición de susceptibilidad de los asentamientos humano; la fragilidad social se relacionada con la predisposición que surge como resultado del nivel de marginalidad y segregación social del asentamiento humano y sus condiciones de desventaja; y la fragilidad ecosistémica que se relaciona principalmente con el nivel de amenaza presente en áreas protegidas o en áreas que prestan servicios ambientales.

Figura 86. Metodología de POMCAS basado en Modelos de índices e indicadores



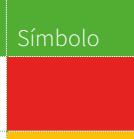
Fuente: elaboración propia.

El índice de resiliencia como factor de vulnerabilidad se refiere a la falta de resiliencia o, en otras palabras, a la falta de capacidad para enfrentar el impacto de los fenómenos amenazantes. Por esta razón, se relaciona con el nivel de desarrollo y la existencia explícita de una gestión del riesgo, por lo que este índice se puede representar mediante indicadores de gobernabilidad, protección financiera, capital humano, desarrollo tecnológico, etc. (Minambiente, 2014).

Cada índice presenta se desglosa en indicadores que permiten valorar independientemente los factores que pueden llegar a intervenir ante un evento de amenaza y que facilitan su evaluación en el terreno. Es importante que los indicadores para la descripción del grado de exposición, la fragilidad y la resiliencia se formulen de tal forma que otorguen confiabilidad a los datos recopilados, por lo tanto, se debe procurar evitar el uso repetido del mismo indicador pues se le estaría dando un mayor peso respecto de los demás.

Todos los índices antes mencionados se valoran en un rango de 0-1 de modo que el índice de vulnerabilidad resultante presenta tres categorías que oscilan entre baja y alta, tal como se detalla en la tabla 59.

Tabla 59. Categorías del índice de vulnerabilidad en la metodología empleada en POMCAS

Valor	Categoría índice de vulnerabilidad (IV)	Símbolo
0,75 - 1	Alta	
0,30 – 0,75	Media	
0 – 0,30	Baja	

Fuente: Minambiente (2014).

4.1.2 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD BASADA EN DIMENSIONES

La vulnerabilidad en término de dimensiones ha sido empleada en el libro de *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá* (Universidad Nacional de Colombia, 2009). En este documento se consideran cinco dimensiones que son:

- **Dimensión físico-espacial:** relacionada con los temas de las edificaciones y sus condiciones.
- **Dimensión social:** relativa a los aspectos de demografía, migración, educación, salud, seguridad alimentaria y organización.
- **Dimensión económica:** que aborda aspectos como el empleo, ingreso, tenencia, entre otros.
- **Dimensión cultural:** se relaciona con asuntos de representación del riesgo, comunicaciones y acciones en la materia.
- **Dimensión institucional:** relativa con la gestión económica, financiera e institucional municipal, es analizada a escala macro.

Para cada dimensión se definen indicadores específicos, los cuales se detallan en la figura 87. En cada indicador se debe definir la escala de análisis en la cual se trabajará (micro, meso o macro). De acuerdo con el documento antes mencionado, las cuatro primeras dimensiones se pueden trabajar a escala micro y meso, mientras que la última dimensión (institucional) se puede trabajar a escala macro (Universidad Nacional de Colombia, 2009).

En la escala micro, se consideran todos los aspectos que se analizan a partir de la información proveniente del censo y de la encuesta de hogares; en la escala meso, todo lo que se analiza a nivel de los asentamientos en el trabajo de campo o que proviene de información primaria o secundaria acerca de los barrios; y en la escala macro, todo lo que proviene de información primaria o secundaria obtenida a escalas municipal o metropolitana.

Para cada dimensión se definen indicadores específicos, los cuales se detallan en la figura 87. En cada indicador se debe definir la escala de análisis en la cual se trabajará (micro, meso o macro).

Figura 87. Dimensiones e indicadores para el análisis de la vulnerabilidad



Fuente: elaboración propia.

La propuesta indicadores lleva a la construcción de unos factores que se denominan “cruces” en los que se pueden relacionar aspectos; así, la fragilidad se obtiene a partir de los cruces entre solvencia económica, conocimiento, capacidades sociales, marginalización, dinámicas migratorias y características de la vivienda; la exposición depende de los cruces entre localización y relaciones ecosistémicas; y la capacidad de respuesta y recuperación está dada por los cruces entre solvencia económica, capacidades sociales y oportunidades del territorio (Universidad Nacional de Colombia, 2009).

Es importante resaltar que los factores son interdependientes al igual que los cruces, y que permiten orientar la gestión al relacionar distintos aspectos de los asentamientos y entender la conexión entre aspectos sociales, físico-espaciales, económicos y políticos.

En esta metodología, los rangos de vulnerabilidad van del 0 al 10 y se definen de la siguiente manera:

Tabla 60. *Rangos de vulnerabilidad en la metodología basada en dimensiones*

Rango	Clasificación
0 - 2	bajo
2 - 4	medio bajo
4 - 6	medio
6 - 8	medio alto
8 - 10	alto

Fuente: adaptado de Universidad Nacional de Colombia (2009).

4.1.3 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD: CASO SALGAR ANTIOQUIA

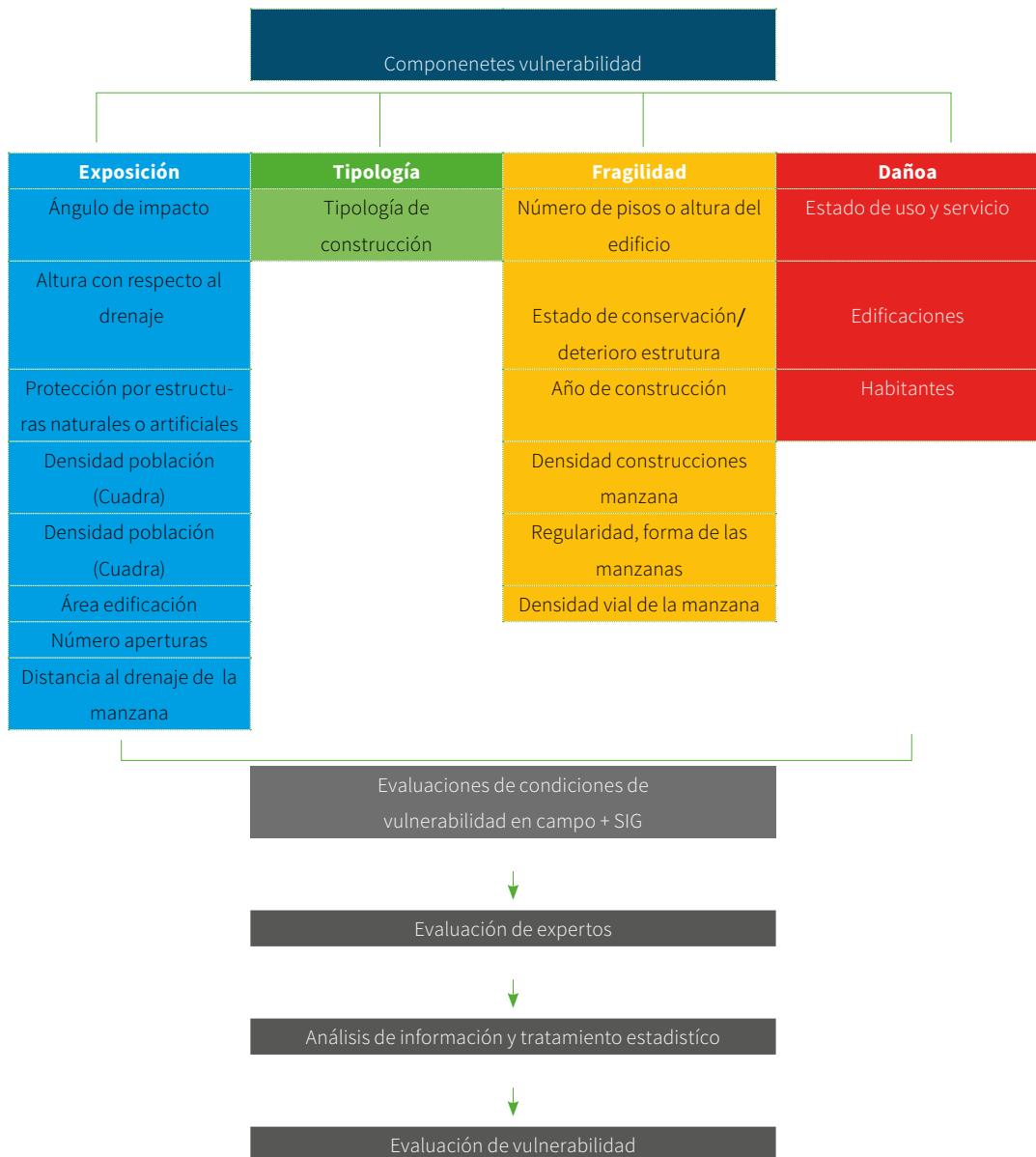
La metodología propuesta en la conferencia titulada “Evaluación de la vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales. Caso de estudio: cabecera urbana del municipio de Salgar (Antioquia)” de Cañas-Gómez et al. (2017) menciona como componentes de la vulnerabilidad la exposición, la tipología, la fragilidad y los daños.

La exposición incluye aspectos relacionados con la densidad poblacional a diferentes escalas: edificación, cuadra, área de la edificación, protección por estructuras naturales o artificiales, entre otras. Por su parte la tipología se refiere a la caracterización de las construcciones en la zona de interés, incluyendo tipos de material, reforzamiento y calidad.

El tercer componente, fragilidad, tiene en cuenta el número de pisos de las edificaciones, el estado de conservación (deterioro), edad de las construcciones, densidad vial y densidad de las edificaciones por manzana.

Finalmente, el componente de daños contempla tres indicadores, el estado de uso y servicio, las edificaciones y los habitantes (figura 88).

Figura 88. Evaluación de vulnerabilidad en el caso Salgar



Fuente: elaboración propia.

Las condiciones de vulnerabilidad se deben evaluar en campo para poder construir modelos cartográficos que permitan visibilizar grados de vulnerabilidad en la zona de interés. Así mismo, la evaluación en campo debe ayudar a identificar los factores que

pueden jugar un papel preponderante en la vulnerabilidad de una zona ante eventos de amenaza.

4.1.4 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD EN CENTROS URBANOS (PERÚ)

La metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones y sismos, de las edificaciones en centros urbanos, es la metodología propuesta por el Centro de Estudios y prevención de Desastres del Perú (Lozano-Cortijo, 2008). Esta metodología requiere contar con la evaluación de amenazas y un diagnóstico físico del centro urbano en estudio para poder ser aplicada. Aunque la metodología de análisis de vulnerabilidad se centra en inundaciones, esta puede ser aplicada en el caso de las avenidas torrenciales.

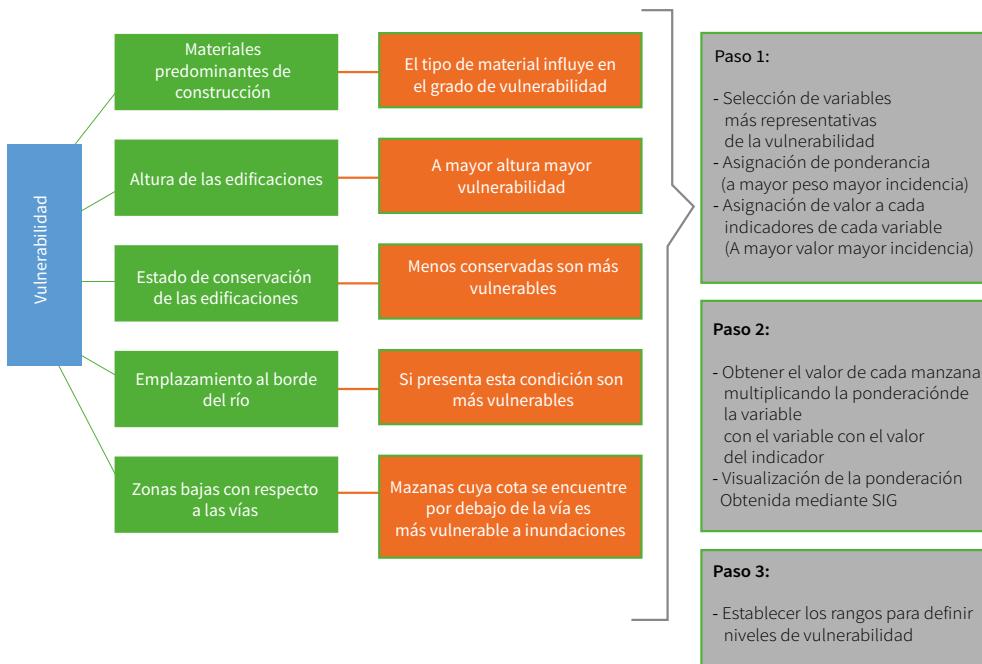
El análisis propuesto en este documento incluye el uso de dos metodologías complementarias. Por un lado, una metodología cualitativa mediante la cual se identifican las manzanas o lotes con indicadores críticos de las variables seleccionadas para el análisis, comparándolas con las zonas de amenaza; de manera que se obtengan niveles de vulnerabilidad y riesgo a la vez (Lozano-Cortijo, 2008).

La segunda metodología es de tipo heurística, en la cual se asigna una ponderación a cada variable seleccionada, según su importancia ante inundaciones (o avenida torrencial), así como la asignación de un valor a cada indicador de cada variable, según su nivel de criticidad. Finalmente, los niveles de vulnerabilidad de cada manzana quedan establecidos mediante rangos (Lozano-Cortijo, 2008).

En la figura 89, se definen las variables e indicadores propuestos. Dentro de las variables se destacan los materiales de construcción, altura de edificaciones, estado de conservación de las edificaciones, relación de la zona con respecto a ríos o cuerpos de agua y cota de altura de la zona de interés respecto a las vías.

La relación de las variables con respecto a la vulnerabilidad establece una relación directamente proporcional entre la altura de las edificaciones y el estado de conservación con el nivel de vulnerabilidad. Por otro lado, la cota de altura de las edificaciones con respecto a las vías presenta una relación inversa con respecto a la vulnerabilidad (Lozano-Cortijo, 2008); la vulnerabilidad será mayor en la medida que las edificaciones se encuentren en cotas inferiores a las vías.

Figura 89. Análisis de vulnerabilidad en centros urbanos – PREDES



Fuente: elaboración propia.

Se recomienda realizar el análisis en forma gráfica, dividiendo la ciudad por sectores y comparando los mapas temáticos. La metodología se define como sencilla y fácil de implementar, especialmente para centros urbanos pequeños, donde es posible identificar específicamente los frentes de manzana y lotes que son vulnerables y se encuentran en riesgo.

4.1.5 METODOLOGÍA DE INGEOMINAS: CASO DE ESTUDIO PRADERA VALLE

La metodología para análisis de vulnerabilidad empleada por INGEOMINAS en el caso Pradera Valle se basa en inundaciones, pero su sustento teórico se puede emplear en avenidas torrenciales. Este análisis es retrospectivo y emplea fotografías y videos para identificar los modos de daños de elementos expuestos ante eventos de amenaza.

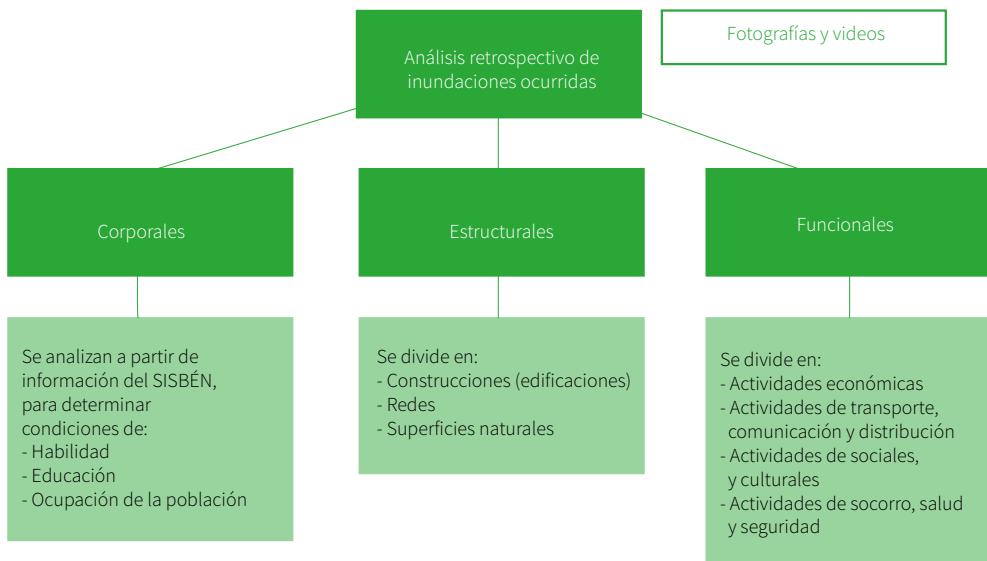
Los elementos expuestos se pueden clasificar en: corporales, estructurales y funcionales (Montaño et al., 2015). Los elementos corporales corresponden a datos de habitabilidad, educación y ocupación de la población, los cuales pueden ser obtenidos mediante censos del Sistema de Identificación de Potenciales Beneficiarios de Programas Sociales (Sisbén). Los elementos estructurales se dividen en las edificaciones (según el tipo de construcción), redes, (que incluye, vías, líneas, acequias) y superficies naturales o tipos de coberturas del suelo.

Finalmente, los elementos funcionales se agrupan por tipos de actividades, dentro de los que se encuentran:

- Actividades económicas: que hace referencia a zonas de actividad comercial y agrícola, así mismo se establecen aspectos relacionados con la generación de empleo y los tipos de cultivo.
- Actividades de transporte, comunicación y distribución: caracterizando el grado de importancia de las vías de comunicación, de los sistemas de comunicación telefónica y de distribución de energía (estimando el número de beneficiarios) y sitios importantes para el suministro de los servicios básicos.
- Actividades sociales, culturales y educativas: allí se caracteriza a la población educativa activa y su localización; ubicación de los entes administrativos y culturales, sitios de recreación, entre otros.
- Actividades de socorro, salud y seguridad: que se refiere a la ubicación de las instituciones relacionadas con sector salud, atención de desastres ya que estas instituciones son importantes en la etapa posterior a la posible materialización del fenómeno, si llegara a ocurrir (Montaño et al., 2015).

La metodología para análisis de vulnerabilidad empleada por INGEOMINAS en el caso Pradera Valle se basa en inundaciones, pero su sustento teórico se puede emplear en avenidas torrenciales.

Figura 90. Análisis retrospectivo de inundaciones ocurridas

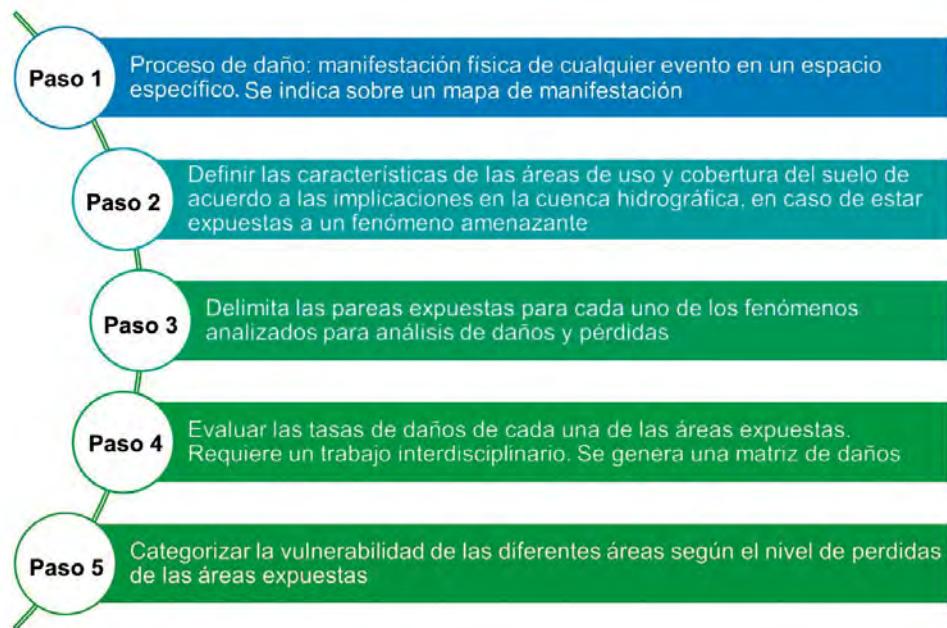


Fuente: elaboración propia.

4.1.6 EVALUACIÓN DE VULNERABILIDAD EN LOS POMCAS-MINAMBIENTE

La metodología de valoración de vulnerabilidad empleada en los POMCAS, se orienta para determinar el “nivel de daños y pérdidas que ocurren con la manifestación de un evento específico, que pueden afectar la sostenibilidad ambiental, la localización segura, la sostenibilidad económica y la infraestructura estratégica” (Montaño et al., 2015, p. 7.7). La metodología implica cinco pasos como se observa en la figura 91.

Figura 91. Evaluación de vulnerabilidad para POMCAS



Fuente: elaboración propia.

En el paso 1, se contempla la evaluación del daño asociado a los fenómenos de amenaza dentro del territorio. En el paso 2 se definen las características de las áreas de uso a partir de la metodología de Corine Land Cover. A cada una de las categorías de las áreas a evaluar se les asigna un atributo teniendo en cuenta su importancia como área de conservación o en la prestación de servicios ambientales, entre otros.

En el paso 3 se delimitan las áreas expuestas a los daños y en el paso 4 se establecen las tasas de daños, lo que implica un trabajo interdisciplinario en el cual se pretende obtener una matriz de daño para las diferentes áreas. El índice de daños se constituye en el indicador de la vulnerabilidad de cada una de las áreas expuestas evaluadas. Finalmente, en el paso 5 se categoriza la vulnerabilidad de cada área (Montaño et al., 2015).

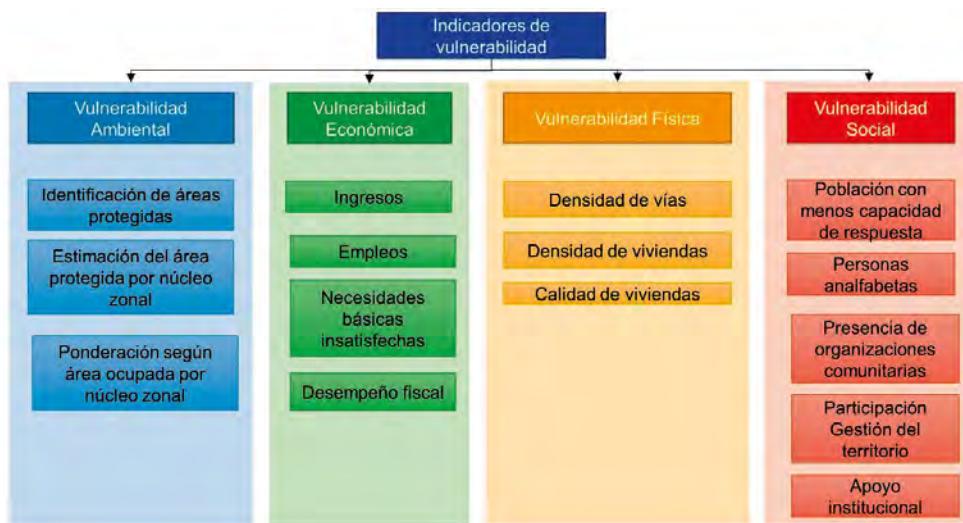
4.1.7 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD EN LA JURISDICCIÓN CONARE

En esta metodología el análisis se realiza a partir de cuatro indicadores de vulnerabilidad: vulnerabilidad ambiental, económica, física y social (figura 92).

El indicador de vulnerabilidad ambiental incluye aspectos relativos a áreas protegidas en el territorio, y la ponderación de este indicador se basa en la extensión que ocupa el área protegida dentro de la zona y el nivel de vulnerabilidad que puede llegar a presentar.

La vulnerabilidad económica se refiere a aspectos relativos al empleo (relación entre empleo, desempleo y subempleo dentro del territorio objeto de análisis), los ingresos por núcleo familiar, la cobertura de necesidades básicas y el desempeño fiscal de los municipios.

Figura 92. Indicadores de vulnerabilidad en la jurisdicción CONARE



Fuente: elaboración propia.

La vulnerabilidad física se relaciona con el estado de la infraestructura general (densidad de vías y de viviendas) y particular (calidad de las edificaciones y ubicación). La vulnerabilidad social se determina a partir del tejido social y la presencia de organizaciones comunitarias, así como la participación y el apoyo institucional que reciben. Las organizaciones sociales incluyen entidades como la Cruz Roja, Defensa Civil, Bomberos, así como las Juntas de Acción Comunal o Local.

En este estudio, el nivel de ponderación que se le da a la vulnerabilidad como factor dentro de análisis de riesgo es de un 30 %, teniendo en cuenta que la información proviene de fuentes secundarias como censos, encuestas y otros reportes generados previamente y para otros fines.

4.1.8 METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD ANTE AMENAZAS DE INUNDACIÓN, REMOCIÓN EN MASA Y FLUJOS TORRENCIALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

Esta metodología analiza la vulnerabilidad en función de tres factores que son la exposición, la fragilidad y la capacidad de adaptación y respuesta, por lo cual, esta metodología se propone estimar la vulnerabilidad global en función de estos tres factores (figura 93).

La exposición pretende estimar el nivel de incidencia potencial que se presentaría sobre ecosistemas, población, infraestructuras y sistemas de producción. Por su parte, la fragilidad se relaciona con el nivel de susceptibilidad intrínseca de los elementos expuestos a una potencial amenaza. Por último, la capacidad de respuesta y adaptación tiene que ver la respuesta que las comunidades podrían tener para atender y recuperarse de los eventos de amenaza, en caso de ocurrir, y por lo tanto está muy relacionada con la capacidad institucional del territorio (Vera-Rodríguez y Albarracín-Calderón, 2017).

Esta metodología analiza la vulnerabilidad en función de tres factores que son la exposición, la fragilidad y la capacidad de adaptación y respuesta

Figura 93. Factores y componentes de la vulnerabilidad

Vulnerabilidad por exposición

- Ecosistemas
- Población
- Infraestructura
- Sistemas de producción

Vulnerabilidad por fragilidad

- Física
- Socioeconómica
- Ambiental

Vulnerabilidad determinada por la capacidad de adaptación y respuesta

- Ahorro y transferencia del riesgo
- Gobernabilidad
- Planes de emergencia
- Planes de orientación y manejo ambiental del territorio
- Planes de adaptación al cambio climático
- Capacidad de endeudamiento

Fuente: elaboración propia.

Para cada componente mencionado en la figura 93 se establecen variables de medición y criterios de valoración, los cuales están en función de la información analizada para dar cumplimiento con la variable y el componente correspondiente. Los criterios se definen en tres categorías, alto, medio y bajo; lo que finalmente permite cruzar la información y obtener un análisis global de la vulnerabilidad para cada componente.

4.1.9 ANÁLISIS DE LA VULNERABILIDAD A NIVEL ORGANIZACIÓN

El análisis de la vulnerabilidad a nivel organizacional tiene ajustes respecto a las metodologías analizadas previamente puesto que su propósito es el de orientar el diseño de planes con un alcance limitado a organizaciones que conforman el Sistema Distrital

para la Prevención y Atención de Emergencias (SDPAE), así como todas las organizaciones del sector público y privado.

A esta escala, los elementos asociados al análisis de la vulnerabilidad se dividen en tres categorías: personas, recursos y sistemas y procesos. Para cada uno de los aspectos:

se desarrollan formatos que a través de preguntas buscan de manera cualitativa dar un panorama general que le permita al evaluador calificar como mala, regular o buena, la vulnerabilidad de las personas, los recursos y los sistemas y procesos de su organización ante cada una de las amenazas descritas (Fondo de Prevención y Atención de Emergencias, 2012, p. 11).

Figura 94. Elementos de la vulnerabilidad en organizaciones



Fuente: elaboración propia.

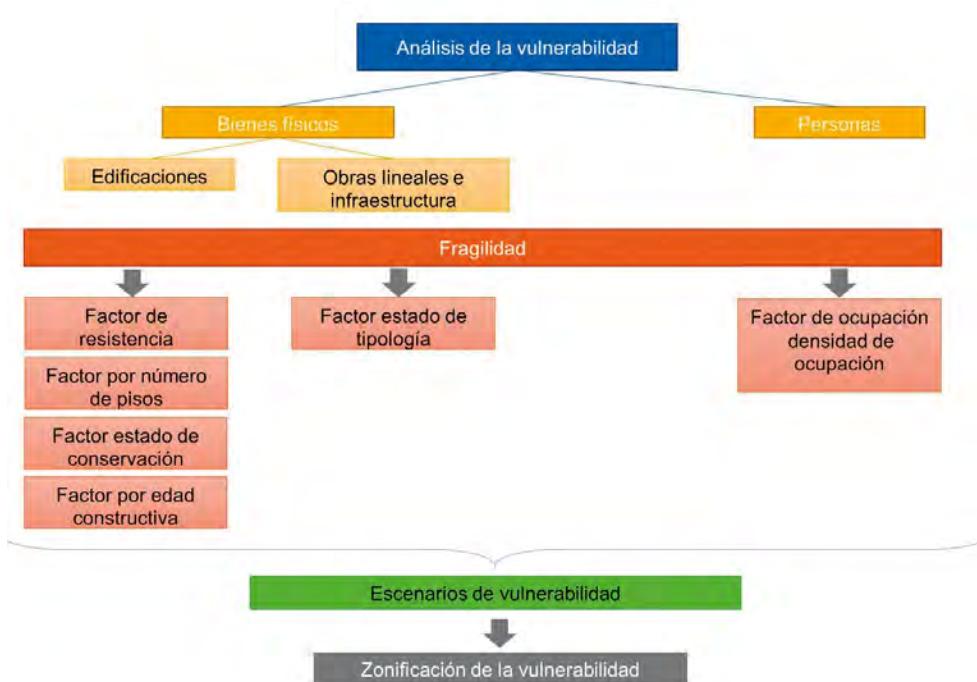
4.1.10 GUÍA METODOLÓGICA PARA ESTUDIOS DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA (SGC, 2016)

Esta guía propone una metodología específica para ambientes urbanos de manera que no contempla la evaluación del riesgo en zonas rurales. El análisis de la vulnerabilidad parte de dos grandes categorías que son los bienes físicos (dentro de los cuales se incluyen edificaciones, obras lineales e infraestructura) y las personas. En todos los casos el objetivo es identificar y caracterizar los elementos expuestos a posibles amenazas. El análisis de la información se hace a partir de la fragilidad representada por

diferentes factores asociados a cada elemento; los cuales se detallan en la figura 95.

Posteriormente se hace el análisis de la fragilidad de factores ante la ocurrencia de diversos tipos de escenarios de vulnerabilidad que se definen a partir del análisis de amenaza y los posibles daños que se occasionarían en caso de ocurrir el evento. Finalmente, la vulnerabilidad se clasifica en tres categorías (alta, media y baja) para los elementos y factores abordados, de esta manera se genera una zonificación de la vulnerabilidad en el territorio

Figura 95. Análisis de la vulnerabilidad para sector urbano



Fuente: elaboración propia.

4.2 ANÁLISIS DE RIESGO

Como se ha mencionado en apartados anteriores el riesgo está compuesto por la vulnerabilidad de los elementos expuestos y la amenaza generada por el evento o fenómeno natural. En este caso la vulnerabilidad se determina para la población expuesta a la avenida torrencial, mientras que la amenaza se determina mediante la modelación de hidrológica, hidráulica y geotécnica de la cuenca para diferentes períodos de retorno, por lo cual el riesgo total se calcularía mediante la siguiente expresión:

$$\text{Riesgo} = \text{Amenaza} * \text{Vulnerabilidad}$$

De acuerdo con lo anterior, a continuación, se propone una clasificación del riesgo modificada a partir de las recomendaciones de Bateman y Medina (2019), sin embargo, esta clasificación está sujeta al criterio del evaluador y concertación con los actores involucrados.

Tabla 61. Propuesta de clasificación del riesgo

		Vulnerabilidad		
		Alta	Media	Baja
Amenaza	Alta	Alto	Alto	Medio
	Media	Alto	Medio	Bajo
	Baja	Medio	Bajo	Bajo

Fuente: adaptado de Bateman y Medina (2019).

Es necesario aclarar, que el análisis de riesgo debe realizarse para diferentes condiciones hidrológicas, ya que la magnitud del evento varía de acuerdo con estas y por tanto también la posible afectación generada a la población, además se debe contemplar para zonas de alto riesgo la incorporación de otros procesos como lo son la erosión del cauce que también genera aportes de material y puede aumentar la magnitud del evento.

Por otra parte, como se ha mencionado a lo largo de los diferentes capítulos, el proceso de evaluación de riesgo debe ser un proceso metódico con diferentes niveles de detalle. Gran cantidad de cuencas de nuestro país se encuentran en zonas de alta montaña o piedemonte, lo que implica un gran esfuerzo técnico y económico para poder abarcar todo el territorio en posible riesgo, por lo que el análisis por fases menos detalladas a más detalladas permite priorizar las zonas que requieren estudios técnicos de alto detalle.

Finalmente, es importante que los análisis de riesgo no se queden en el papel y pasen a convertirse en herramientas de planificación territorial y sea integrados a los Planes de Ordenamiento Territorial y a otros instrumentos de planificación, para que verdaderamente sean útiles en la gestión del riesgo, de tal forma que se eviten tragedias como las que cada vez son más frecuentes en Colombia.

Es necesario aclarar, que el análisis de riesgo debe realizarse para diferentes condiciones hidrológicas, ya que la magnitud del evento varía de acuerdo con estas y por tanto también la posible afectación generada a la población, además se debe contemplar para zonas de alto riesgo la incorporación de otros procesos como lo son la erosión del cauce que también genera aportes de material y puede aumentar la magnitud del evento.

REFERENCIAS

Allen, R., Pereira, L., Raes, D. y Smith, M. (2006). *Evaporación del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. <http://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>

Amat, J. (2017, febrero). Árboles de decisión, random forest, gradient boosting y C5.0. *Cienciadedatos.net*. https://www.cienciadedatos.net/documentos/33_arboles_de_prediccion_bagging_random_forest_boosting

Aristizábal, E., González, T., Montoya, J. D., Vélez, J. I., Martínez, H. y Guerra, A. (2011). Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, (15), 95- 111. <https://revista.eia.edu.co/index.php/reveia/article/view/249/244>

Bagnold, R. (1954). Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Proceedings of the Royal Society of London*, 225(1160), 49 - 63. <https://doi.org/10.1098/rspa.1954.0186>

Bañon, L. y Bevía, J. (2000). *Manual de carreteras*. Ortiz e Hijos, Contratista de Obras, S.A.

Bateman, A. y Medina, V. (2019, junio). *Flujos de avalancha - Valoración del riesgo* [material de clase]. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.

Beven, K. J. y Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24(1), 43 - 69. <https://doi.org/10.1080/02626667909491834>

Bingham, E. C. y Green, H. (1919). Paint, a plastic material and not a viscous liquid; the measurement of its mobility and yield value. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, 19, 640 - 664.

Budyko, M. I. (Ed.). (1974). *Climate and Life* (Vol. 18). Academic Press.

Campos, D. F. (1978). *Cálculo de las curvas IDF a partir de registros de lluvia máxima en 24 horas y relaciones duración lluvia promedio*. Subdirección Regional Noreste de Obras Hidráulicas e Ingeniería Agrícola para el Desarrollo Rural.

Cañas-Gómez, J., Estrada-Maya, M., Jiménez-Galvis, C., Márquez-Jaramillo, J., Mejía-Hernández, V., Ochoa-Osorio, S., Rodríguez-Gaviria, E. y Builes-Jaramillo, L. (2017). *Evaluación de la vulnerabilidad física ante avenidas torrenciales. Caso de estudio: cabecera urbana del municipio de Salgar (Antioquia)* [sesión de conferencia]. IX Seminario La sostenibilidad un punto de encuentro. Medellín, Colombia.

Carvajal, L. y Roldán, E. (2006). Calibración del modelo lluvia-escorrentía agregado GR4J. Aplicación: Cuenca del Río Aburrá. *DYNA*, 74(152), 73 - 87. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/912>

Castellanos, R. (1996). *Lluvias críticas en la evaluación de amenazas de eventos de remoción en masa* [tesis de maestría]. Universidad Nacional de Colombia.

Castellanos, R. y González, A. (1997, 10-14 de noviembre). *Algunas relaciones de precipitación crítica - duración de lluvias que disparan movimientos en masa en Colombia*. 2nd Panamerican Symposium on Landslides - ABMS, Río de Janeiro.

Chevalier, G. (2013). *Assessing Debris flow hazard focusing on statistical morpho-fluvial susceptibility models and magnitude-frequency relationships: application to the central-eastern Pyrenees* [tesis doctoral]. Universitat Politècnica de Catalunya. <http://hdl.handle.net/2117/95041>

Chien, N. y Wan, Z. (1999). *Mechanics of Sediment Transport*. American Society of Civil Engineers. <https://doi.org/10.1061/9780784404003>

Chorley, R. (1957). Illustrating the laws of morphometry. *Geological magazine*, 94(2), 140-150. <https://doi.org/10.1017/S0016756800068412>

Centro Humbold. (2004). *El ABC de la Gestión del Riesgo*. Oxfam y Consejería en Proyectos. <https://humboldt.org.ni/el-abc-de-la-gestion-de-riesgos/>

Congreso de Colombia. (2012, 24 de abril). Por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. [Ley 1523 de 2012]. DO: 48.411.

Coussot, P. y Meunier, M. (1996). Recognition, classification and mechanical description of *debris flow*. *Earth Sciences Reviews*, 40(3-4), 209 - 227. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(95\)00065-8](https://doi.org/10.1016/0012-8252(95)00065-8)

Crecen los afectados por avalancha en Salgar. (2015, 20 de mayo). *El Mundo*. <https://n9.cl/n79j5>

Cruden, D. M. y Varnes, D. J. (1996). Landslides types and processes. En R. L. Schuster y A. K. Turner (Eds.), *Landslides Investigation and Mitigation* (pp. 36 – 75). National academy Press. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9781118629548.ch3>

DHI. (2017). MIKE SHE. DHI Water & Environment. https://manuals.mikepoweredbydhi.com/2017/Water_Resources/MIKE_SHE_printed_V1.pdf

Díaz-Granados, M. (2014). Hidráulica de ríos [material de clase]. Universidad de los Andes.

Díaz-Granados, M. (2016). Modelación de hidrosistemas [material de clase]. Universidad de los Andes.

Dietrich, W. E. y Montgomery, D. R. (1998, 1 de febrero). SHALSTAB. *A digital terrain model for mapping shallow landslide potential*. <http://calm.geo.berkeley.edu/geomorph/shalstab/index.htm>

Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L. y Llorente-Isidro, M. (2008). *Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración*. Instituto Geológico y Minero de España. <https://n9.cl/rg46u>

Estudios y Asesorías Ingenieros Consultores Ltda. (2012). *Informe de avance Estudio de Rompimiento de la Ataguia de la presa RCC de la Central Hidroeléctrica San Pedro - República de Chile*.

ETH Zürich. (2020). STEP-TRAMM. Soil and Terrestrial Environmental Physics (Emeritus). <https://step.ethz.ch/step-tramm.html>

Fondo de Prevención y Atención de Emergencias. (2012). *Metodologías de análisis de riesgo. Guía para elaborar planes de emergencia y contingencia*. FOPAE, Alcaldía de Bogotá. <http://www.ridssol.com/documentos/muro/fe6dd4f800e4ed-2467827680f51e2ae8.pdf>

Fread, D. (1988). BREACH: An erosion model for earthen dam failures. Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, NOAA.

Gómez-Blanco, J. A. y Cadena, M. C. (2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia ET₀ para Colombia*. IDEAM. <https://n9.cl/19c99>

Grupo de Estándares para Movimientos en Masa. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas*. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, PMA.

Grupo de investigación OSSO y LA RED. (2009). *DesInventar. Sistema de Inventario de Desastres. Guía metodológica*. <https://n9.cl/ltuf9>

Hermelin, M. (1985). Suelos, rocas y formaciones superficiales. DYNA, (106), 25 - 29.

Herschel, W. M. y Bulkley, R. (1926). Measurement of consistency as applied to rubber benzene solutions. *Proceedings of the American Society for Testing and Materials*, 26(2), 621 - 633.

Hoek, E. y Bray, J. (1981). *Rock slope engineering*. Institution of Mining and Metallurgy.

Hungr, O., Evans, S. G., Bovis, M. J. y Hutchinson, J. N. (2001). A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7(3), 221 - 238.

Hydronia. (2014). *Riverflow 2D Plus User's Guide*. Pembroke Pines.

Ibarrola, E. (2015). *Introducción a los fluidos no newtonianos*. <https://n9.cl/kepod>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2010). *Leyenda Nacional de coberturas de la tierra: metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia. Escala 1:100.00*. IDEAM.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. IDEAM. <http://www.invemar.org.co/documents/10182/14487/JC-249.pdf/051c4f2d-81f1-4acb-99ed-97e2e169cd3f>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (2015). *Glosario*. <http://www.ideal.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>

Instituto de Hidrología Meteorología y Estudios Ambientales y Unidad de Planeación Minero Energética. (2006). *Atlas de viento y energía eólica de Colombia*. Ministerio de Minas y Energía.

Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático. (2016). *Caracterización general de escenario de riesgo por avenidas torrenciales*. <https://www.idiger.gov.co/riesgo-por-avenidas-torrenciales>

Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química y Ministerio de Minas y Energía. (1994). *El sismo de Páez, Cauca 6 de junio de 1994: Evaluación de emergencia. Informe presentado al sistema nacional para la prevención y atención de desastres en Colombia*. Ingeominas.

Instituto de Investigaciones en Geociencias Minería y Química y Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Formulación de una guía metodológica para la evaluación de la amenaza por movimientos en masa tipo flujo: caso piloto quebrada La Negra, Útica, Cundinamarca*.

Instituto Geológico y Minero de España. (1986). *Manual de taludes*. IGME.

Johnson, A. M. (1970). *Physical Processes in Geology*. Freeman.

Johnson, A. M. y Rodine, J. R. (1984). Debris flow. En D. Brunsden y D. B. Prior (eds.), *Slope Instability* (pp. 257-360). Jhon Wiley & Sons.

Körner, H. (1976). Reichweite und Geschwindigkeit von Bergstürzen und Fließschneelawinen. *Rock Mechanics*, 8, 225 - 256.

Loat, R. y Petrascheck, A. (1997). Berücksichtigung der Hochwassergefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Bundesamt für Umwelt BAFU.

Lozano-Cortijo, O. (2008). *Metodología para el análisis de vulnerabilidad y riesgo ante inundaciones y sismos, de las edificaciones en centros urbanos*. Centro de Estudios y Prevención de Desastres (PREDES).

Markstrom, S., Regan, R., Hay, L., Viger, R., Webb, R., Payn, R. y LaFontaine, J. (2015). *PRMS-IV, the Precipitation-Runoff Modeling System, Versión 4 (Techniques and Methods, 6-B7)*. United States Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/tm6B7USGS>.

Márquez, H. (1999). Métodos matemáticos de evaluación de factores de riesgo para el patrimonio arqueológico: una aplicación GIS del método de Jerarquías Analíticas de T.L Saaty. *SPAL*, 8, 21 - 37. <https://doi.org/10.12795/spal.1999.i8.02>

Mayorga, R. (2003). Determinación de umbráles de lluvia detonante de deslizamientos en Colombia. *Meteorología Colombiana*, (7), 157-168. <https://n9.cl/crll>

Melton, M. A. (1965). The geomorphic and paleoclimatic significance of alluvial deposits in Southern Arizona. *Journal of Geology*, 73(1), 1 - 38. <https://doi.org/10.1086/627044>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Protocolo para la incorporación de la gestión del riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Minambiente. <https://n9.cl/yu66>

Montaño, M., Maca, X., Torres, W., Iragorri, R., Agredo, E. y Rengifo, A. (2015). Estudio de vulnerabilidad a inundaciones para las principales corrientes del municipio de Popayán. Popayán. En A. Gallardo, M. E. Guevara, L. J. González, R. A. Lemos, M. P. Torres, M. E. Montaño, E. L. Agredo, C. A. Chilito y E. Quijano. *Estudio preliminar (afectación y daños) asociados a fenómenos de inundación lenta y súbita (avenidas torrenciales) en la zona urbana y rural del municipio de Popayán*. Alcaldía de Popayán y Universidad del Cauca.

Mott, R. (2015). *Mecánica de fluidos*. Pearson Educación.

Muhammed, A. H. (2012). *Satellite based evapotranspiration estimation and runoff simulation: A topmodel application to the Gilgel Abay catchment, Ethiopia* [tesis de maestría]. University of Twente. <http://essay.utwente.nl/84858/1/ahmed.pdf>

Navarro, S. (2008). *Estabilidad de taludes*. <https://sjnavarro.files.wordpress.com/2008/09/estabilidad-de-taludes.pdf>

Nawarathna, N.M.N.S., Kazama, S. y Sawamoto, M. (2002). Improvement of calibration procedure of the block wise topmodel with muskingum-cunge routing method using sub basins simulated results: application to part of the lower mekong river basin. En J. Guo (Ed.), *Advances in Hydraulics and Water* (pp. 540 – 545). World Scientific Publishing.

Netsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R. y Williams-Grassland, J. R. (2011). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resources Institute. <https://swat.tamu.edu/media/99192/swat2009-theory.pdf>

Noticias Caracol. (2018, 18 de mayo). *Crónica de una tragedia anunciada: el día que una avalancha sepultó a Armero* [video]. YouTube. <https://youtu.be/MEFuyFYeo4c>

O'Brien, J. S. y Julien, P. Y. (1985). Physical properties and mechanics of hyperconcentrated sediment flows. En D. S. Bowles (Ed.), *Delineation of Landslides, Flash Flood and Debris flow Hazards in Utah. Proceedings of Specialty Conference* (pp. 260 - 279). Utah Water Research Laboratory, Utah State University.

O'Brien, J. S. y Julien, P. Y. (1997). On the importance of mudflow routing. En C. L. Chen (Ed.), *Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment* (pp. 667 - 686). American Society of Civil Engineers.

Pack, R. T., Tarboton, D. G. y Goodwin, C. N. (2005). *SINMAP 2.0 for ArcGIS - A stability index approach to terrain stability hazard mapping, User's Manual*. Utah State University.

Páez, J. (2016). *Modelación matemática de flujos de avalancha* [tesis de maestría]. Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13751?show=full>

Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Universidad Central de Venezuela.

Pérez J. y Mesa O. (2002, 29 de agosto). *Estimación del factor de erosividad de la lluvia en Colombia* [ponencia]. XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, Medellín, Colombia. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7823>

Real Academia Española. (2020). Alud. En *Diccionario de la lengua española* (edición de tricentenario). <https://dle.rae.es/alud#0x80msV>

Rickenmann, D. (2005). *Hangmuren und Gefahrenbeurteilung. Kurzbericht für das Bundesamt für Wasser und Geologie*. Universität für Bodenkultur.

Rickenmann, D. (2016). *Methods for the Quantitative Assessment of Channel Processes in Torrents (Steep Streams)*. CRC Press.

Rivas, M., Ovalles de Cabezas, Y., Soto, A. C., Ramírez, G., Ripanti, F. y González, J. L. (2009). Determinación de niveles de potencialidad torrencial de la cuenca del río Mocotíes, Mérida, Venezuela. *Revista Forestal Venezolana*, 53(1), 33-34.

Romero, A. y López, F. (1987). Morfometría de redes fluviales: revisión crítica de los parámetros más utilizados y aplicación al alto Guadalquivir. *Papeles de Geografía*, (12), 47-62.

Ruiz, R. y Torres, H. (2008) *Manual de Procedimientos para la delimitación y codificación de cuencas hidrográficas -Caso América del Sur*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Hsu, S. M., Chiou, L. B., Lin, G. F., Chao, C. H., Wen, H. Y. y Ku, C. Y. (2010). Applications of simulation technique on debris-flow hazard zone delineation: a case study in Hualien County, Taiwan. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 535-545. <https://doi.org/10.5194/nhess-10-535-2010>

Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.

Sepúlveda, A. y Patiño, J. (2016). *Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia* [tesis de maestría]. Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/18828>

Servicio Geológico Colombiano. (2016). *Guía metodológica para estudios de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa*. SGC. <https://n9.cl/uwyv>

Servicio Geológico Colombiano. (2017). *Guía metodológica para la zonificación de amenaza por movimientos en masa escala 1:25.000*. SGC. <http://bit.ly/2kB3Z7e>

Stone, R. P. y Hilborn, D. (2001). *Universal soil loss equation*. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs.

Suárez J. (1998). *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Suárez, J. (2009). *Deslizamientos*. Universidad Industrial de Santander.

Suárez J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos.

Takahashi, T. (1978). Mechanical characteristics of debris flow. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(8), 1153-1169.

Takahashi, T. (1991). *Debris flow*. International Association for Hydraulic Research.

Tarboton, D. (2003). Simulation of runoff generation in hydrologic models. En *Rain-fall-Runoff Processes* (pp. 127-145). Utah State University.

Todini, E. y Mazzetti, C. (2008). *TOPKAPI - TOPOgraphic Kinematic Aproximation and Integration - user manual and references*. Protezione e Gestione Ambientale.

Comité Nacional para el Conocimiento del Riesgo. (2017). *Terminología sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Fenómenos Amenazantes*. UNGRD.

Universidad Nacional de Colombia. (2009). *Amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, avenidas torrenciales e inundaciones en el Valle de Aburrá. Formulación de propuestas de gestión*. Municipio de Medellín, Área Metropolitana del Valle de Aburrá. <http://hdl.handle.net/20.500.11762/19864>

Universitat Politècnica de València. (2014). *Descripción del modelo conceptual distribuido de simulación hidrológica TETIS v.8*. Grupo de Investigación de Modelación Hidrológica y Ambiental (GIMHA). <http://lluvia.dihma.upv.es/ES/software/software.html>

U.S. Army Corps of Engineers. (2000). *Hydrologic Modeling System HEC*. Hydrologic Engineering Center. <https://n9.cl/y104>

Velásquez, A. y Rosales, C. (1999). *Escudriñando en los desastres a todas las escalas*. Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina – LA RED. <https://www.osso.org.co/docu/publicac/1999/escudrinhando/completo.pdf>

Vera-Rodríguez, J. y Albarracín-Calderón, A. (2017). Metodología para el análisis de la vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 27(2), 109-136. <http://dx.doi.org/10.18359/rcin.2309>

Voellmy, A. (1955). Über die Zerstörungskraft von Lawinen. *Schweizerische Bauzeitung*, 73(12), 159–162; 73(15), 212-217; 73(17), 246-249; 73(19), 280-285.

Wyllie, D. y Mah, C. (2004). *Rock slope engineering: civil and mining*. Spon Press

Yepes, V. (2018, 27 de noviembre). Proceso analítico Jerárquico AHP. *Universidad Politécnica de Valencia*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2018/11/27/proceso-analitico-jerarquico-ahp/>





UNIVERSIDAD NACIONAL ABIERTA Y A DISTANCIA (UNAD)

Sede Nacional José Celestino Mutis
Calle 14 Sur 14-23
PBX: 344 37 00 - 344 41 20
Bogotá, D.C., Colombia

www.unad.edu.co



978-958-651-792-8