

2020

Comentado [1]: Ajustar la portada, incluir imagen o imágenes referentes de la quebrada

ESTUDIO HIDROLÓGICO



Equipo Gestión Ambiental del Riesgo
Subdirección de Conocimiento y
Evaluación Ambiental
CORPORACION AUTONOMA
REGIONAL DE NARIÑO

ESTUDIO HIDROLÓGICO DE LA QUEBRADA

Elaboró:

Myriam Patricia Colimba Piarpuezan

Ing. Agroforestal

Dania Sofía Varona Bravo

Geóloga

Brayan Julian Torres Chazatar

Ing. Mecánico – Mg Ingeniería Hidráulica

Mario Andrés Quiroz Burbano

Geógrafo

Revisó:

LUIS CARLOS ROSERO LOPEZ

Geólogo

Aprobó:

María Nathalia Moreno Santander

Subdirectora de Conocimiento y Evaluación Ambiental

Hugo Mideros López

Director general COPORNARIÑO

Tabla de contenido

| | |
|-------|----|
| 1.1 | 14 |
| 1.1.1 | 14 |
| 2 | 15 |
| 3 | 17 |
| 3.1 | 17 |
| 3.2 | 19 |
| 3.3 | 24 |
| 3.3.1 | 25 |
| 3.4 | 26 |
| 3.4.1 | 30 |
| 3.4.2 | 31 |
| 4 | 32 |
| 4.1 | 32 |
| 4.1.1 | 32 |
| 4.1.2 | 38 |
| 4.1.3 | 42 |
| 4.1.4 | 50 |
| 4.1.5 | 52 |
| 4.1.6 | 56 |

| | |
|-------|-----|
| 5 | 58 |
| 5.1 | 58 |
| 5.1.1 | 62 |
| 5.2 | 68 |
| 5.2.1 | 69 |
| 5.2.2 | 71 |
| 5.2.3 | 73 |
| 5.3 | 74 |
| 5.3.1 | 75 |
| 5.3.2 | 77 |
| 5.3.3 | 80 |
| 5.4 | 85 |
| 5.4.1 | 85 |
| 5.4.2 | 86 |
| 5.4.3 | 86 |
| 5.4.4 | 87 |
| 6 | 92 |
| 7 | 99 |
| 7.1 | 99 |
| 7.1.1 | 102 |

| | |
|-------|--------------------------------------|
| 7.1.2 | 102 |
| 7.1.3 | 104 |
| 7.1.4 | 106 |
| 7.1.5 | 109 |
| 7.2 | 110 |
| 7.3 | 118 |
| 8 | ¡Error! Marcador no definido. |
| 9 | ¡Error! Marcador no definido. |
| 10 | ¡Error! Marcador no definido. |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Clasificación de deslizamiento en forma de flujo. | 20 |
| Tabla 2. Tipos de flujo de acuerdo a las características de la mezcla y del canal (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001). | 21 |

| | |
|---|----|
| Tabla 3. Clasificación de Flujos hiperconcentrados. | 23 |
| Tabla 4. Clasificación de avenidas torrenciales según Aristizabal et al. | 24 |
| Tabla 5. Parámetros de resistencia para un flujo laminar. | 28 |
| Tabla 6. Tabla de flujos | 29 |
| Tabla 7. Características morfométricas de las áreas aportantes. | 41 |
| Tabla 8. Clasificación de usos de suelo propuesto por el S.C.S | 43 |
| Tabla 9. Porcentaje de cobertura de la tierra. | 50 |
| Tabla 10. Estaciones cercanas a la zona de estudio. | 59 |
| Tabla 11. Datos Estación Túquerres. | 61 |
| Tabla 12. Precipitación máxima anual. | 62 |
| Tabla 13. Valores de los coeficientes de distribución para cuencas en Brasil. | 70 |
| Tabla 14. Valores de precipitación para 24 horas. | 71 |
| Tabla 15. Valores de intensidad para 24 horas. | 71 |
| Tabla 16. Condiciones de humedad según el S.C.S. | 77 |
| Tabla 17. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S | 79 |
| Tabla 18. Tipología de usos de suelos según el S.C.S. | 81 |
| Tabla 19. Resultados cálculo del CN para el Área 1. | 82 |
| Tabla 20. Resultados cálculo del CN para el Área 2. | 83 |
| Tabla 21. Resultados cálculo del CN para el Área 3. | 84 |

| | |
|---|-----|
| Tabla 22. Valores de los tiempos de concentración (Tc) y desfase al pico (TLag). | 85 |
| Tabla 23. Propiedades de Flujos de escombros (Castillo, 2006). | 100 |
| Tabla 24. Valores de n de Manning para diferentes usos. | 105 |
| Tabla 25. Asignación n-manning para cada cobertura del área de simulación. | 106 |
| Tabla 26. Propiedades de matriz de flujo en función de tamaño de sedimentos y contenido de arcilla. | 107 |
| Tabla 27. Coeficientes de tensión de corte y viscosidad (O'Brien & Julien, 1985). | 108 |
| Tabla 28. Distribución de partículas de suelos derivados de cenizas volcánicas. | 109 |
| Tabla 29. coeficientes de tensión de corte y viscosidad para el área de estudio. | 109 |
| Tabla 30. Nivel de Intensidad por flujo torrencial. | 119 |
| Tabla 31. Nivel de amenaza por flujo torrencial. | 119 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización zona de estudio. | 16 |
|---|----|

| | |
|---|----|
| Figura 2. Esquema flujo de detrito (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001). | 19 |
| Figura 3. Perfiles longitudinales del canal para diferentes tipos de flujo (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001). | 21 |
| Figura 4. Clasificación de flujos en relación a la concentración de sedimentos. | 22 |
| Figura 5. Modelo Digital de Elevación. | 34 |
| Figura 6. visualización geoprocso Flow Accumulation - herramienta LOG10 | 35 |
| Figura 7. MAPA DE SOMBRAS. | 36 |
| Figura 8. Figura Delimitación microcuenca Cumac municipio de Guaitarilla. | 37 |
| Figura 9. Modelo de Red Irregular Triangular. | 38 |
| Figura 10. Red de drenaje. | 39 |
| Figura 11. Esquema Red de drenaje tipo dendrítico. | 40 |
| Figura 12. Mapa de subdivisiones. | 41 |
| Figura 13. Esquema de interpretación visual de espacios naturales S.C.S de los EEUU. | 46 |
| Figura 14. Mapa de cobertura de la tierra. | 50 |
| Figura 15. Mapa de Unidades Geológicas. | 52 |
| Figura 16. Mapa de unidades geomorfológicas. | 56 |
| Figura 17. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales. | 58 |
| Figura 18. Polígonos de Thiessen para las estaciones. | 60 |
| Figura 19. Datos de precipitación Estación Túquerres. | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 20. Resultados función de distribución Gumbel. | 65 |
| Figura 21. Resultados función de distribución SQRT-ET máx | 66 |
| Figura 22. Resultados función de distribución GEV. | 67 |
| Figura 23. Resultados función de distribución TCEV | 68 |
| Figura 24. Curvas IDF sin ajuste para la microcuenca Cumac. | 72 |
| Figura 25. Curvas IDF para la microcuenca CUMAC. | 73 |
| Figura 26. Mapa de grupo hidrológico del suelo. | 80 |
| Figura 27. Esquema de las áreas de drenaje en Hec HMS. | 86 |
| Figura 28. Hietograma de precipitación usando coeficiente de Brasil. | 88 |
| Figura 29. Hidrograma del área 1. | 89 |
| Figura 30. Hidrograma del área 2. | 90 |
| Figura 31. Hidrograma del área 3. | 91 |
| Figura 32. Hidrograma del punto de desagüe. | 92 |
| Figura 33. Hidrograma final para T=100 años | 93 |
| Figura 34. Zona de mayor afectación Sector El Empedrado – El Rosal. | 95 |
| Figura 35. Zonas de erosión lateral. | 95 |
| Figura 36. Depósitos de flujos torrenciales. | 96 |
| Figura 37. Depósitos de escombros. | 97 |
| Figura 38. Clasificación de los flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos según (O' Brian, 2000). A. Modificado por (Suárez, 2004). B. tomado de (FLO 2D, 2017). | 99 |

| | |
|--|-----|
| Figura 39. Mapa de ubicación simulación. | 101 |
| Figura 40. Partes y formación de un flujo torrencial en zonas de alta pendiente (Suárez, 2004). | 102 |
| Figura 41. Esquema de un flujo de detritos/escombros (Suárez, 2004). | 103 |
| Figura 41. Ortofotomosaico zona de estudio. | 103 |
| Figura 42. Levantamiento topográfico desde sector El Empedrado hasta vereda rosal. | 104 |
| Figura 44. Modelo Digital de Elevación | 104 |
| Figura 45. N-manning para modelo Flo2D. | 106 |
| Figura 46. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años. | 111 |
| Figura 46. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años. | 112 |
| Figura 48. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años. | 113 |
| Figura 49. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años. | 114 |
| Figura 50. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años. | 115 |
| Figura 51. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años. | 116 |
| Figura 52. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 100 años. | 117 |
| Figura 53. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 100 años. | 118 |
| Figura 54. Mapa de amenaza por flujos torrenciales del Sector El Empedrado Vereda San Germán hasta el caserío de la Vereda El Rosal. | 120 |

INTRODUCCIÓN

Los flujos torrenciales son un fenómeno socio natural amenazante de origen hidrometeorológico altamente destructivo en cuanto a vidas humanas, daños estructurales y ambientales que se resumen en pérdidas sociales y económicas; y de acuerdo con el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) estos se pueden definir como el aumento súbito del caudal en un cauce con volúmenes excepcionales, en el cual el fluido además de agua contiene una mezcla de escombros compuesto por suelo, roca y material vegetal. Este tipo de fenómenos son en su mayoría impredecibles y se transportan a grandes velocidades, generalmente se dan en ambientes montañosos y se encuentran acompañados por uno o varios movimientos en masa que se generan en las partes altas de las cuencas y a lo largo del cauce. Debido a la complejidad de estos fenómenos naturales, estos no han sido ampliamente estudiados y tanto a nivel mundial como nacional, en la literatura existen diversas definiciones y clasificaciones, pues los flujos torrenciales tienen diferentes naturalezas de origen y en gran parte dependen de la cantidad, composición y tamaño de los sedimentos que hacen que sus características como parámetros reológicos, profundidad, velocidad, magnitud, entre otras sean diversas.

De acuerdo con lo anterior, el equipo del proyecto Gestión Ambiental del Riesgo de CORPONARIÑO, con el objetivo de ampliar el conocimiento en cuanto al comportamiento de estos fenómenos naturales, priorizó una zona del Departamento de Nariño, en este caso el municipio de Guaitarilla, específicamente la microcuenca de la quebrada Cumac, definiendo un área desde el sector El Empedrado del Casco Urbano hasta la vereda El Rosal, donde históricamente se han presentado flujos torrenciales que han causado afectaciones en estructuras y viviendas, además de poner a gran parte de la comunidad en riesgo de desastre.

Debido a las diferentes definiciones y clasificaciones que existen, y teniendo en cuenta que actualmente en Colombia, no existe una metodología definida para evaluar este tipo de fenómenos, se tomó como base los manuales del Software Flo2D basados en estudios de O' Brien & Julien, que es un modelo hidrológico-

Comentado [2]: Revisar definiciones de UNGRD, 2017.

Comentado [3]: Citar a Aristizabal 2019

Comentado [4]: Es algún documento o información publicada? Es bueno citar si se conoce la fuente con precisión

hidráulico bidimensional (2D), capaz de simular la propagación de crecidas o flujo de escombros en cuencas hidrográficas y su interacción con las diferentes estructuras y obstrucciones que caracterizan las zonas antropizadas; este software permite simular todos los procesos físicos que gobiernan el intercambio de flujo entre el canal y la planicie de inundación. FLO-2D es un modelo de diferencias finitas que integra la ecuación de momento en forma completa utilizando un esquema geométrico con celdas de dimensión constante y finalizado en el cálculo celda por celda y en 8 direcciones de las variables hidráulicas (profundidad, velocidad y caudal), para ello se requiere insumos como un modelo digital de elevación, análisis hidrológicos, reológicos, de cobertura en entre otros.

De esta manera se determina una zona de amenaza para el tramo del sector El Empedrado del Casco Urbano hasta la vereda El Rosal, lo cual será de utilidad para la toma de decisiones en los procesos de mitigación y reducción del riesgo, y prevención de desastres, que debe llevar a cabo la administración municipal de Guiatarilla y la Gobernación de Nariño, como principales responsables de la gestión del riesgo en el territorio, de esta manera salvaguardar el bienestar de la comunidad que habita estos sectores.

Objetivos

1.1 Objetivo general

Realizar la delimitación y zonificación de las áreas de amenaza por flujos torrenciales, en el tramo comprendido entre el sector El Empedrado (Casco urbano) y la vereda El Rosal del municipio de Guaitarilla.

1.1.1 Objetivos específicos

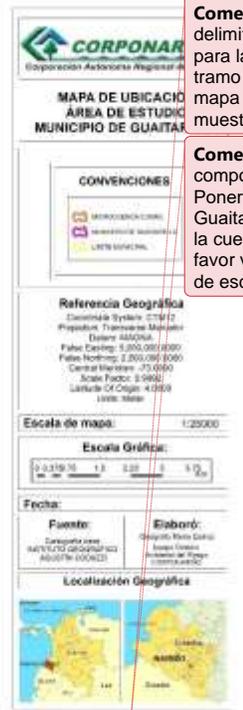
- Hacer la caracterización del tipo de flujo que se presenta, con base en las diferentes distinciones que encuentran en literatura y de acuerdo con las observaciones en campo y el registro histórico.
- Determinar los parámetros morfométricos principales de la corriente y su correspondiente área de drenaje.
- Analizar la información correspondiente a datos pluviométricos, identificando el régimen de lluvias de la zona de estudio y los valores máximos de precipitación.
- Obtener las curvas Intensidad-Duración-Frecuencia IDF a partir de los datos de las estaciones.
- Elaborar el modelo de producción de escorrentía a partir de la metodología planteada por el Soil Conservation Service (S.C.S), aplicando la caracterización de coberturas vegetales, suelos y condiciones de humedad de la zona.
- Construir el modelo hidrológico y simulación de la lluvia de diseño a través del Software Hec-HMS.
- Obtención de los hidrogramas para diferentes periodos de retorno (T=2, T=5, T=25, T=50 y T=100 años)
- Proponer medidas para mitigar y prevenir el riesgo de desastres por avenidas torrenciales.

2 CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ÁREA DE ESTUDIO

El municipio de Guaitarilla se ubica al suroriente del Departamento de Nariño, limita al sur con el municipio de Tuquerres, al norte con el municipio Ancuya, al occidente con los municipios de Samaniego y Providencia, al oriente con el municipio de Imués y al nororiente con los municipios de Yacuanquer y Consacá. Tiene una altitud promedio de 2.653 m.s.n.m.; una extensión aproximada de 12.000 ha y geográficamente se caracteriza por tener unidades de paisaje como el Cañón interandino que corresponde a tierras aledañas al Río Guáitara, el valle interandino que comprende la mayor área de importancia del municipio y en menor proporción zonas de páramo y subpáramo (PMGRD, 2015) **Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Comentado [5]: Revisar

La zona de estudio comprende un tramo paralelo desde el sector El Empedrado (Casco Urbano) hasta el caserío de la Vereda El Rosal, que hídricamente se ubica dentro de la microcuenca Cumac; cabe resaltar que a lo largo del cauce recibe nombres como La Regada y El Rosal, e históricamente se han presentado eventos torrenciales y de inundaciones que han afectado viviendas y estructuras de este tramo.



Comentado [6]: En la imagen se muestra la delimitación de la microcuenca, lo cual es importante para la localización, pero también es necesario incluir el tramo estudiado, por lo tanto, recomiendo incluir un mapa adicional a una escala más detallada que muestre el área modelada.

Comentado [7]: Ajustar convenciones, incluir componentes básicos de un mapa de localización. Poner "flecha" que indique la "Cabecera municipal de Guaitarilla". ¿Los límites municipales en la parte alta de la cuenca no coinciden o es un error de los límites? Por favor verificar, imagino que puede ser por diferencias de escala, si es necesario ajustar.

Figura 1. Localización área de estudio.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

3.1 Definición de Flujos o Avenidas Torrenciales

Las avenidas o flujos torrenciales tienen múltiples definiciones y clasificaciones de acuerdo con investigaciones y criterios de diversos autores que han estudiado este tipo de fenómeno natural a lo largo de los años, y quienes los han descrito de acuerdo con la reología, la velocidad, geomorfología, entre otras características. Con base en lo anterior y de acuerdo con los diferentes conceptos que se encuentran en la literatura, se llega a la definición general que las avenidas torrenciales son una mezcla de agua y sólido (sedimentos y material vegetal) que se desplazan a altas velocidades a lo largo de un cauce, y que por su magnitud e impacto son altamente destructivas y en su mayoría impredecibles.

Comentado [8]: Complementar y unificar con el último párrafo de este capítulo

En Colombia las avenidas torrenciales desde el punto de vista hidrológico se definen como crecientes súbitas en cauces de montaña, las cuales son producto de eventos de precipitación de altas intensidades, de corta duración y, por tanto, alto caudal pico y flujo rápido, cuyo fenómeno puede subdividirse de acuerdo al material de arrastre que transporte la corriente (IDEAM, 2013); y se caracterizan por transportarse a altas velocidades y llevar gran cantidad de sedimento en volumen con relación al flujo de agua, es decir es un flujo denso, incluido material de arrastre de gran tamaño (rocas, troncos, etc.), los desbordamientos son extensos y violentos, los procesos de erosión y sedimentación son bruscos, en ocasiones se dan procesos de profundización de cauce dentro de una misma zona de depósito de eventos previos (MADS, 2014).

Y desde el punto de vista geológico y en relación con movimientos en masa, Hunger et al, 2001, describen las avenidas torrenciales como flujos de detritos con base en las características de los deslizamientos que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento semejante a un fluido, puede ser lento o rápido, saturado o seco; de esta manera los flujos de detritos se definen como “un flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de plasticidad

menor al 5%), que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada.

Otras características de los flujos torrenciales es que abarcan un enorme rango de formas de drenaje que van desde una pequeña cárcava que aparece espontáneamente en una ladera, a un gigantesco abanico aluvial del orden de decenas de kilómetros (Garzón et al. 2009, tomado de (MADS, 2014)); donde una forma de depositación del material sólido ocurre cuando el flujo de detritos alcanza el ápice del abanico de depositación, el canal se amplía y los clastos más gruesos son expulsados hacia los bordes para formar una especie de jarillones o albardones y el frente es sobrepasado por el material fino que acompañaba el flujo, tomando una forma lobulada gruesa (Hunger et al, 2001) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; así mismo, el caudal pico que presentan estos flujos, puede ser hasta 40 veces mayor que aquellos que causan una inundación (GEMMA, 2007).

Los flujos torrenciales se generan principalmente por causas hidrometeorológicas (lluvias intensas), acompañados de uno o varios deslizamientos superficiales de detritos en las cabeceras o por inestabilidad de segmentos del cauce en canales de pendientes fuertes; donde los flujos incorporan gran cantidad de material sólido (sedimentos y material vegetal) saturando el agua en su trayectoria al descender en el canal y finalmente los depositan en abanicos de detritos” (GEMMA, 2007); donde pueden causar grandes daños.

Comentado [9]: Complementar y unificar con la definición general del primer párrafo es este capítulo

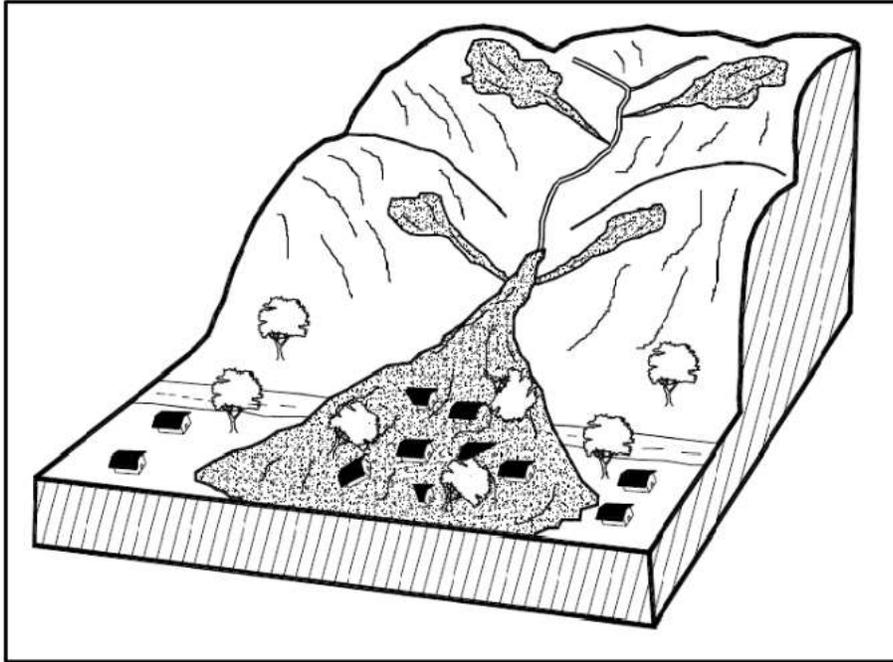


Figura 2. Esquema flujo de detrito (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001).

3.2 Clasificación de flujos torrenciales

La clasificación de los flujos torrenciales, al igual que su definición, es muy variada y se hace desde diferentes ámbitos, como por ejemplo, desde la geología y geomorfología, donde se basan en el comportamiento del flujo y se caracteriza de acuerdo con el tipo y concentración de material rocoso incorporado, ya sea en tamaño de bloque o sedimentos desde fino a muy finos, donde se consideran procesos erosivos de laderas como los movimientos en masa. Desde la hidráulica, se ha puesto mayor atención a las cuestiones hidrológicas y reológicas, es decir, al funcionamiento de estos mecanismos de transporte en masa (Brea y otros, 2005).

En este sentido, para el presente estudio se tomó como referencia la clasificación de algunos autores con diferentes criterios, pero con similitudes en su definición.

- (Hunger, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001)

Parten de la definición y clasificación que hace Varnes (1954 y 1879) sobre deslizamientos y analizan el comportamiento en forma de flujo, de acuerdo con el tipo y propiedades del material involucrado, la humedad, la velocidad, el confinamiento lateral, entre otras características; elaborando así la clasificación de los deslizamientos en forma de flujo como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1. Clasificación de deslizamiento en forma de flujo.

| Material | Contenido de | Condición especial | Velocidad* | Denominación | Designación en inglés |
|---|-------------------------------------|--|-----------------------|--|--|
| Limo, arena, grava, derrubios | Seco, húmedo o saturado | - No hay exceso de presión intersticial. - Volumen limitado | Varias | Flujo de arenas (limo, grava, derrubios) no licuables | Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow |
| Limo, arena, derrubios, roca débil ¹ | Saturado en la superficie de rotura | - Material licuable ³ - Contenido de humedad constante | Extremadamente rápida | Flujo deslizante o fluidización de arenas (limo, derrubios, rocas) | Sand (silt, debris, rock) flow slide |
| Arcilla sensitiva | En o por encima del límite líquido | - Licuefacción in situ - Contenido de humedad constante ⁴ | Extremadamente rápida | Flujo deslizante o fluidización de arcillas | Clay flow slide |
| Turba | Saturado | - Exceso de presión intersticial | Lenta a muy rápida | Flujo de turbas | Peat flow |
| Arcilla o tierra | Cercano al límite plástico | - Movimiento lento - Flujo rígido sin deformación cortante | Menor que rápida | Flujo (alud) de tierra | Earth flow |
| Derrubios | Saturado | - Canal - Incremento en el contenido de | Extremadamente rápida | Flujo de derrubios | Debris flow |
| Lodo | En o por encima del límite líquido | - Flujo de derrubios de granos finos | Mayor que muy rápida | Flujo (alud) de lodo | Mud flow |
| Derrubios | Presencia de agua libre | - Avenida (crecida) ⁶ | Extremadamente rápida | Torrente (crecida) de derrubios | Debris flood |
| Derrubios | Parcial o totalmente saturado | -Canal no consolidado -Relativamente superficial, origen con fuerte pendiente | Extremadamente rápida | Avalancha de derrubios | Debris avalanche |
| Roca fragmentada | Varios, principalmente seco | -Roca intacta en el origen -Gran | Extremadamente rápida | Avalancha de rocas | Rock avalanche |

- (Suárez, Control de erosión en zonas tropicales, 2001)

Presenta una clasificación en función del perfil del tipo de flujo, relacionando la altura y la distancia respecto al pie del flujo, de acuerdo con el registro de

“avalanchas” que han sido caracterizadas y descritas por diferentes autores, tal como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 3. Perfiles longitudinales del canal para diferentes tipos de flujo (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001).

De esta manera (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001) clasifica los flujos en: Flujos de Lodo, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 2. Tipos de flujo de acuerdo a las características de la mezcla y del canal (Suárez , Control de erosión en zonas tropicales, 2001).

| Características de los sedimentos | Concentración de sedimentos de la mezcla (Kg/m³) | Pendiente del canal | | | | |
|--|--|--|------------------------|----------|----------|---------|
| | | > 100% (45°) | 100 a 50% | 50 a 20% | 20 a 10% | 10 a 5% |
| Tipo de flujo | | | | | | |
| Más del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d < ASTM#200) | < 90 | Flujo hiperconcentrado | Flujo de lodo | | | |
| | > 90 | Flujo de lodo | | | | |
| Menos del 20% del peso total de sedimentos son partículas finas (d < ASTM#200) | < 300 | Flujo hiperconcentrado | | | | |
| | 300 a 600 | Flujo turbulento de detritos (Debris flow) | Flujo hiperconcentrado | | | |
| | 600 a 900 | Flujo turbulento de detritos (Debris flow) | | | | |
| | > 900 | Flujo laminar de detritos | | | | |

- O'Brien y Julien – Software (FLO 2D, 2017)

Estos autores en diversas investigaciones y artículos, describen y caracterizan los flujos como flujos hiperconcentrados de sedimentos, en donde clasifican cuatro categorías en función de la concentración de sólidos medida en peso o en volumen (¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.), que abarca desde inundaciones de agua hasta inundaciones de lodo, flujos de lodo y deslizamientos de tierra, sin embargo, implícitamente tiene en cuenta otras propiedades relacionadas con la reología y el comportamiento mecánico e hidráulico del fenómeno (Tabla 3). Esta caracterización hace parte de la base del software Flo 2D, el cual se describirá más adelante.

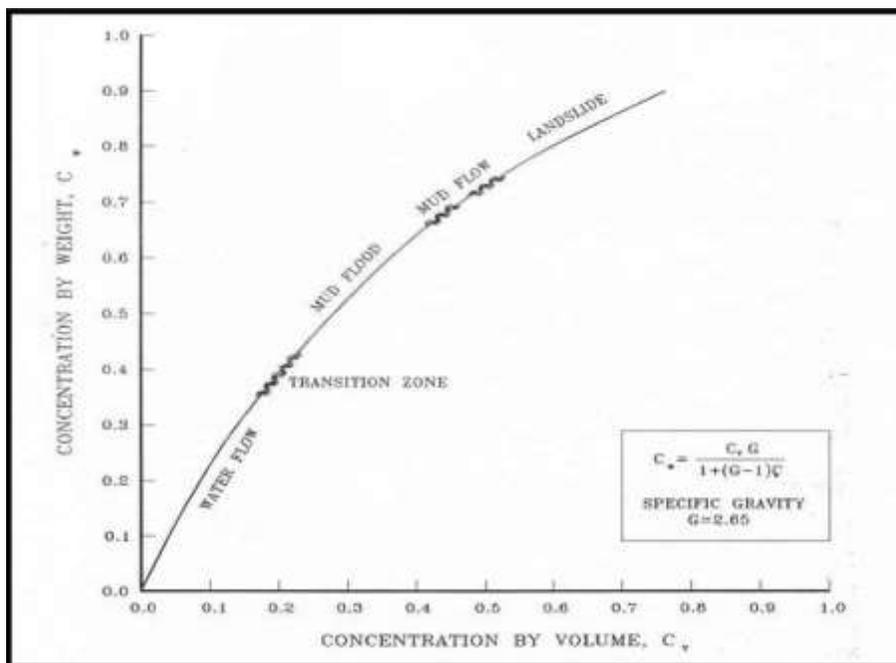


Figura 4. Clasificación de flujos en relación a la concentración de sedimentos.

Tabla 3. Clasificación de Flujos hiperconcentrados.

| Tipo de flujo | Concentración de Sedimento | | Características del flujo |
|--------------------|----------------------------|-------------|--|
| | En Volumen | En Peso | |
| Deslizamiento | 0.65 - 0.80 | 0.83 - 0.91 | No fluye; falla por deslizamiento. |
| | 0.55 - 0.65 | 0.76 - 0.83 | Falla por deslizamiento con deformación interna, creep lento anterior a la falla. |
| Flujo de lodos | 0.48 - 0.55 | 0.72 - 0.76 | Flujo evidente, creep lento; deformación plástica bajo el peso propio del material; cohesivo, no se extiende en superficie nivelada. |
| | 0.45 - 0.48 | 0.69 - 0.72 | El flujo se extiende sobre superficie nivelada; flujo cohesivo; alto de mezcla. |
| Creciente de lodos | 0.40 - 0.45 | 0.65 - 0.69 | El flujo se mezcla fácilmente; muestra propiedades de fluido en deformación; se extiende en una superficie horizontal, pero mantiene una superficie del fluido inclinada; contiene partículas de tamaño considerable; aparecen ondas, pero se disipan rápidamente. |
| | 0.35 - 0.40 | 0.59 - 0.65 | Marcado asentamiento de gravas; se extiende casi completamente en una superficie horizontal; superficie líquida con dos fases del fluido; hay ondas que viajan en la superficie. |
| | 0.30 - 0.35 | 0.54 - 0.59 | Las ondas viajan fácilmente; la mayoría de la arena y grava se mueven como carga de lecho. |
| | 0.20 - 0.30 | 0.41 - 0.54 | Presencia de ondas; superficie fluida; todas las partículas se encuentran en el lecho. |
| Agua | < 0.20 | < 0.41 | Creciente de agua con carga en suspensión y de lecho. |

- (Aristizábal, Arango, & García, 2019)

Finalmente, estos autores clasifican las avenidas torrenciales en tres tipos de acuerdo con los resultados de las diversas causas detonantes y la reología del flujo, asociada a la proporción agua-sedimentos y el tamaño de los sedimentos, de esta manera se clasifican así: (1) flujos de escombros canalizados, (2) inundación de escombros e (3) inundaciones súbitas (Tabla 4). Sin embargo, en un evento torrencial se puede presentar una combinación de diferentes tipos de avenidas torrenciales a través de su tiempo de desarrollo y a lo largo del espacio por el que se propaga, por lo tanto, no existen límites tajantes entre estos.

Tabla 4. Clasificación de avenidas torrenciales según Aristizabal et al., 2019.

| Característica Tipo de Evento | Creciente súbita | Flujo de escombros | Inundación de escombros |
|----------------------------------|---|--|---|
| Velocidad | Alta | Muy alta | Alta |
| Descarga pico | Alta | Muy alta | Alta |
| % sedimentos vol. | 0%-30% | >70% | 30%-70% |
| Aporte de sedimentos | Cauce | Laderas y cauce | Cauce y laderas |
| Tamaño de sedimento | Hasta tamaños centimétricos | Muy heterogéneo en tamaños hasta bloques métricos | Hasta bloque métricos |
| Reología del flujo | Flujo newtoniano de dos fases | Flujo de una fase no newtoniano | Flujo de dos fases |
| Tipo de transporte | Turbulencia | Fuerzas dispersivas, matriz cohesiva y boyancia | Fuerzas dispersivas y boyancia |
| Alcance espacial | Mayor | Menor | Medio |
| Orden drenaje | >2 | 1 y 2 | >2 |
| Morfología de cuenca | Cuencas más grandes y de menores pendientes | Cuencas pequeñas, laderas de mayores pendiente y cauces confinados | Cuencas más grandes y de menores pendientes |
| Capacidad de destrucción | Medio | Muy alto | Alto |

3.3 Características del modelo Hec-Hms - modelación pseudodistribuida de crecidas.

A partir de los datos elaborados, se realiza a continuación un análisis exhaustivo de las crecidas a partir del software informático HEC- HMS. Se trata de un programa de simulación hidrológica tipo evento, lineal y semidistribuido, desarrollado para estimar los hidrogramas de salida en una cuenca o varias subcuencas (caudales máximos y tiempos al pico), a partir de condiciones extremas de lluvias, aplicando para ello algunos de los métodos de cálculo de hietogramas de diseño, pérdidas por infiltración, flujo base y conversión en escorrentía directa.

El programa permite el cálculo del hidrograma producido por una cuenca mediante inputs como: datos físicos de la cuenca, datos de precipitaciones, etc.; además, permite establecer varias subcuencas, realizando los cálculos de escorrentía directa particularizados donde finalmente es capaz de componer los hidrogramas generando un hidrograma de salida de la cuenca.

Debido a que la microcuenca se subdividió en tres áreas, se ejecuta el programa HEC-HMS para cada una de ellas, de este modo, se analizará los caudales

proporcionados por todas las áreas aportantes, como detonantes de la avenida torrencial generada.

Por otro lado, en cuanto a la escogencia del periodo de retorno adecuado para las simulaciones del programa, se debe considerar que la microcuenca tiene una superficie pequeña y por lo tanto un tiempo de concentración corto, de este modo es recomendable diseñar para tiempos de concentración medios y cortos (Ponce, 2008). Atendiendo esta recomendación, se decidió trabajar con los valores concernientes a 50 años de periodo de retorno.

3.3.1 Componentes del sistema.

U.S. Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System es un software diseñado para simular procesos de precipitación-escorrentía en sistemas hidrológicos. El programa posee un completo entorno de trabajo integrado: base de datos, utilidades de entrada de datos, simulación y herramientas interactivas de consulta de resultados.

Comentado [10]: La redacción parecería que es otro programa, dar continuidad como subtítulo

El programa consta de tres partes principales:

- Modelo de cuencas
- Modelo Meteorológico
- Especificaciones de control

En el modelo de cuencas, se debe especificar las características físicas de la cuenca, en el modelo meteorológico, se introducen los datos pluviométricos y en las especificaciones de control, los tiempos computacionales. A continuación, se expone brevemente en qué consiste este software y los modelos que simula (Orio, 2011):

- a) **Modelo de cuenca (Basin Model):** Esta es la parte más importante del programa, donde se definen las características hidrológicas y geomorfológicas de las cuencas y los métodos de cálculo. En él se

conceptualiza el sistema hidrológico (cuencas, subcuencas, cursos fluviales, etc.).

Los elementos disponibles son: Subcuencas (subbasin), Tramos de propagación (reach), Embalses (reservoir), Confluencias de flujo (junction), Divergencias de flujo (diversion), Fuentes (source) y Sumideros (sink).

Los componentes básicos de la modelación son: Submodelo de precipitación (precipitation model), Submodelo de generación o infiltración (loss rate method), Submodelo de transformación de lluvia neta en escorrentía (runoff transformation method), Submodelo de propagación en cauces (routing reach method).

b) **Modelo Meteorológico (Precipitation Model):** Implementa el análisis de datos meteorológicos, incluyendo precipitación y evapotranspiración. Los componentes básicos son: Submodelo de precipitación (precipitation model) y Submodelo de evapotranspiración (evapotranspiration method).

Entre los modelos de precipitación se encuentran los siguientes: User Hyetograph, User Gage Weighting, Inverse-Distance Gage Weighting, Gridded Precipitation, Frequency Storm, Standard Project Storm- Eastern U.S, S.C.S. Hypothetical Storm.

c) **Parámetros de control de simulación (Control Specifications):** En esta utilidad se especifican los parámetros temporales de la simulación, fecha y hora de inicio de la simulación, fecha y hora de fin de la simulación, lapso de tiempo computacional.

3.4 Modelo bidimensional Flo-2D

El modelo bidimensional de diferencias finitas Flo-2D (O'Brien et al., 1.993) simula flujo de fluidos no-newtonianos, como los son los flujos torrenciales. El modelo permite simular flujo en topografías complejas, tales como áreas urbanizadas y

planicies de inundación, así como el intercambio de fluido entre los canales y la planicie de inundación. Puede modelarse diferentes flujos de acuerdo con la clasificación que hace O'Brien y Julien descrita anteriormente. De manera general como datos de entrada se requiere la topografía digital del terreno, la geometría del canal, valores estimados de la rugosidad del canal y de la planicie de inundación, hidrogramas de entrada (líquidos y sólidos), precipitación y propiedades reológicas de la mezcla agua – sedimento (Vergara, 2006).

En el modelo FLO-2D se aplican las ecuaciones de continuidad y de cantidad de movimiento en dos dimensiones (onda dinámica) y enruta los flujos de lodo como un continuo de fluidos al predecir el movimiento del fluido viscoso en función de la concentración de sedimentos. Se emplea un modelo reológico cuadrático para predecir tensiones viscosas y de rendimiento en función de la concentración de sedimentos y se observa la continuidad del sedimento. A medida que cambia la concentración de sedimentos para un elemento de grilla determinado, se simulan los efectos de dilución, el cese del flujo de lodo y la removilización de depósitos. Cabe señalar que los componentes de transporte de sedimentos y flujo de lodo no se pueden utilizar juntos en una simulación FLO-2D.

El esfuerzo cortante en los flujos con altas concentraciones de sedimentos, incluyendo los flujos de lodos y escombros, se calcula como la suma de los esfuerzos cortantes que lo componen.

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

Donde T_c es el esfuerzo cohesivo de fluencia, T_{mc} el esfuerzo cortante de Mohr-Coulomb, T_v el esfuerzo cortante viscoso, T_t el esfuerzo cortante turbulento y T_d el esfuerzo cortante dispersivo.

En términos de la relación cortante, el modelo propone el siguiente modelo reológico cuadrático:

$$\tau = \tau_y + \mu_0 \left(\frac{du}{dy} \right) + C \left(\frac{du}{dy} \right)^2$$

Donde μ_0 es la viscosidad dinámica del fluido, du/dy es la rapidez de deformación del fluido y C el coeficiente de esfuerzo cortante inercial, calculado en función de la concentración del fluido.

Para definir todos los términos de tensión de cizallamiento para su uso en el modelo FLO-2D, se adoptó el siguiente enfoque. Por analogía, a partir de la obra de Meyer-Peter y M'ller (1948) y Einstein (1950), la relación de tensión cortante es la profundidad integrada y reescrita en la siguiente forma como una pendiente sin dimensiones:

$$S_f = S_y + S_v + S_{td}$$

donde S_f es la pendiente de fricción total, S_y la de fluencia, S_v la de viscosidad y S_{td} la turbulento-dispersiva.

El parámetro de resistencia K para flujo laminar es igual a 24 para canales rectangulares anchos lisos, pero aumenta significativamente (~50.000) con rugosidad y geometría de sección transversal irregular. Woolhiser (1975), calcula los valores de K con relación a la superficie como se muestra en la Tabla 5, donde para el modelo FLO-2D si $K=0$, este valor se calcula automáticamente a partir del valor n de Manning.

Tabla 5. Parámetros de resistencia para un flujo laminar.

| Surface | Range of K |
|-------------------------------|----------------|
| Concrete/asphalt | 24 - 108 |
| Bare sand | 30 - 120 |
| Graded surface | 90 - 400 |
| Bare clay - loam soil, eroded | 100 - 500 |
| Sparse vegetation | 1,000 - 4,000 |
| Short prairie grass | 3,000 - 10,000 |
| Bluegrass sod | 7,000 - 50,000 |

El Flo2D formuló una solución de ecuación cuadrática para la ecuación de pendiente de fricción anterior. La velocidad estimada representa la velocidad de flujo calculada

Comentado [11]: Revisar y darle continuidad al texto

en cada cuadrícula o límite de elemento de canal utilizando la profundidad de flujo promedio entre los elementos. Se pueden suponer valores razonables del valor n de Manning y K para el canal y la resistencia al flujo terrestre.

El peso específico de la matriz de fluido γ_m , el límite elástico τ_y y la viscosidad η , varían principalmente con la concentración de sedimento. A menos que esté disponible un análisis reológico del material deposicional del sitio de flujo de lodo, se pueden usar las siguientes relaciones empíricas para calcular la viscosidad y el límite elástico:

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$$

y

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$$

donde α_i y β_i son coeficientes empíricos definidos por experimentos de laboratorio por O'Brien y Julien en 1988. Se muestra que la viscosidad y el límite elástico son funciones de la concentración volumétrica de sedimento C_v de limos, arcillas y, en algunos casos, arenas finas; estos no incluyen material clástico más grande en balsa junto con el flujo (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). La viscosidad de la matriz de fluido también es una función del porcentaje y tipo de limos y arcillas y la temperatura del fluido. Los flujos de lodo muy viscosos tienen altas concentraciones de sedimento y, en consecuencia, tensiones de alto rendimiento pueden dar lugar a un flujo laminar, aunque los flujos laminares en la naturaleza son extremadamente inusuales. Los flujos menos viscosos (inundaciones de lodo) se caracterizan por ser turbulentos.

Comentado [12]: Que es?

Comentado [13]: Ajustar

Tabla 6. Tabla de flujos

| Source | $\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ (dynes/cm ²) | | $\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ (poises) | |
|--------|---|--|---|--|
| | | | | |
| | | | | |

| <i>Field Data</i> | | | | |
|---|----------|-----------|-----------|-------|
| Aspen Pit 1 | 0.181 | 25.7 | 0.0360 | 22.1 |
| Aspen Pit 2 | 2.72 | 10.4 | 0.0538 | 14.5 |
| Aspen Natural Soil | 0.152 | 18.7 | 0.00136 | 28.4 |
| Aspen Mine Fill | 0.0473 | 21.1 | 0.128 | 12.0 |
| Aspen Watershed | 0.0383 | 19.6 | 0.000495 | 27.1 |
| Aspen Mine Source Area | 0.291 | 14.3 | 0.000201 | 33.1 |
| Glenwood 1 | 0.0345 | 20.1 | 0.00283 | 23.0 |
| Glenwood 2 | 0.0765 | 16.9 | 0.0648 | 6.20 |
| Glenwood 3 | 0.000707 | 29.8 | 0.00632 | 19.9 |
| Glenwood 4 | 0.00172 | 29.5 | 0.000602 | 33.1 |
| <i>Relationships Available from the Literature</i> | | | | |
| lida (1938)* | - | - | 0.0000373 | 36.6 |
| Dai et al. (1980) | 2.60 | 17.48 | 0.00750 | 14.39 |
| Kang and Zhang (1980) | 1.75 | 7.82 | 0.0405 | 8.29 |
| Qian et al. (1980) | 0.00136 | 21.2 | - | - |
| | 0.050 | 15.48 | - | - |
| Chien and Ma (1958) | 0.0588 | 19.1-32.7 | - | - |
| Fei (1981) | 0.166 | 25.6 | - | - |
| | 0.00470 | 22.2 | - | - |
| *See O'Brien (1986) for the references. | | | | |
| Conversion: Shear Stress: 1Pascal (PA) = 10 dynes/cm ² | | | | |
| Viscosity: 1Pas = 10 dynes-sec/cm ² =10 poises | | | | |

3.4.1 Solución numérica.

El modelo usa un esquema centrado de diferencias finitas explícito para la solución de las ecuaciones diferenciales de movimiento. La topografía de la superficie se

discretiza en una malla formada por celdas o elementos cuadrados de tamaño uniforme para toda el área de estudio y a cada elemento se le asigna una posición en la malla, una elevación o cota de terreno, un coeficiente de rugosidad (n de Manning), factores de reducción del flujo que atraviesa la celda para simular bloqueo por edificaciones o estructuras. Para una celda y un tiempo dado, se calcula el caudal neto que entra y sale por cada uno de los lados de dicho elemento. El cambio en el volumen resultante se distribuye uniformemente en el área disponible del elemento. Los pasos de tiempo varían según el criterio de estabilidad de Courant, lo que resulta en pasos de tiempo relativamente cortos, (típicamente entre 0.1 y 30 segundos); esto depende de los hidrogramas de entrada y del tamaño de la malla de cálculo (Vergara, 2006).

3.4.2 Programa Grid Developer System (GDS)

En cada una de estas celdas el modelo determina las velocidades y profundidades del flujo y requiere, entre otros datos, la elevación o cota de terreno de cada celda. El proceso de generación de malla para el modelo resulta muy tedioso y es altamente propenso a generar errores. Con el fin de agilizar este proceso, se utilizó el programa auxiliar GDS (Grid Developer System) (Vergara, 2006).

El punto de partida del programa auxiliar de generación de mallas GDS, es un algoritmo de interpolación mediante el cual se calculan las cotas de terreno de cada celda de cálculo, a partir de un conjunto de puntos (x_i, y_i, z_i) espaciados irregularmente. Cada punto está definido por sus coordenadas cartesianas horizontales x_i, y_i y por su elevación z_i . Esta definición, o modelo de la topografía de un terreno se denomina DTM por las siglas de "Digital Terrain Model". Debido a que los puntos DTM se dan en forma irregular en el espacio, es indispensable obtener la elevación en cada celda de la malla de diferencias finitas mediante interpolación (Vergara, 2006).

4 MARCO METODOLÓGICO

4.1 Recopilación de información secundaria

Se realizó la recopilación de información disponible en POMCA Guátara, SGC, IDEAM, ETC. Esta información fue fundamental en el desarrollo del estudio, considerando las limitaciones de desplazamiento por la Covid-19.

4.1.1 Cartografía base

Los Sistemas de Información Geográfica – SIG, juegan un papel importante en el procesamiento de información cartográfica base disponible para la zona de estudio. Por tanto, es importante mencionar que un Sistema de información geográfica, es un elemento funcional que comprende una gran cantidad de elementos sistémicos, los cuales desempeñan una función específica. Entre estos encontramos: los datos, los procesos, la visualización, la tecnología y los factores organizativos (Olaya, 2014).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante mencionar que la aplicación de los SIG se efectuó por medio del software ArcGIS 10.4, lo cual facilitó la identificación y manipulación de información oficial de la Corporación Autónoma Regional de Nariño, destacando el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Guátara, del cual hace parte el municipio de Guaitarilla y por ende, la microcuenca Cumac.

4.1.1.1 Modelo Digital de Elevación

De la información base disponible del POMCA Guátara se tomó el Modelo Digital de Elevación (DEM) de 12.5 metros (Alos palar), así como de la base de datos de la Corporación Autónoma Regional de Nariño, se identifica un modelo digital de elevación con una resolución de 5 metros del año 2008. Estos dos modelos mencionados anteriormente se encuentran referenciados con el sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste, en concordancia con la Resolución 471 de

Comentado [14]: Incluir un subcapítulo con lo que se hizo de topografía, puede subirse lo que está en el 7.1.2. o una parte

Comentado [15]: Por favor incluir una corta introducción, ahí coloque alguna idea

Comentado [16]:

Comentado [17]: Se usaron los 2 modelos? Aclarar como se usaron o cual fue la utilidad de cada uno. Si solo se uso uno el otro sobraría mencionarlo

2020, mediante la cual el instituto geográfico Agustín Codazzi promueven un sistema único de coordenadas para el estado colombiano, denominado CTM12.

Ahora bien, se debe entender que de acuerdo a Felisimo (1999) *“un modelo digital de elevaciones (MDE) se define como una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno”*.

El siguiente proceso para tratar fue la corrección espacial del insumo para tener una precisión más acertada en los productos, para lo cual se utilizó el Modelo Digital de Elevación de 5 metros aplicando la herramienta denominada “FILL DEM”, la cual permite rellenar espacios vacíos; con frecuencia, estos modelos representan errores ocasionados por la resolución de los datos o el acercamiento de valor entero más cercano.

Como resultado se obtiene un producto que garantiza la correcta representación del terreno. Todo este proceso se realiza con un constante acompañamiento del “BaseMap”, con el fin constatar algunas observaciones visualizadas que permitan iniciar con la delimitación microcuenca (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

Comentado [18]: Revisar

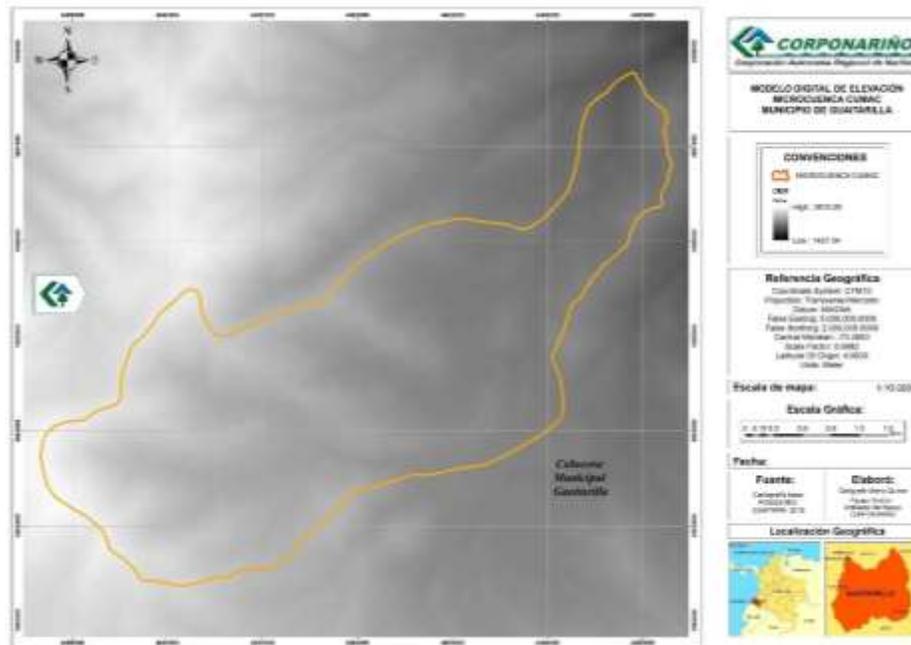


Figura 5. Modelo Digital de Elevación.

Entre las geo-herramientas hidrológicas que ArcGIS 10.4 ofrece, se aplicó la herramienta “FLOW DIRECTION”, la cual permite obtener la dirección del flujo de agua en base a la pendiente del terreno. Posteriormente, se aplicó la herramienta “FLOW ACUMULATION” lo cual permitió identificar los principales cauces de agua de la microcuenca Cumac; dicho lo anterior, la red de drenaje está contenida dentro del límite de la microcuenca y permite observar la conexión de los diferentes tributarios.

Ahora procedemos a aplicar la expresión logarítmica LOG10, a pesar de que esta herramienta solo sirve para la visualización, esta misma nos permite ubicar el punto de desfogue, el cual permitirá por medio de la herramienta “WATERSHADE” establecer la delimitación del área de estudio, cabe destacar que el unidad hidrográfica seguirá en formato ráster, por lo tanto, tendremos que convertirlo en un archivo vectorial, el cual nos facilitara la edición y la asignación de los diferentes

Comentado [19]: Los párrafos anteriores se menciona el procedimiento para la obtención del MDE, pero de aquí en adelante se empiezan a describir otros procedimientos que arrojan varios resultados, es conveniente organizar esta información con otros subtítulos dependiendo del resultado obtenido o una estrategia que permita una mejor interpretación (Ej.: 4.1.1.2., viñetas, numerales, etc...).

Comentado [20]: Ajustar los verbos de este capítulo a tiempo pasado, ya cambié algunos en los párrafos anteriores como ejemplo.

atributos (morfometría, simbología, etiquetado, entre otros).



Figura 6. Visualización geoproceso Flow Accumulation - herramienta Log10.

Llegado a este punto se procede a obtener un nuevo producto del DEM denominado patrón de drenaje, por medio de la herramienta “STREAM LINE” y “STREAM ORDER” las cuales identificarán el cauce principal y sus tributarios. A continuación, se utilizará una nueva herramienta para obtener un archivo vectorial, este proceso se constató con la obtención de una imagen satelital Sentinel II B por medio de fotointerpretación, lo cual generará un producto verídico a la realidad de la red de drenaje y sus componentes. Una vez adquirido este resultado y para comprender mejor la delimitación de la microcuenca se procede a obtener las curvas de nivel.

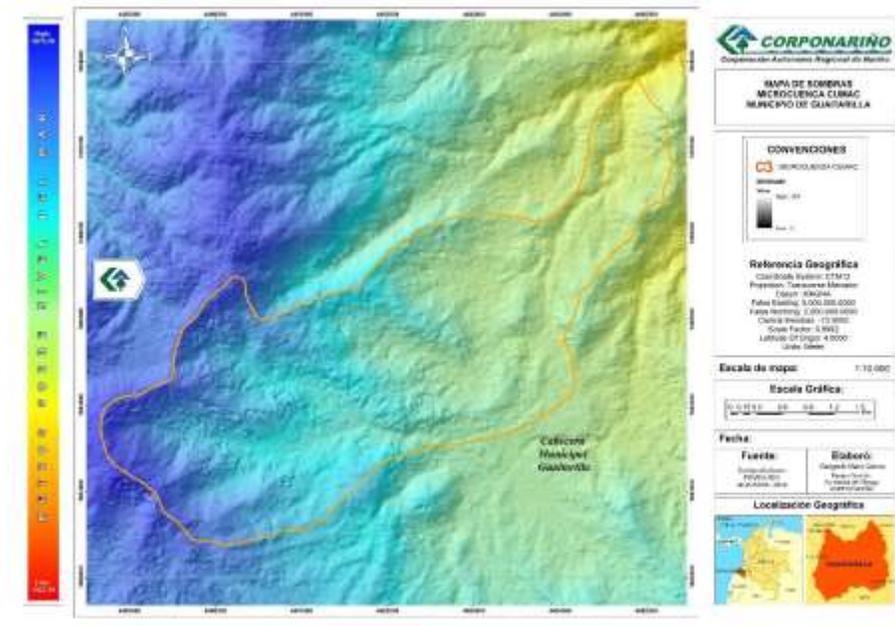


Figura 7. Mapa de sombras.

Comentado [21]: Siguiendo la secuencia del texto aquí debería ir el mapa de curvas de nivel. Este mapa podría ir después.

Dicho lo anterior, hay que comprender que las curvas de nivel permitirán la identificación de la altitud en metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), se debe tener en cuenta la escala 1:10.000 que ofrece el modelo digital de elevación de 5 metros, es decir, que la distancia entre curvas es de 20 metros. Este proceso se lleva a cabo por medio de la herramienta "CONTOUR". Ahora, se puede decir que el objeto principal de cruzar el flujo de dirección, acumulación y las curvas de nivel, es identificar la divisoria de aguas y la correcta distribución de la red de drenaje. Por último, se constató el resultado con el "Hillshade" o mapa de sombras el cual se obtiene a partir del DEM, el cual permite observar un modelo en 3D de la realidad del terreno.

Volviendo a la revisión del POMCA del río Guáitara se identificó la delimitación de las microcuencas que hacen parte de este plan y se comparó la veracidad del producto. Para finalizar se exportó la delimitación de la microcuenca en un archivo

en formato KML, el cual se constató con el Geovisor Google Earth obteniendo un producto de calidad.

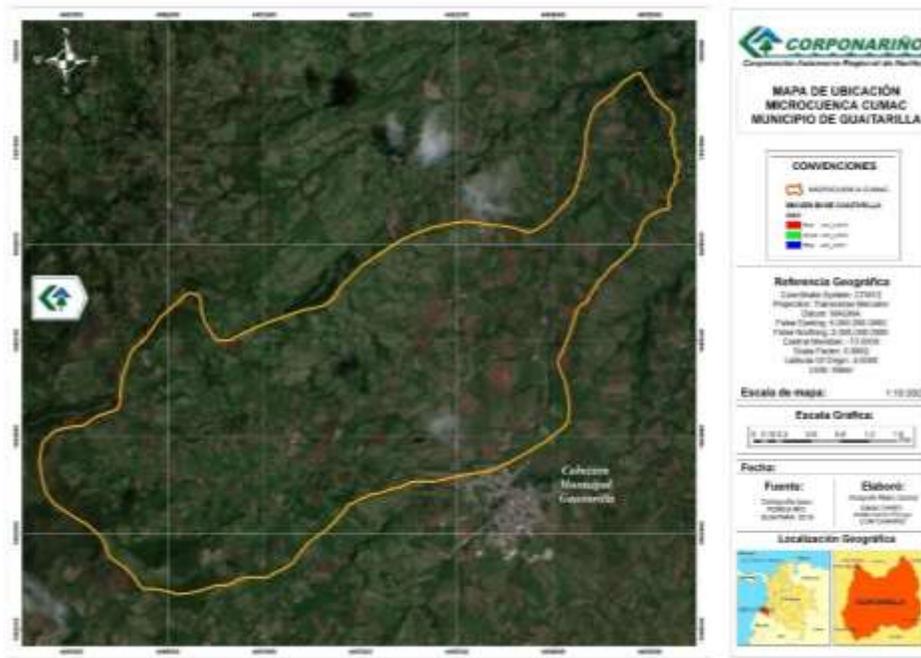


Figura 8. Delimitación microcuenca Cumac municipio de Guaitarilla.

Se debe agregar que, a partir de las curvas de nivel, se pueden generar insumos como un Modelo de Red Irregular Triangular – TIN, el cual, según ESRI 2016 “... son una forma de datos geográficos digitales basados en vectores y se construyen mediante la triangulación de un conjunto de vértices (puntos). Los vértices están conectados con una serie de líneas para formar una red de triángulos”.

Es importante resaltar que, las curvas de nivel, el Modelo de Red Irregular Triangular - TIN y el Modelo Digital de Elevaciones – DEM, son insumos de gran importancia para la interpretación geográfica del entorno de la microcuenca Cumac.

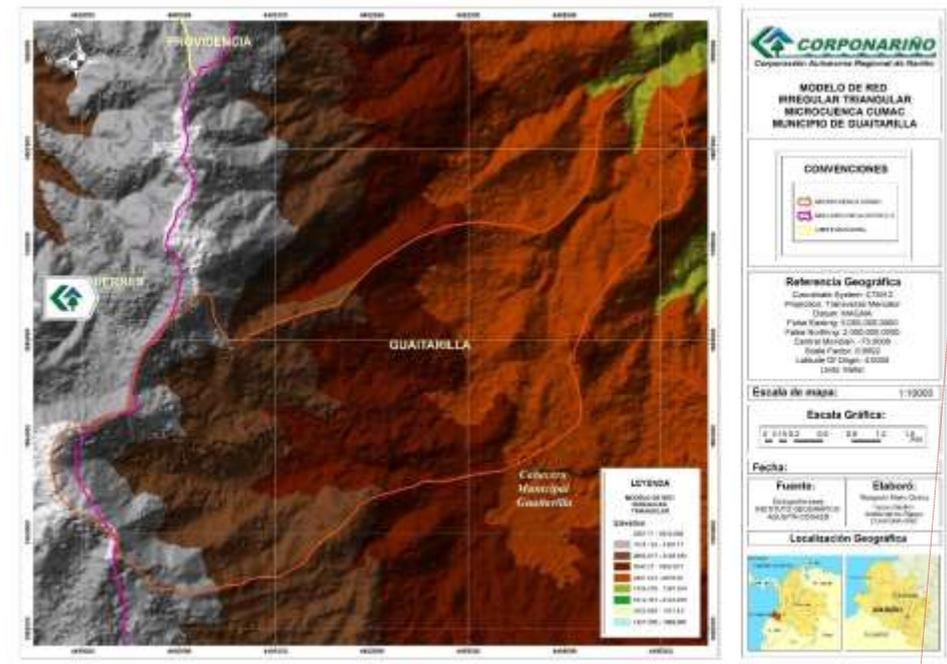


Figura 9. Modelo de Red Irregular Triangular - TIN.

Comentado [22]: Ajustar la delimitación del municipio con la cuenca

4.1.2 Hidrología

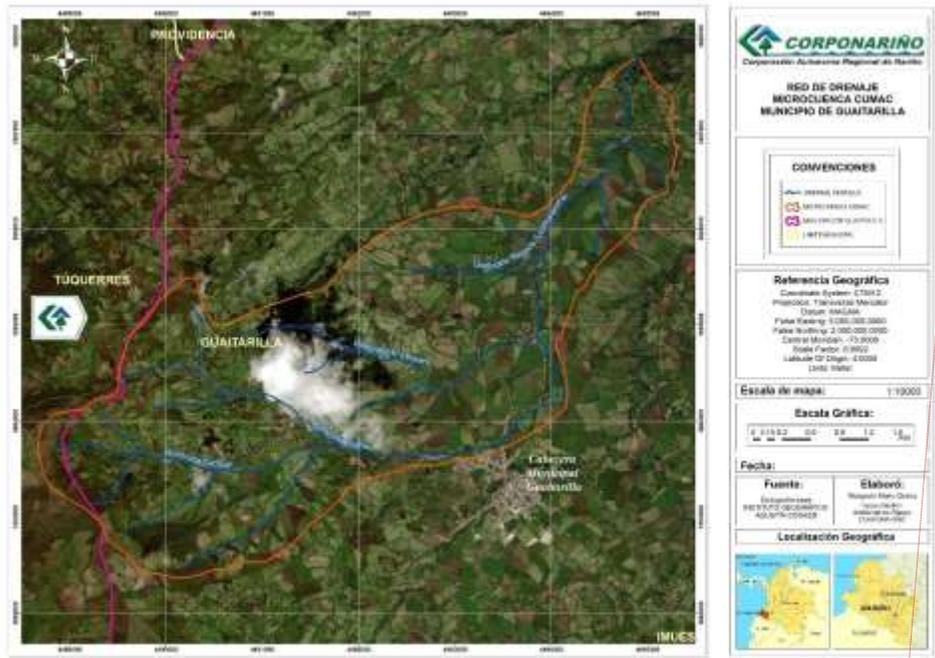
4.1.2.1 Red de drenaje y puntos de desagüe.

Este parámetro está asociado al transporte superficial de agua, existen corrientes o flujos de un menor orden que están continuamente aportando con el recurso hídrico, específicamente al cauce principal. La red de drenaje está determinada por tres cauces principales, el primero corresponde a la quebrada carrizal, ubicada en la parte superior de la microcuenca y que posteriormente confluyen aguas abajo con la quebrada Cumac, la cual tiene su recorrido en la periferia del casco urbano de Guaitarilla y que al final metros más abajo, se une a la quebrada El Lechero. El flujo va en dirección oeste – norte pasando por la Vereda el Rosal y terminado aguas

Comentado [23]: Por favor incluir una corta introducción

abajo como afluente de otra red de drenaje **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Comentado [24]: Revisar



Comentado [25]: Ajustar la delimitación del municipio con la cuenca, así mismo los nombres de los municipios

Figura 10. Red de drenaje.

4.1.2.2 Morfología de la Red de drenaje de la Microcuenca Cumac.

La red de drenaje de la microcuenca Cumac es de tipo dendrítico, la cual se caracteriza por presentar una ramificación arborescente en la que los tributarios se unen a la corriente principal formando ángulos agudos (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**) (CEOTMA, 1981), donde las corrientes se asemejan a las ramificaciones de un árbol frondoso. Este tipo de drenaje se desarrolla principalmente cuando las rocas presentan una resistencia a la erosión uniforme y no ejercen un control directo sobre la dirección de crecimiento del valle.

Comentado [26]: Revisar

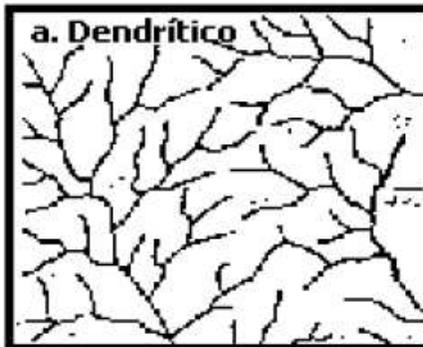
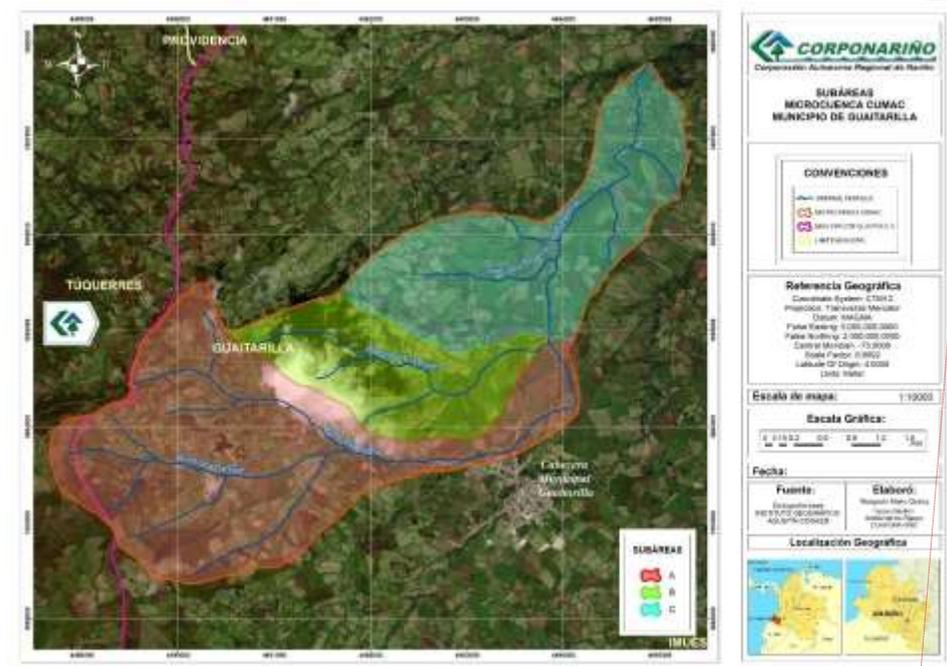


Figura 11. Esquema Red de drenaje tipo dendrítico.

Debido a la relativa uniformidad del sustrato y similar resistencia a la erosión, la forma del patrón dendrítico está determinada básicamente por la dirección de la pendiente del terreno (TARBUCK & LUTGENS, 2005).

4.1.2.3 Características hidromorfológicas.

Las características hidromorfológicas sirven para caracterizar una cuenca desde el punto de vista físico. La microcuenca objeto de estudio se dividió en tres áreas de acuerdo con la morfología del terreno y a la red de drenaje respectiva. La primera área recoge las aguas de la parte alta de la microcuenca con varios afluentes, entre los que se destacan las quebradas Carrizal y Cumac; la segunda área recoge las aguas de la quebrada El Lechero, confluyendo al final con el área 1; la tercera área recoge el agua de las dos anteriores y de algunos afluentes aguas abajo, terminado al final en el punto de desagüe.



Comentado [27]: Ajustar la delimitación del municipio con la cuenca

Figura 12. Mapa de subdivisiones.

En la siguiente tabla, se presentan las características de las áreas que conforman la microcuenca objeto de estudio y el punto de desagüe correspondiente a la desembocadura aguas abajo.

Tabla 7. Características morfométricas de las áreas aportantes.

| AREA | COTA | | DESNIVEL | AREA | PENDIENT E |
|------|--------|--------|----------|------|---------------|
| | MAXIMA | MINIMA | | | |
| 1 | 3475 | 2562 | 913 | 7.21 | 42.70 |
| 2 | 3125 | 2562 | 563 | 2.66 | 36.25 |
| 3 | 2950 | 2285 | 663 | 4 | 32.70 |

- **Perímetro:** Es la longitud del límite exterior de la cuenca. Su magnitud depende de la superficie y la forma de la cuenca.

El perímetro de la microcuenca es de una longitud aproximada de: $P = 19.95 \text{ KM}$

- Superficie: Es el parámetro más importante de una cuenca. En realidad, no es posible medir la superficie real de la cuenca en un mapa, sino que se aproxima por el área de la proyección de la cuenca.

El área de la microcuenca estudiada es: $A = 14.28 \text{ km}^2$

- Longitud del cauce principal: La definición de cauce principal viene asociada a una característica hidrológica, siendo el curso de la red de drenaje que vincula mayor flujo de agua, es decir, por el que circula un mayor caudal.

Habitualmente suele coincidir con el cauce de mayor longitud, pero no siempre es así, puesto que pueden existir superficies más generadoras de escorrentía asociadas a tramos más cortos.

La longitud del cauce principal es de 9.9 km

Comentado [28]: Unificar definiciones de la tabla con el texto e incluir unidades de medida en la tabla

4.1.3 Cobertura y uso del suelo

Para la identificación de la cobertura y uso actual del suelo se utilizó la metodología propuesta por el Soil Conservation Service (S.C.S.) de los Estados Unidos, la cual permite realizar cálculos para determinar parámetros hidrológicos que se emplean en la modelación hidrológica del presente estudio.

En la Tabla 8, se describen los conceptos dados para la clasificación de usos de suelo propuesta por el S.C.S., de acuerdo con el NRSC en 2004, citado por Sánchez en 2017:

Tabla 8. Clasificación de usos de suelo propuesto por el S.C.S

| Uso de la Tierra | Descripción |
|------------------|--|
| Barbecho | Tierra de cultivo que no siembra. El porcentaje de explotación agrícola que se suele encontrar en este estado depende de la periodicidad de las siembras. Se denomina de "año y vez" o "al tercio", según se cultive uno de cada dos o tres años, respectivamente. Las tierras que están en barbecho reciben generalmente algunas labores que contribuyen a reducir el |

| | |
|---|---|
| | grado de escorrentía, pero éste es siempre importante, debido a la escasa cantidad de la vegetación. |
| Cultivos en hilera | Tierras sembradas de cultivos plantados formando hileras, lo que permite realizar entre ellas determinadas labores agrícolas, destinadas a mullir el terreno, quitar las malas hierbas, etc., mientras que las plantas se desarrollan. |
| Rotación de Cultivos | Es la secuencia cíclica de cultivos en una determinada parcela de explotación agrícola. La duración del ciclo, variable con el tipo de cultivos, frecuentemente está comprendida entre dos y siete años. Desde el punto de vista hidrológico, conviene establecer la siguiente división: Rotación pobre: o con escasa densidad de cobertura vegetal. Se refiere a las diversas combinaciones de cultivos en hilera y barbecho. Rotación densa: se denomina a la que, junto con cultivos en hilera o cereales de invierno, incluye una porción importante de alfalfa, trébol u otras siembras de alta densidad de cobertura. |
| Praderas | Se agrupan en esta categoría el conjunto de cultivos cuyo aprovechamiento constituye la base de alimentación de ganado. A su vez se clasifican en: Pobres: bajo un intenso régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en menos del 50% de la superficie, como son los pastizales. Medias: bajo un moderado régimen de pastoreo o con cobertura vegetal en un porcentaje de la superficie total comprendido entre el 50 y el 75%. Buenas: bajo un pastoreo ligero o con cobertura vegetal en más del 75% de la superficie total. Muy buenas: se consideran dentro de este grupo las praderas artificiales, las praderas naturales mixtas y los prados naturales, cuando están explotados en régimen de pastoreo. La vegetación es densa, abundante, homogénea y de cierta altura. |
| Plantaciones regulares de aprovechamiento forestal | Comprende las plantaciones regulares de árboles tales como los eucaliptos, etc. Se han establecido grupos basándose en las características de la cobertura vegetal no arbórea: |

| | |
|-------------------------|---|
| | <p>Pobres: prácticamente no existe otro tipo de vegetación que la propiamente arbórea. El matorral, las herbáceas espontáneas e incluso el material vegetal no descompuesto, son eliminadas, por ejemplo, con el pastoreo.</p> <p>Medias: existe alguna vegetación además de la arbórea, o bien material vegetal no descompuesto. Sin embargo, una parte del suelo carece de protección.</p> <p>Buenas: la vegetación (matorral, herbáceas espontáneas, etc), y la materia vegetal no descompuesta cubren el terreno.</p> |
| Masas forestales | <p>Se denominan así las superficies de terreno en las cuales se desarrolla vegetación leñosa arbórea o arbustiva, tales como el monte alto o los bosques. De acuerdo con la densidad de dicha vegetación se divide en a) muy espesas b) espesas; c) medias; d) claras y e) muy claras (árboles o arbustos diseminados). Dentro de la categoría “masas forestales” en la Tabla tipología de usos de suelo, no se han establecido diferencias en cuanto a pendiente, por considerar que no es frecuente que exista este tipo de aprovechamiento en terrenos llanos.</p> |

La identificación de las coberturas de la tierra presentes en la microcuenca Cumac del municipio de Guaitarilla, se realizó con base en los insumos cartográficos generados para este estudio y siguiendo la metodología que se muestra en **¡Error!**

No se encuentra el origen de la referencia..

Comentado [29]: Revisar continuidad del texto

Comentado [30]: Revisar



Figura 13. Esquema de interpretación visual de espacios naturales S.C.S de los EEUU.

Considerando la importancia de los sensores remotos, los cuales pueden clasificarse en activos y pasivos, en el presente estudio se utilizaron los tipo pasivos, los cuales están compuestos por detectores o sensores que registran la cantidad de radiación electromagnética reflejada (relacionada con la radiación solar), que es emitida desde la superficie terrestre y los objetos sobre ella. Proyecto satelital colombiano de observación de la Tierra / Comisión Colombiana del Espacio – CCE.

Este tipo de sensores tienen sensibilidad multispectral, lo cual significa que recogen simultáneamente datos de diferentes bandas espectrales. Hecha esta salvedad, para la elección de la imagen se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

- A. La imagen tenga un cubrimiento total del área de estudio.
- B. La inexistencia de nubosidad en la zona de interés.
- C. Una imagen satelital del año 2020, que cuente con los criterios expuestos anteriormente.

Teniendo en cuenta lo anterior, consultaron algunas plataformas que brindan este tipo de productos; principalmente se revisó la plataforma del Geovisor Google Earth, el servicio Geológico Estadounidense y la plataforma SAS planet.

Sin embargo, debido a las condiciones de nubosidad de algunas zonas de la microcuenca, la baja calidad de algunas imágenes satelitales y la falta de información actualizada, se procedió a la revisión de una cuarta plataforma denominada Copernicus, de la cual se extrajo una imagen satelital gratuita denominadas SENTINEL 2B del mes de febrero de 2020.

Una vez obtenidas las imágenes, se logró visualizar e identificar los usos de la tierra siguiendo la clasificación propuesta por el S.C.S de EEUU. Dentro de la microcuenca se distinguen seis tipos de coberturas diferentes, las cuales se agrupan en praderas, masas forestales, cultivos en hilera, rotación de cultivos y área urbana o construida.

A fin de obtener los insumos cartográficos con la información detallada de las coberturas, se procesa la información con apoyo del software ArcGIS.

Inicialmente el proceso a realizar es la composición de bandas por medio de la herramienta "Image Analis"; se utilizaron las siete primeras bandas y una composición con la octava banda que posee una resolución de 10 metros, el resultado es un archivo temporal con la imagen compuesta en Red, Green, y Blue (RGB). Luego de esto, se procedió a exportar como un archivo Raster obteniendo una cuadrícula de pixeles, en la que cada celda contiene un valor que representa información, esto permitió visibilizar la realidad espacial y la dinámica, de las diferentes coberturas existentes en la microcuenca Cumac.

Para la identificación de coberturas en primera instancia se procede a la creación de un "shapefile" entendido este como un formato vectorial de almacenamiento digital donde se guarda la localización de los elementos geográficos. A continuación, se utilizó el shapefile de puntos de control por cada tipo de cobertura identificada en

Comentado [31]: Ajustar el procedimiento que continua, pasa algo similar al capítulo 4.1.1.1., en relación a los tiempos de los verbos y el orden del procedimiento (Ej.: organizar por viñetas o numerales, etc...).

la imagen satelital, para crear una firma espectral, utilizando la herramienta "Create Signature".

Como resultado, la firma espectral se procede a utilizar con la función "Maximum likelihood classification", un proceso sistematizado del software ArcGIS, este permite ejecutar una clasificación de máxima verosimilitud sobre un conjunto de bandas de ráster y crea un ráster clasificado con las coberturas identificadas.

En síntesis, lo que hace es agrupar los pixeles para cada clase que fue determinada en la firma espectral obteniendo las seis clases siguientes:

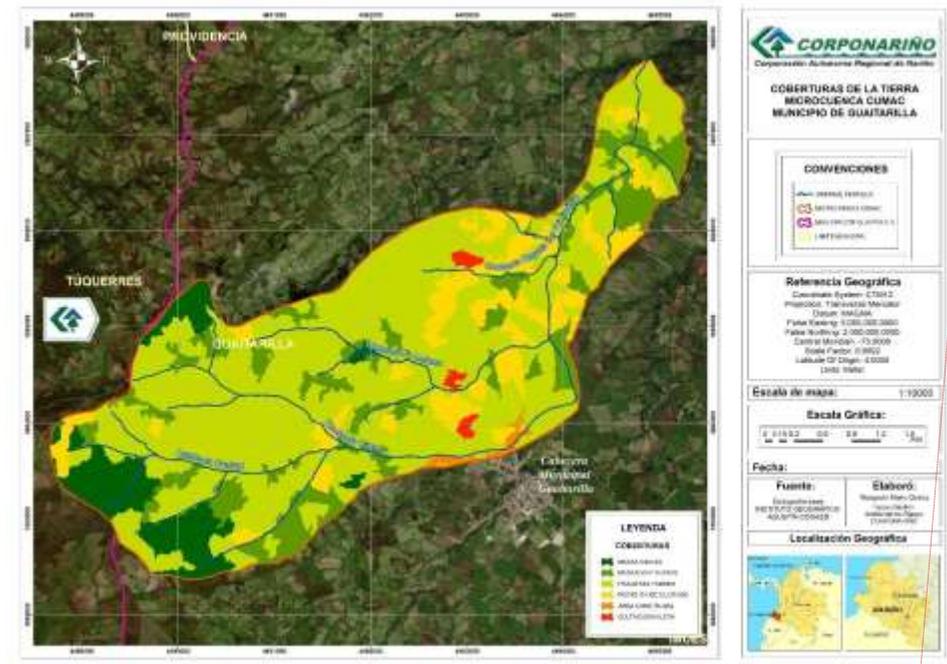
Establecida la clasificación supervisada de la imagen, se obtuvo un resultado que facilito el establecimiento de las categorías. Se debe tener en cuenta que el resultado continúa en formato ráster, por lo tanto, se ve la necesidad de vectorizar (conversión de ráster a polígono) a través de un proceso computarizado, el cual pueda ser manipulado y permita su edición, para la identificación y clasificación de las coberturas vegetales, obteniendo así datos importantes como las áreas por cada cobertura en hectáreas y poder establecer la escala de trabajo. Para la imagen SENTINEL 2b se trabajó con una unidad mínima cartografiable de 0.5 Hectáreas a una escala de 1/15.000 lo cual permite tener un producto detallado.

En este sentido y de acuerdo con la metodología descrita anteriormente se identificó las siguientes coberturas de la tierra que se aprecian en la **Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y sus respectivos porcentajes como se muestra en la Tabla 9.

- **Praderas pobres o de baja densidad:** Abarca 896,47 hectáreas, siendo el 62,74% de la microcuenca. De acuerdo con las observaciones realizadas en las imágenes disponibles para el área de estudio, se pudo evidenciar que este tipo de cobertura es el de mayor extensión, conformado por retazos de potreros con cobertura de pastos naturales de muy baja densidad.

Comentado [32]: Ajustar

- **Masas forestales con densidad muy clara:** Este tipo de cobertura corresponde a 214,51 hectáreas, ocupando el 15,01% de la microcuenca. En las imágenes se puede identificar cobertura vegetal boscosa de porte arbustivo, la cual se encuentra fragmentada principalmente hacia los bordes de los afluentes de la microcuenca.
- **Rotación de cultivos pobres:** Las coberturas de rotación de cultivos pobre o con escasa densidad de cobertura vegetal ocupa un área de 176,43 hectáreas, representando el 12,35% del área total; este tipo de uso de suelo se encuentra disperso en toda la microcuenca y se caracteriza por las áreas de rastrojos (suelo removido) dispuestos para la siembra de cultivos.
- **Masas forestales con densidad media:** Ocupa una extensión de 121,55 hectáreas, siendo el 8,5% del área total de la microcuenca; este tipo de cobertura vegetal se observa hacia la parte alta de la microcuenca, donde se distingue mayor concentración de zonas boscosas donde la densidad de especies arbustivas y arbóreas es mayor con relación a la anterior cobertura.
- **Cultivos en hilera:** Los cultivos en hilera ocupan un área de 10,45 hectáreas, representando el 0,73% de la microcuenca. En las imágenes se pueden distinguir el establecimiento de cultivos en hilera en pequeños retazos de suelo; según el Plan de Desarrollo Municipal 2016- 2019 "Guaitarilla: un campo de oportunidades"; el subsector agrícola divide los principales cultivos de importancia económica en: Transitorios (trigo, frijol, papa y arveja, entre otros) y Anuales (maíz, frijol voluble, arracacha), los cuales se desarrollan como economía doméstica.
- **Área construida:** El área urbana o construida ocupa una extensión de 9,5 hectáreas. siendo el 0,66% del área total de la microcuenca; representa la cobertura más pequeña de la microcuenca y abarca viviendas rurales y parte del área urbana del municipio.



Comentado [33]: Unificar leyenda del mapa con las unidades del texto (el texto completo), preferiblemente también mostrarlas en el mismo orden

Figura 14. Mapa de cobertura de la tierra.

Tabla 9. Porcentaje de cobertura de la tierra.

| No. | Cobertura y usos de la tierra | Área (Ha) | Porcentaje |
|--------------|---|----------------|---------------|
| 1 | Masas forestales con densidad media | 121,55 | 8,51 |
| 2 | Masas forestales con densidad muy clara | 214,51 | 15,01 |
| 3 | Praderas pobres o de baja densidad | 896,47 | 62,74 |
| 4 | Rotación de cultivos pobres | 176,43 | 12,35 |
| 5 | Cultivos en hilera | 10,45 | 0,73 |
| 6 | Área construida | 9,5 | 0,66 |
| TOTAL | | 1428,91 | 100,00 |

4.1.4 Geología.

La caracterización y descripción de las unidades geológicas de la zona de estudio se realizó en tres fases, la primera donde se recopiló información secundaria a partir de la cartografía disponible del POMCA del río Guátara a escala 1:25.000 y la plancha 429 Pasto a escala 1:100.000, en la segunda fase se verificó esta información con la cartografía base generada para este estudio, donde se corroboró, identificó y clasificó las unidades geológicas existentes en la zona de estudio y finalmente se ajusta y elabora el mapa de unidades geológicas correspondiente (figuraxx).

En este sentido se identificaron tres unidades geológicas que se describen a continuación y se observan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

Comentado [34]: Revisar

- **Lavas y Cenizas (TQvlc):** Esta unidad fue descrita por Murcia y Cepeda en 1984, en la plancha 429 Pasto, quienes la describen como lavas y flujos cubiertas por capas de cenizas que se encuentran intercaladas entre sí. Su origen se encuentra relacionado con la actividad de los volcanes Galeras, Morasurco, Bordoncillo, entre otros volcanes extintos de la zona.

De acuerdo con la descripción geológica del POMCA del río Guátara, esta unidad es una de las más representativas de esta cuenca hidrográfica y cubre el **xx% del municipio de Guaitarilla y el xx%** de la cuenca Cumac. Se presenta como depósitos de bloques de rocas ígneas con textura porfírica y afanítica con minerales como plagioclasa, feldespato potásico, cuarzo como minerales primarios y biotita y anfíboles (hornblenda) como minerales secundarios, los cuales se encuentran en una matriz de color gris y tamaño de grano muy fino; estos bloques son muy angulares y poco redondeados y se encuentran intercalados con capas de arena de color café.

Las rocas de esta unidad se encuentran altamente diaclasadas y presentan un alto grado de meteorización, lo cual da lugar a la generación de suelos **residuales y**

saprolitos de espesor considerable, mostrando tonalidades rojizas y crema en sectores meteorizados, a causa de alteraciones de óxidos de hierro, producto de la oxidación de minerales micáceos y minerales ferrosos.

Comentado [35]: Los saprolitos hacen parte de los suelos residuales

- **Depósitos piroclásticos (Q2dp):** Con base en la descripción geológica del POMCA de la cuenca del río Guáitara, esta unidad se caracteriza por presentar una alternancia de capas de lapilli y cenizas fina y gruesa, de tipo ash fall, se presentan en algunos sectores más consolidados por lo cual se podrían clasificar como tobas de ceniza, mientras que en otros sectores están menos consolidadas. Presentan colores cafés y grises, no se presentan muy diaclasadas ni fracturadas.

Comentado [36]: Describir la ubicación espacial de esta en unidad en la cuenca

- **Depósitos aluviales (Qal):** Esta unidad corresponde a los depósitos aluviales del cauce de las quebradas que se encuentran en la quebrada Cumac. Las acumulaciones aluviales están conformadas por partículas tamaño bloque, canto, grava, arena, limo y arcilla, de muy variada composición litológica, con o sin matriz, donde los clastos son de subredondeados a redondeados, heterométricos con diámetros entre 2 y 40 centímetros, composicionalmente corresponde a rocas ígneas volcánicas.

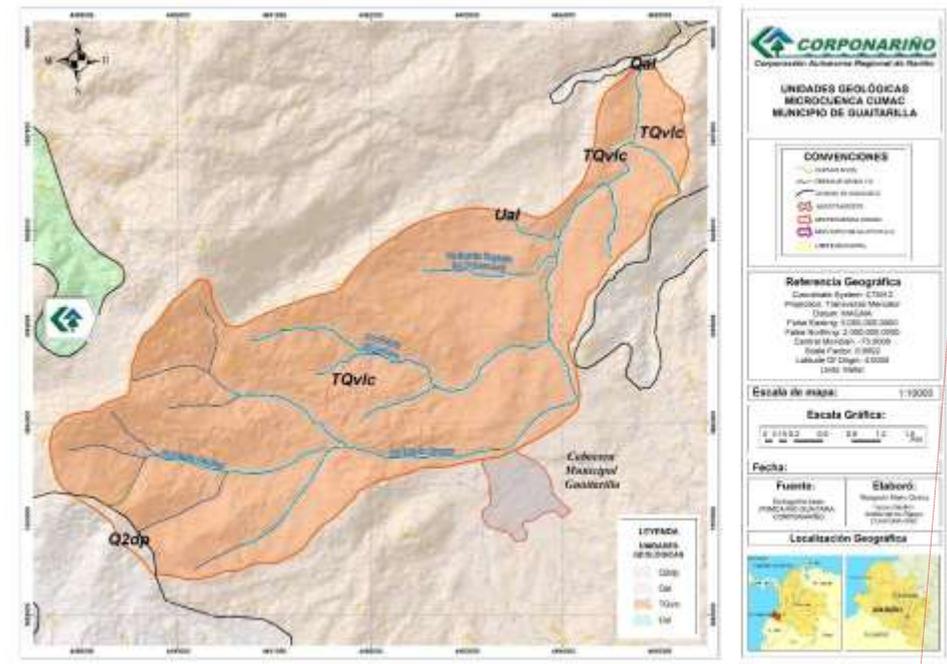


Figura 15. Mapa de Unidades Geológicas.

4.1.5 Geomorfología.

Para la identificación de las unidades geomorfológicas, en primera instancia se tomó como base la caracterización cartográfica del POMCA del río Guaitara y la memoria de la Geomorfología de la plancha 429, posteriormente se tomó la información cartográfica generada en el presente estudio para corroborar la información secundaria y finalmente se generó el mapa de unidades geomorfológicas a escala 1:25.000 de la microcuenca Cumac.

En este sentido de acuerdo con lo establecido en la “Propuesta de estandarización de la cartografía geomorfológica en Colombia” (Carvajal, 2012), se identificaron y describieron cinco Subunidades Geomorfológicas (figuraxx), que corresponden a tres ambientes morfogenéticos que son los que agrupan las condiciones físicas

Comentado [37]: Borrar el nombre de la unidad Ual.y ajustar la Qal ¿Que es el área verde? Revisar todo el mapa

químicas, bióticas y climáticas en las que se generaron las unidades geomorfológicas. Cada geoforma individual es genéticamente homogénea, generada por un proceso geomórfico constructivo o destructivo (Acumulación o erosión) (Carvajal, 2012) y enmarcan cada una de las subunidades presentes en la zona de estudio.

4.1.5.1 Ambiente Denudacional.

Dentro de estas geoformas se encuentran aquellas que presentan una expresión morfológica definida por la acción combinada de procesos moderados a intensos de meteorización, erosión y transporte de origen gravitacional y pluvial que remodelan, dejando remanentes de las unidades preexistentes y de igual manera, crean nuevas unidades donde se acumulan los sedimentos. Gran parte de las geoformas de este ambiente son producto de procesos denudacionales sobre ambientes que inicialmente eran volcánicos (SGC, 2015).

- **Loma denudada (Dld):** Son prominencias topográficas con una altura menor de 200 metros sobre su nivel de base local, con una morfología alomada y elongada, laderas cortas a muy cortas, convexas y pendientes muy inclinadas a muy abruptas. Su origen es relacionado a procesos intensos de meteorización y erosión diferencial sobre depósitos volcánicos; son el resultado del modelamiento de lo que inicialmente correspondía a unidades de origen volcánico. Esta subunidad aflora hacia el noreste de la zona de estudio, cubriendo el 10% y se encuentra modelando depósitos de lavas y ceniza.
- **Lomo denudado bajo de longitud larga (Dldebl):** Se presentan como conjuntos de lomos o filos con formas alargadas en dirección perpendicular al drenaje principal, con índice de relieve relativo menor a los 250 m y la longitud del eje principal es mayor a 1000 m; el tope o la parte superior puede tener diferentes formas definidas por el grado de incisión del drenaje, el tipo de saprolito que ha llegado a desarrollar la roca dominante y por los procesos erosivos que lo han modelado. La inclinación y orientación del eje del lomo puede informar de procesos y velocidades de levantamiento del conjunto

cordillerano o de la velocidad de la erosión del río principal o eje geomorfológico. Esta unidad es la de mayor extensión, cubriendo el 54% de área de estudio y se puede observar a lo largo de la cuenca, modelada en depósitos de lava y ceniza.

- **Montículos y ondulaciones denudacionales (Dmo):** Elevación del terreno con una altura menor de 50 metros sobre su nivel de base local, con una morfología colinada, cóncava o convexa, suavemente inclinada y con drenaje divergente. El origen de esta unidad está relacionado a procesos de meteorización y erosión intensa sobre rocas blandas o friables y en sedimentos no consolidados, dispuestos de manera horizontal a ligeramente inclinados. En la zona de estudio cubre 16% y está modelado en depósitos volcánicos.
- **Sierra denudada (Dsd):** Son prominencias topográficas de morfología montañosa y elongada con laderas largas a extremadamente largas, cóncavas a convexas, con pendientes muy inclinadas a abruptas, donde prevalecen procesos de erosión y de movimientos en masa. Su origen es relacionado a procesos de erosión acentuada en sustratos rocosos ígneos y metamórficos, principalmente corresponde a material productos de la actividad volcánica.

4.1.5.2 Ambiente Volcánico.

Incluye las geoformas que se originan por procesos relacionados con la actividad volcánica, producto de la dinámica interna de la tierra; asociados principalmente a erupciones explosivas y/o efusivas, acumulación de productos y remoción de estos, así como a la intrusión sub-magmática en los niveles superiores de la corteza.

- **Manto de piroclastos (Vmp):** Son planos amplios de pendientes inclinadas, localmente aterrizados, de morfología suavemente ondulada debida al suavizado del relieve preexistente por la cobertura de material piroclástico. Su génesis se asocia al depósito de piroclastos de caída o al emplazamiento de corrientes de densidad piroclástica en zonas amplias y no encañonadas. Parte de este material piroclastos se encuentra en alto grado de meteorización dejando suelos arcillosos caoliníticos de espesores considerables. Aunque la

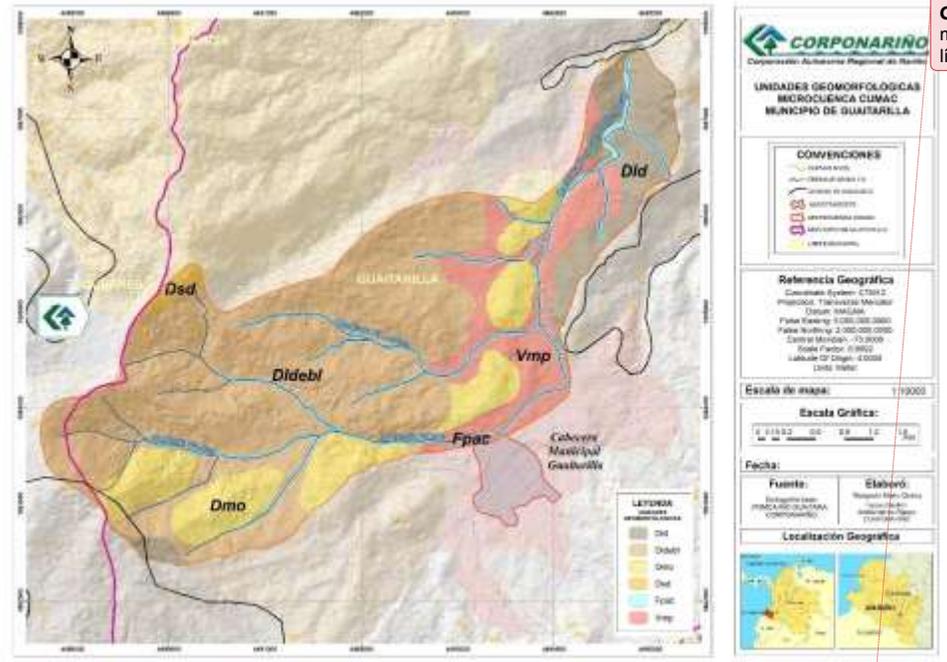
geoforma presenta un alto grado de meteorización, sus depósitos han suavizado la paleotopografía dejando morfologías colinadas que disminuye la pendiente y la susceptibilidad a presentar movimientos en masa.

4.1.5.3 Ambiente fluvial.

Se trata de las geoformas que se originan por procesos de erosión de las corrientes de los ríos y por la acumulación o sedimentación de materiales en las áreas aledañas a dichas corrientes, sin importar las variaciones que tiene el comportamiento de la dinámica fluvial. De esta manera, es posible encontrar unidades aledañas a ríos, quebradas y en el fondo de los cauces, cuyos depósitos son transportados y acumulados apenas pierde su capacidad de arrastre.

- **Planicie aluvial confinada (Fpac):** Corresponde a franja de terreno de morfología plana, no muy extensa longitudinalmente, angosta y eventualmente inundable, en forma de “U”, limitada por otras geoformas de morfología colinada a montañosa, que bordean los cauces fluviales, en los cuales se observa el estrangulamiento o estrechamiento de este. Esta subunidad cubre un 6% del área de estudio sobre los flancos de las quebradas principales y de algunos afluentes, sobre material aluvial producto del transporte de sedimentos de estas fuentes hídricas.

Comentado [38]: Describir el ambiente contextualizado para el caso de la microcuenca



Comentado [39]: Ajustar los límites municipales del mapa. Revisar el mapa y ajustar lo necesario, hay unas líneas que creo que representan contacto geológico

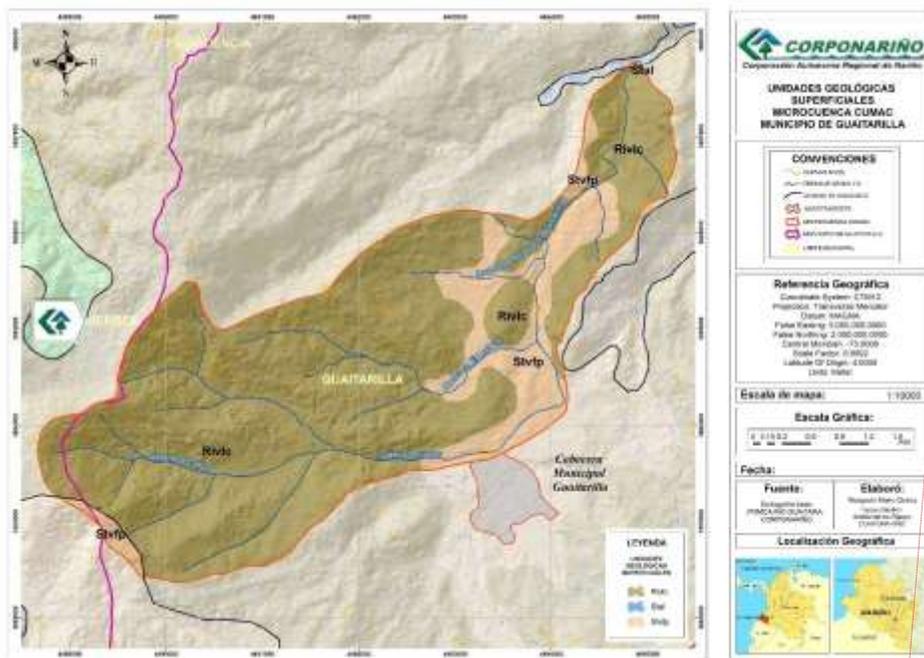
Figura 16. Mapa de unidades geomorfológicas.

4.1.6 Unidades Geológicas Superficiales.

- **Roca intermedia de los Depósitos de lavas y cenizas (Rivlc):** Corresponde a rocas intermedias de origen ígneo volcánico, de tonalidades marrones, cremas y naranjas, clasificada como lavas riolíticas, andesíticas y basálticas. La roca se presenta medianamente fuerte a débil, altamente meteorizada, GSI de 45. En taludes rocosos, de acuerdo con levantamiento geomecánico las persistencias en las lavas macizas varían entre 30 centímetros a 25 metros, con espaciamentos de 50 centímetros a 3 metros, las discontinuidades tienen superficies lisas y aperturas entre 1 y 3 centímetros, siendo taludes parcialmente inestables. Estas características apuntan a que el tipo de suelo presente en esta UGS es arcillo-arenoso

Comentado [40]: Falta la descripción de la unidad Stal. Revisar en el mapa la unidad Rivlc, parecería como si la mayoría de la geología superficial de la microcuenca fueran rocas y la mayoría son suelos residuales; que en su mayoría son formados en depósitos piroclásticos. Considerar definir otra unidad que corresponda a suelo residual.

- Suelo transportado volcánico de flujos piroclásticos (Stvfp):** Suelo transportado volcánico de flujos piroclásticos de tonalidades cafés y grises de material areno-limoso proveniente de lapilli y cenizas de tipo ash fall y toba de ceniza. los ensayos con penetrómetro dieron valores en capas menos consolidadas de (1.5 kg/c m2 -2 kg/c m2) y la prueba con esclerómetro <10 y en capas más consolidadas los ensayos con esclerómetro dieron indican valores entre 30 y 35), con el penetrómetro en material piroclástico valores entre 3.0 kg/cm2 - 3.5 kg/cm2).



Comentado [41]: Revisar y ajustar el mapa para que quede uniforme con los anteriores, sin embargo, primero se debe definir las unidades en el texto. No se encuentra la unidad Stal, unificar con el "bufere" del mapa de geomorfología

Figura 17. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales.

5 ANÁLISIS DE DATOS E INFORMACIÓN SECUNDARIA – MODELO HIDROLÓGICO.

5.1 Análisis de Precipitación

La microcuenca objeto de estudio hace parte de la cuenca del río Guáitara y se encuentra ubicada en el municipio de Guaitarilla, Departamento de Nariño. Se sitúa aproximadamente a 64 kilómetros de San Juan de Pasto, la capital del departamento. Así mismo, se constituye por estribaciones montañosas del nudo de los pastos, donde abundan los cultivos y pastizales.

El municipio de Guaitarilla no cuenta con una estación meteorológica o pluviométrica, sin embargo, existen dos estaciones cercanas, una en el municipio de Imues y otra en el unicipio de Túquerres, las dos de tipo pluviométricas. En la Tabla 10, se presenta la información de las estaciones más cercana al área de estudio.

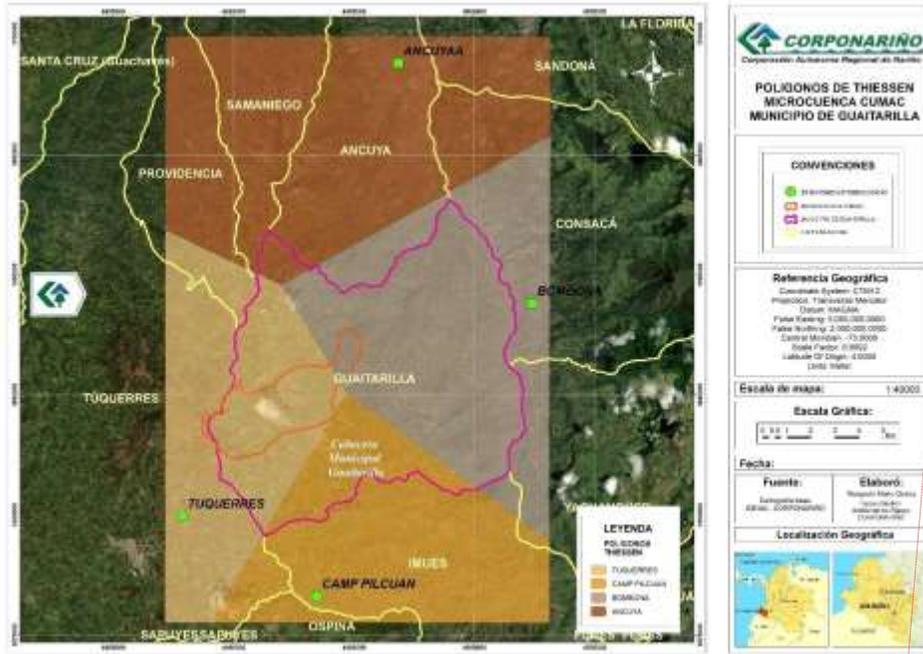
Tabla 10. Estaciones cercanas a la zona de estudio.

| ESTACION | CATEGORIA | MUNICIPIO | LONGITUD | LATITUD |
|----------------------------|------------------------|-----------|----------|---------|
| Túquerres [52050070] | Pluviométrica | Túquerres | -77.60 | 1.1 |
| Camp Pilcuan [52050160] | Pluviométrica | Imues | -77,55 | 1,07 |
| Bomboná [52055030] | Climática Ordinaria | Consacá | -77,47 | 1,18 |
| Ancuya [5205702] | Limnimetrica | Consacá | -77,52 | 1,27 |

No obstante, se analiza el área de influencia de las demás estaciones cercanas a través de la elaboración de polígonos de Thiessen, los cuales se crean al unir los puntos de ubicación de las estaciones entres si, y trazando las mediatrices de los segmentos de unión **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** Las intersecciones de estas mediatrices determinan una serie de polígonos en un espacio bidimensional alrededor de un conjunto de puntos de control, de manera que el perímetro de los polígonos generados sea equidistante a los puntos vecinos

Comentado [42]: Revisar

y designando su área de influencia. Este procedimiento se realizó a través de la herramienta Polígonos de Thiessen del Programa ArcGis 10.2.



Comentado [43]: Ajustar delimitación del mpio y revisar nombres de las estaciones y ajustar, que todos hagan contraste

Figura 18. Polígonos de Thiessen para las estaciones.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se puede identificar que la mayor parte de la zona de estudio está comprendida dentro del área de influencia de la estación Túquerres, por lo cual, se tomará como estación base los datos de precipitación suministrados por esta. No obstante, esta estación posee carencia de datos en algunos años y no está actualmente activa, por ejemplo, en el año 1961 y 1969 como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, existen vacíos de datos que comprenden un año completo en los dos casos; debido a esto se considerara la serie desde 1970 hasta 1987. Los datos disponibles de la serie de precipitación máxima diaria se muestran en la Tabla 11.

Comentado [44]: revisar

Comentado [45]: revisar

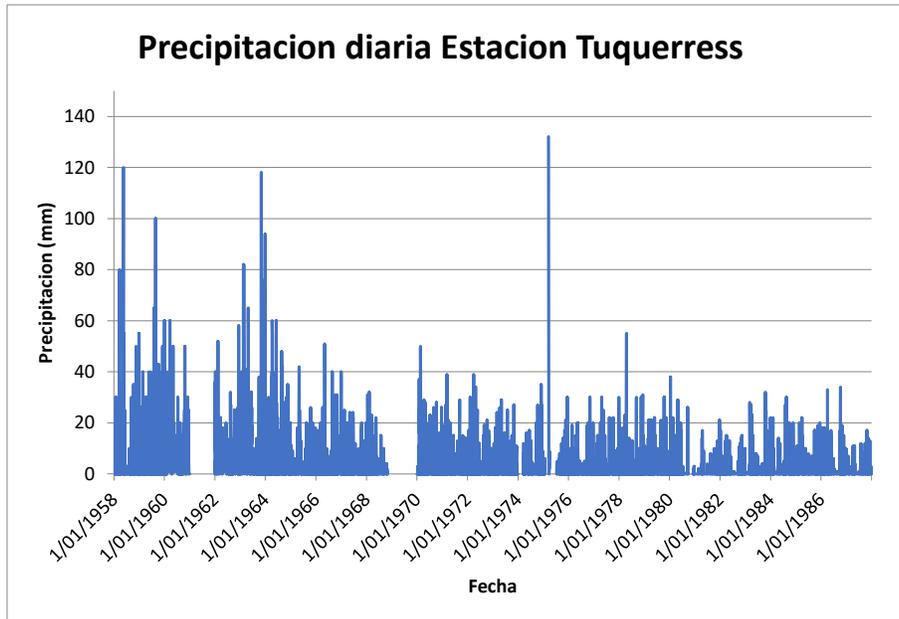


Figura 19. Datos de precipitación Estación Túquerres.

Tabla 11. Datos Estación Túquerres.

| ESTACIÓN | RANGO DE SERIE DE PRECIPITACIÓN MÁXIMA DIARIA | No. DE DÍAS FALTANTES |
|-----------|---|-----------------------|
| TUQUERRES | 1/01/1958-31/12/1987 | 1098 |

Al considerar la serie de precipitación desde 1970 se cuenta con 17 años de registros de precipitación, sin embargo, para la elaboración de un modelo hidrológico es necesario contar con datos de al menos 30 años, por lo cual se ha planteado la adición de datos de una estación cercana, teniendo presente que esta metodología solo es válida cuando las estaciones son muy cercanas y registran casi el mismo fenómeno que en este caso es la lluvia.

Para ello la estación El Paraíso situada a 6 kilómetros de distancia, posee datos desde el año 1986 y permanece activa, por lo tanto, se insertarán a la serie final de precipitación diaria desde 1987 en adelante.

Por último, los datos de precipitación máxima diaria anual tomados de la serie final de precipitación diaria se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12. Precipitación máxima anual.

| Serie Max diarios anuales | |
|----------------------------------|---------------------------|
| AÑO | P Max diaria anual |
| 1970 | 50 |
| 1971 | 39 |
| 1972 | 39 |
| 1973 | 29 |
| 1974 | 35 |
| 1975 | 132 |
| 1976 | 30 |
| 1977 | 30 |
| 1978 | 55 |
| 1979 | 30 |
| 1980 | 38 |
| 1981 | 21 |
| 1982 | 17 |
| 1983 | 32 |
| 1984 | 30 |
| 1985 | 22 |
| 1986 | 34 |
| 1987 | 17 |
| 1988 | 35 |
| 1989 | 33 |
| 1990 | 22 |
| 1991 | 31 |
| 1992 | 15 |
| 1993 | 23 |
| 1994 | 28 |
| 1995 | 25 |
| 1996 | 25 |
| 1997 | 43 |
| 1998 | 26 |
| 1999 | 29 |
| 2000 | 27 |
| 2001 | 18 |
| 2002 | 21 |
| 2003 | 21 |

| | |
|------|----|
| 2004 | 37 |
| 2005 | 25 |
| 2006 | 35 |
| 2007 | 30 |
| 2008 | 38 |
| 2009 | 28 |
| 2010 | 44 |
| 2011 | 23 |
| 2012 | 22 |
| 2013 | 24 |
| 2014 | 23 |
| 2015 | 25 |
| 2016 | 40 |
| 2017 | 40 |
| 2018 | 26 |
| 2019 | 40 |

5.1.1 Análisis de las precipitaciones máximas en la Estación Base.

Es necesario elaborar un análisis estadístico de las precipitaciones máximas para relacionar esos eventos extremos con su frecuencia de ocurrencia, por lo cual se ha planteado los cálculos de cuatro funciones de distribuciones para calcular la precipitación máxima asociada a un periodo de retorno.

Las cinco funciones para analizar son las siguientes:

- Gumbel: Basado en el método de los momentos.
- GEV (General Extreme Value).
- SQRT: por el método de máxima verosimilitud.
- TCEV (Two Component Extreme Value)

Para calcular los valores por estas funciones se usó el programa AFINS 2.0, desarrollado por el Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente (IIAMA) de la Universidad Politécnica de Valencia. Este es un programa para el análisis de la frecuencia de extremos hidrológicos (caudal o lluvia), en un punto y utilizando información sistemática y/o no sistemática. Se entiende por información Sistemática aquella que es observada de forma sistemática una estación de aforos o

pluviómetro. Por otra parte, se entiende por información no Sistemática aquella que no se ha obtenido en una estación de medición, por análisis de eventos históricos o mediante técnicas de paleohidrología. La información no Sistemática sólo es posible con caudales, y suele asociarse a un límite de percepción, por lo que desde el punto de vista estadístico es una información censurada (IIAMA, 2019).

El método de estimación del programa AFINS, es el de Máxima Verosimilitud, así mismo el programa ofrece la posibilidad de estimar inicialmente los parámetros por el método de los Momentos.

5.1.1.1 Función Gumbel:

Para la estimación de los parámetros de la función Gumbel se utiliza el Método de los Momentos, igualando los parámetros muestrales (media, varianza y coeficiente de asimetría) a las expresiones de estos estadísticos, en función de los parámetros de la distribución.

Gumbel es la particularización de la función "General Extreme Value" cuando uno de sus parámetros toma el valor cero. De esta forma, la ley de probabilidad queda definida por la siguiente función de distribución, siendo x el valor de la precipitación diaria máxima anual (IIAMA, 2019).

$$F_x(x) = e^{-\lambda e^{-\theta x}}$$

Donde λ Y θ son los parámetros de la función de distribución. De este modo, los valores encontrados por el programa son los siguientes y se pueden apreciar en la

:

$$\lambda = 6.494$$

$$\theta = 0.076$$

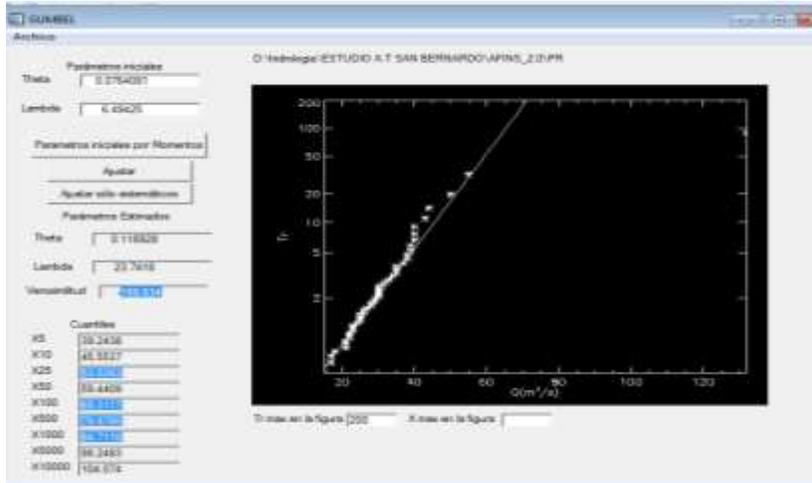


Figura 20. Resultados función de distribución Gumbel.

5.1.1.2 Función SQRT- et MÁX:

Esta distribución propuesta por Etoh, T. et al en 1986, está derivada explícitamente para precipitaciones máximas diarias. En la función SQRT-ET máx, los cuantiles estimados son similares a los de la distribución Gumbel para períodos de retorno bajos y medios

La función que describe esta probabilidad es:

$$F(x) = \exp \exp [-k (1 + \alpha x) \times \exp \exp (-\alpha x)]$$

Dónde: F(x) = probabilidad de que se presente un valor inferior a x
k, α = parámetros de la distribución, que dependen de la media y desviación típica

El valor de los parámetros para esta función fueron los siguientes:

$$k = 220.689 \qquad \alpha = 2.193$$

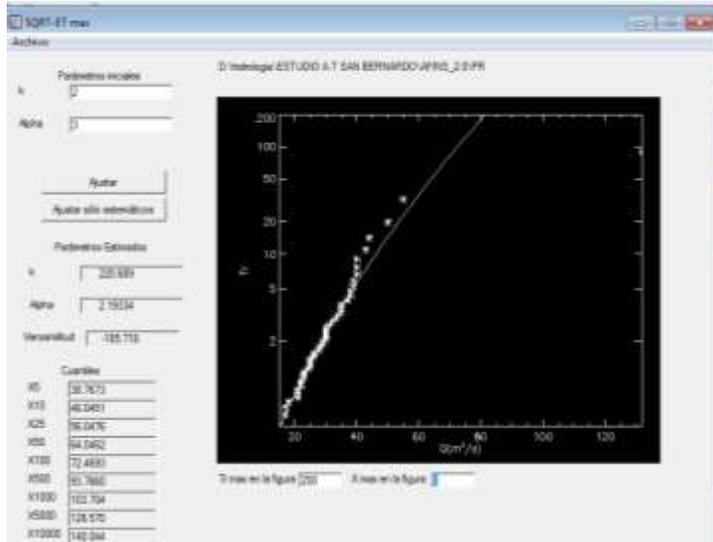


Figura 21. Resultados función de distribución SQRT-ET máx

5.1.1.3 Función GEV:

El modelo para el que se desarrolla la teoría de valores extremos está enfocado a describir el comportamiento estadístico de $M_n = \max\{X_1, \dots, X_n\}$ donde X_1, \dots, X_n es una secuencia de variables aleatorias independientes con distribución común F y M_n representan el máximo del proceso sobre n unidades de tiempos de observación (IIAMA, 2019). Esta función tiene el siguiente estadístico:

$$F_{(x)} = \exp \left[- \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta}} \right]$$

$$f_{(x)} = F_{(x)} \left[\frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{\beta}{\alpha} (x - x_0) \right)^{\frac{1}{\beta} - 1} \right]$$

Donde α es el parámetro de escala, β es el parámetro de forma y x_0 es el parámetro de localización. De este modo, el programa nos muestra los siguientes resultados para los parámetros y cuantiles correspondientes:

$$\beta = -0.181$$

$$\alpha = 11.56$$

$$X_0 = 64.02$$

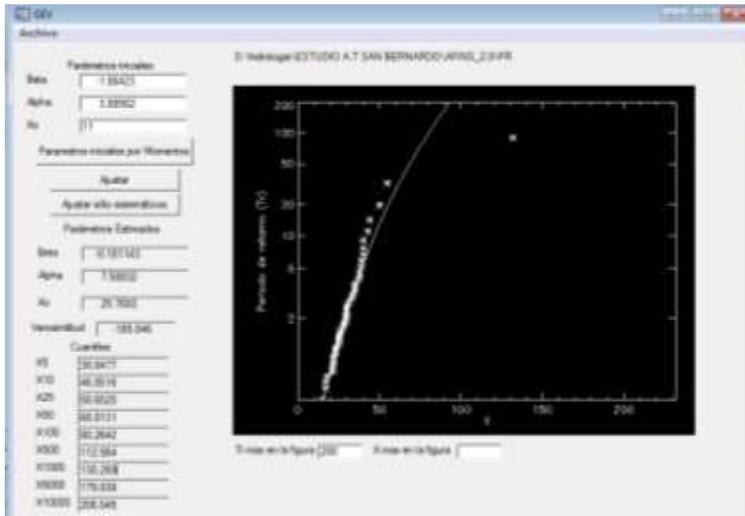


Figura 22. Resultados función de distribución GEV.

5.1.1.4 Función TCEV:

Esta función asume que las poblaciones de las avenidas máximas anuales ordinarias (X_1) y extraordinarias (X_2) derivan de poblaciones Gumbel independientes. Por tanto, la avenida máxima anual será la máxima de estas dos, siendo su función de distribución el producto de las funciones de distribución originales (IIAMA, 2019).

$$F_{x(x)} = \exp \exp \left(-\lambda_1 e^{-\theta_1 x} - \lambda_2 e^{-\theta_2 x} \right)$$

donde λ_1 y θ_1 son los parámetros de forma y escala co-rrespondientes a las avenidas ordinarias, y λ_2 y θ_2 los de las avenidas extraordinaria. De este modo se encontraron los siguientes resultados:

$$\theta_1 = 0.133$$

$$\theta_2 = 0.014$$

$$\lambda_1 = 30.333$$

$$\lambda_2 = 0.041$$

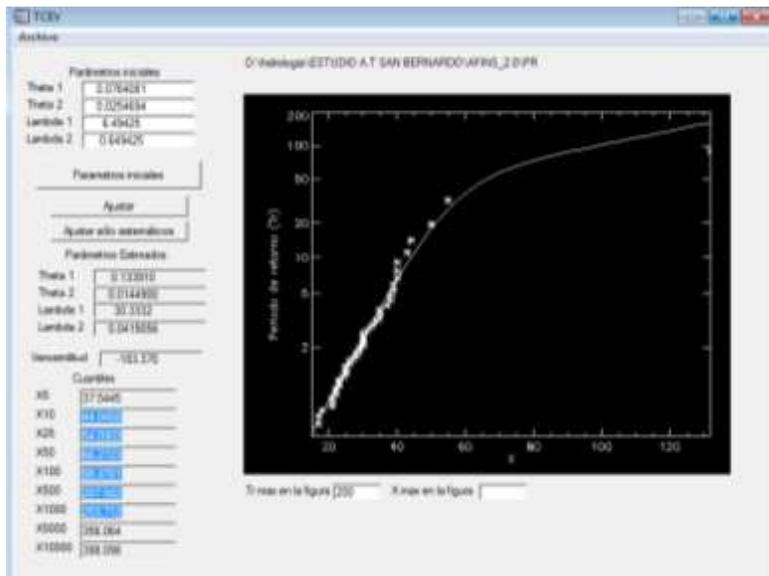


Figura 23. Resultados función de distribución TCEV

Obtenidos los cuantiles para cada función de distribución, es importante observar el comportamiento de la probabilidad de nuestra serie de datos en relación a nuestras

funciones calculadas y analizar cuál de ellas es la que mejor se ajusta a los datos de precipitación correspondientes.

Al analizar los datos obtenidos por el programa, se nota claramente que todas las funciones hasta periodos de retorno 25 años presentan valores similares, sin embargo, a partir de T50 funciones como GEV y TCEV presentan los valores más altos.

Como se mencionó al principio de este apartado, el programa AFINS 2.0 usa el método de Verosimilitud, la cual es una prueba de hipótesis que compara la bondad de ajuste de dos modelos, un modelo no restringido con todos los parámetros libres y su modelo correspondiente restringido por la hipótesis nula a menos parámetros, para determinar cuál ofrece un mejor ajuste para los datos de muestra. De esta manera, para la escogencia de la función de distribución con mayor ajuste, se consideró el valor de la verosimilitud brindada por el programa. En conclusión, se ha considerado los valores de la función TCEV como los que más se ajustan al comportamiento de la microcuenca, los cuales presentan los valores de verosimilitud más alta (-183.370).

5.2 Estudio Hidrológico.

Una de las partes más importantes del estudio tiene que ver con el cálculo de los procesos hidrológicos que se llevan en la microcuenca. En este punto es importante determinar los caudales que aportan cada una de las áreas y encontrar el hidrograma respectivo que nos dé idea de cuánta agua de escorrentía puede producirse como respuesta a un evento de precipitación.

Este estudio partirá de la serie de precipitación máxima diaria anual encontrada anteriormente, y con ella se calculará los valores de intensidad correspondientes asociados a un periodo de retorno, concluyendo en las curvas IDF de la microcuenca. Después de obtenida esta información, se procederá a calcular el modelo de producción de escorrentía a través del programa Hec- HMS obteniendo los hidrogramas respectivos. Cabe resaltar que para la elaboración del modelo de

producción se apoyara de trabajo de campo, uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), análisis geomorfológico e información adicional de entidades gubernamentales como es el caso del IDEAM.

5.2.1 Cálculo de la curva IDF para la microcuenca

Como se observó en el apartado del análisis de precipitación, se logró obtener los cuantiles para diferentes periodos de retorno según la función de probabilidad TCEV, sin embargo, será necesario distribuir ese valor de precipitación máximo durante el día. Esto se logra haciendo uso de coeficientes de lluvia que representan la distribución de la lluvia máxima en 24 horas durante el día. Para este cálculo se ha considerado los coeficientes usados para cuencas en Brasil. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se muestra la tabla de distribución:

Tabla 13. Valores de los coeficientes de distribución para cuencas en Brasil.

| Relación | La Suela | Córdoba | Brasil | Denver | U.S. W. Bureau |
|----------------|----------|---------|--------|--------|----------------|
| 5 min/ 30 min | 0,25 | 0,35 | 0,34 | 0,42 | 0,37 |
| 10 min/ 30 min | 0,45 | 0,57 | 0,54 | 0,63 | 0,57 |
| 15 min/ 30 min | 0,62 | 0,72 | 0,7 | 0,75 | 0,72 |
| 20 min/ 30 min | 0,77 | 0,84 | 0,81 | 0,84 | |
| 25 min/ 30 min | 0,89 | 0,93 | 0,91 | 0,92 | |
| 30 min/ 1 h | 0,69 | 0,79 | 0,74 | | 0,79 |
| 45 min/ 1 h | 0,87 | 0,92 | 0,83 | | |
| 1 h / 24 h | 0,54 | 0,60 | 0,42 | | |
| 6 h / 24 h | 0,88 | 0,85 | 0,72 | | |
| 8 h / 24 h | 0,91 | 0,88 | 0,78 | | |
| 10 h / 24 h | 0,93 | 0,90 | 0,82 | | |
| 12 h / 24 h | 0,95 | 0,92 | 0,85 | | |
| 24 h / 1 día | 1,1 | 1,1 | 1,1 | | 1,13 |

Para obtener la distribución de la lluvia en un tiempo determinado, se multiplica el valor de la precipitación asociado a un periodo de retorno por el coeficiente para esa duración. De esta manera los valores de precipitación para cada periodo de retorno distribuido durante el día se recogen en la Tabla 14:

Tabla 14. Valores de precipitación para 24 horas.

| Tiempo de Duración | Precipitación máxima Pd (mm) por tiempos de duración | | | | | |
|--------------------|--|---------|---------|---------|---------|----------|
| | 2 años | 5 años | 10 años | 25 años | 50 años | 100 años |
| 24 hr | 29.6577 | 37.5445 | 44.0458 | 54.0903 | 66.2723 | 98.4781 |
| 12 hr | 25.2090 | 31.9128 | 37.4389 | 45.9768 | 56.3315 | 83.7064 |
| 60 min | 12.4562 | 15.7687 | 18.4992 | 22.7179 | 27.8344 | 41.3608 |
| 30 min | 9.2176 | 11.6688 | 13.6894 | 16.8113 | 20.5974 | 30.6070 |
| 25 min | 8.3880 | 10.6186 | 12.4574 | 15.2983 | 18.7437 | 27.8524 |
| 20 min | 7.4663 | 9.4518 | 11.0884 | 13.6171 | 16.6839 | 24.7917 |
| 15 min | 6.4523 | 8.1682 | 9.5826 | 11.7679 | 14.4182 | 21.4249 |
| 10 min | 4.9775 | 6.3012 | 7.3923 | 9.0781 | 11.1226 | 16.5278 |
| 5 min | 3.1340 | 3.9674 | 4.6544 | 5.7158 | 7.0031 | 10.4064 |

Obtenidos los datos de precipitación ya se puede calcular los valores correspondientes a la intensidad de precipitación para la posterior construcción de las curvas IDF. Para ello, la intensidad será el valor de la precipitación dividido por el tiempo de duración para cada periodo de retorno:

$$I = \frac{P[mm]}{t_{duracion}[h]}$$

Tabla 15. Valores de intensidad para 24 horas.

| Tiempo de duración | | Intensidad de la lluvia (mm /hr) según el Periodo de Retorno | | | | | |
|--------------------|---------|--|--------|---------|---------|---------|----------|
| Hr | min | 2 años | 5 años | 10 años | 25 años | 50 años | 100 años |
| 24 hr | 1440 hr | 1.24 | 1.56 | 1.84 | 2.25 | 2.76 | 4.10 |
| 12 hr | 720 hr | 2.10 | 2.66 | 3.12 | 3.83 | 4.69 | 6.98 |
| 1 hr | 60 min | 12.46 | 15.77 | 18.50 | 22.72 | 27.83 | 41.36 |
| 0.5 hr | 30 min | 18.44 | 23.34 | 27.38 | 33.62 | 41.19 | 61.21 |
| 0.42 hr | 25 min | 20.13 | 25.48 | 29.90 | 36.72 | 44.98 | 66.85 |
| 0.33 hr | 20 min | 22.40 | 28.36 | 33.27 | 40.85 | 50.05 | 74.37 |
| 0.25 hr | 15 min | 25.81 | 32.67 | 38.33 | 47.07 | 57.67 | 85.70 |
| 0.17 hr | 10 min | 29.87 | 37.81 | 44.35 | 54.47 | 66.74 | 99.17 |
| 0.08 hr | 5 min | 37.61 | 47.61 | 55.85 | 68.59 | 84.04 | 124.88 |

Con los valores de la intensidad que se muestran en la Tabla 15 para los diferentes periodos de retorno se puede graficar las diferentes curvas de Intensidad-Duración-

Frecuencia de la serie de precipitación máxima anual, que se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

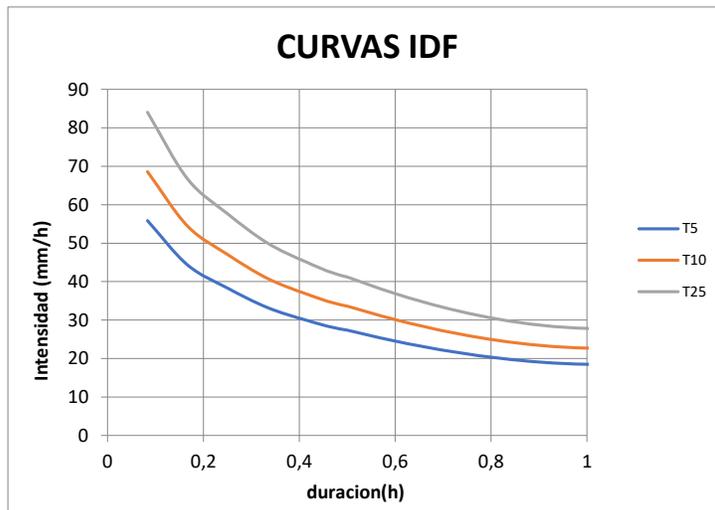


Figura 24. Curvas IDF sin ajuste para la microcuenca Cumac.

5.2.2 Ajuste a curvas sintéticas

Estos valores de intensidad posteriormente deben ser ajustados a una curva IDF sintética, las cuales existen en gran variedad, no obstante, se ha considerado para el cálculo de ajuste la función de Aparicio (1997) la cual esta expresada como se muestra a continuación:

$$I = \frac{KT^m}{t^n}$$

Donde K, m y n son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, T corresponde al periodo de retorno y en tanto que I y t corresponden a la intensidad de precipitación y la duración respectivamente. Estos parámetros se los calculo a partir de la ecuación de regresión múltiple, donde se crea un sistema de ecuaciones que dependen del número de incógnitas a encontrar:

$$\begin{aligned} \sum y &= Na_0 + a_1 \sum x_1 + a_2 \sum x_2 \\ \sum (x_1 y) &= a_0 \sum x_1 + a_1 \sum (x_1^2) + a_2 \sum (x_1 x_2) \\ \sum (x_2 y) &= a_0 \sum x_2 + a_1 \sum (x_1 x_2) + a_2 \sum (x_2^2) \end{aligned}$$

Donde N es el número de datos y las incógnitas son a_0 , a_1 , a_2 , x_1 , x_2 y y son respectivamente los logaritmos del período de retorno, la duración y la intensidad, obtenidos de un registro de precipitación. Una vez calculados los valores de a_0 , a_1 , a_2 es posible evaluar los parámetros k, m, n aplicando el antilogaritmo a estos valores. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta la ecuación y las curvas IDF correspondientes:

$$I_{\left[\frac{mm}{h}\right]} = \frac{86.517 * T^{0.229}}{t^{0.441}}$$

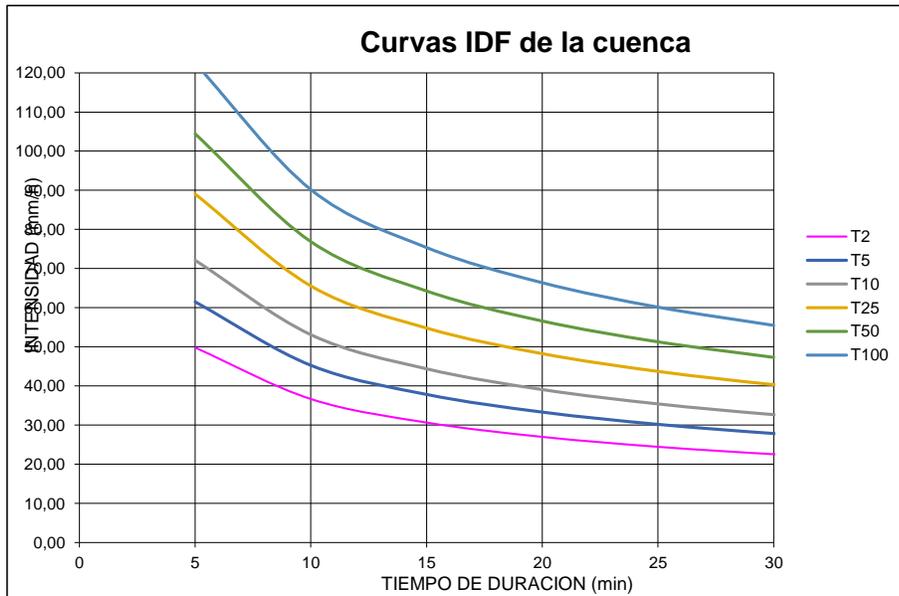


Figura 25. Curvas IDF para la microcuenca CUMAC.

5.2.3 Tiempo de concentración.

El tiempo de concentración se define como el tiempo que tarda una gota de agua caída en el punto más alejado de la cuenca hasta el sitio de desagüe. El tiempo de concentración también es importante para el estudio hidrológico porque suministra una idea del tiempo de duración que deberá tener la lluvia de diseño que se usará para el modelamiento (VELEZ UPEGUI & BOTERO GUTIERREZ, 2010).

Para calcular el tiempo de concentración, existen varias ecuaciones y son aplicables de acuerdo con las condiciones morfométricas de la cuenca y tipologías de la misma, siendo la metodología de Kirpich la que más se ajusta a la realidad de la microcuenca, debido a que esta es de tipo rural dedicada al cultivo y ganadería.

- **Método de Kirpich:** Utilizable en cuencas de tamaño medio, pendiente considerable y diseñada para suelos dedicados al cultivo. La fórmula viene dada por:

$$T_c = 0.06(L^{0.77}S^{-0.385})$$

Dónde:

L : longitud del cauce más largo

S : pendiente media del lecho

t_c : Tiempo de concentración en horas

La cuenca de estudio posee una longitud de cauce $L= 9.0$ km y una pendiente media del lecho del 17%. Con esta información, el tiempo de concentración será:

Así mismo, para los cálculos de hietogramas se aproximó este valor de 23 a 30 min

5.3 Modelo de producción de escorrentía: modelo SCS

Es un modelo empírico desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos de Estados Unidos que determina un umbral de escorrentía (P_o) a través de un número hidrológico o número de curva (CN) agregado de la cuenca. El Número de Curva toma un valor de 0 a 100 según sea su capacidad de generar escorrentía superficial. Valores cercanos a 0 representan condiciones de permeabilidad muy alta, mientras que valores cercanos a 100 representan condiciones de impermeabilidad.

El modelo SCS contempla dos hipótesis conceptuales:

1. La existencia de un umbral por debajo del cual la precipitación no produce escorrentía.

$$E(t) = 0 \text{ si } P(t) \leq S_o$$

Dónde:

$E(t)$ es la escorrentía en un tiempo t

$P(t)$ es la precipitación en un tiempo t

S_o es el umbral de abstracción inicial

2. Rebasado el umbral los valores de Filtración y Escorrentía se igualan:

$$\frac{F(t)}{S} = \frac{E(t)}{P(t) - S_o} \text{ si } P(t) > S_o$$

Por continuidad:

$$P(t) = S_o + F$$

$$E(t) = \frac{(P(t) - S_o)^2}{P(t) - S_o + S} \text{ si } P(t) > S_o$$

Siendo S la abstracción potencial del sistema **Fuente especificada no válida..**

En cuanto al número de curva (CN), es una variable que depende principalmente de las características lito-edafológicas, características de la cubierta del suelo que se calculan mediante tablas, pendiente del terreno y humedad antecedente. Cabe resaltar que el método fue desarrollado a partir de registros de lluvia y escorrentía en 24 horas, por lo que no considera explícitamente la variación temporal de la escorrentía.

5.3.1 Umbral de escorrentía

El umbral de escorrentía es la precipitación acumulada a partir de la cual, una vez empapado el terreno, el agua empieza a circular por la superficie. Este valor depende del estado inicial del suelo de la cuenca, puesto que un suelo seco absorbe más que uno saturado (UPV, 2015).

Atendiendo a algunas recomendaciones, el SCS ha definido el estado previo de humedad del suelo en tres rangos:

- Suelo tipo I(Seco)
- Suelo tipo II(Medio)
- Suelo tipo III(Húmedo)

La tabla de tipología de usos de suelo proporciona el valor de umbral de escorrentía (P_o), suponiendo un grado de humedad de suelo medio (previo a la precipitación). Si los días anteriores a la precipitación estudiada se produjeron precipitaciones abundantes, las abstracciones (retenciones superficiales, infiltración) serán menores, por lo que el valor real de P_o será menor al proporcionado en la tabla. En sentido contrario, si los días anteriores no ha llovido nada, el suelo estará seco, y todas las abstracciones serán mayores: hay que corregir el valor aumentándolo (Sánchez, 2017).

El estado de humedad se encuentra determinado por la lluvia total en el periodo de 5 días anterior a la tormenta. El S.C.S. usa tres intervalos de condición de humedad antecedente (CHA) denominados: seco, medio o húmedo I, II y III respectivamente (Villon Bejar, 2002).

CHA – I, es el límite inferior de humedad o el límite superior infiltración. Hay un mínimo potencial de escurrimiento. Los suelos de la cuenca están lo suficientemente secos para permitir el arado o cultivos.

CHA – II, es el grado medio de humedad del suelo, calculado a partir de los datos de potencial de escurrimiento proporcionados en la tabla de tipología de usos de suelo.

CHA – III, es el límite superior de humedad o el límite inferior de infiltración. Hay máximo potencial de escurrimiento. La cuenca está prácticamente saturada por lluvias anteriores

Teniendo en cuenta la precipitación antecedente, se calibra el valor de CN considerando los criterios que se indican en la Tabla 16:

Tabla 16. Condiciones de humedad según el S.C.S.

| <i>Precipitación total en mm en los 5 días anteriores</i> | | |
|---|----------------------|-------------------------|
| CONDICIÓN | ESTACIÓN DE LATENCIA | ESTACIÓN DE CRECIMIENTO |
| I SECO | $P \leq 13$ | $P \leq 36$ |
| II MEDIO | $13 \leq P \leq 28$ | $36 \leq P \leq 53$ |
| III HÚMEDO | $P \geq 28$ | $P \geq 53$ |

Está comprobado que los resultados de caudales son muy sensibles al estado de humedad considerado. Muchos autores calculan para condiciones medias de humedad inicial del complejo suelo-vegetación, no obstante, estos valores pueden modificarse en función de dicha variable.

La relación entre el umbral de escurrimiento (P_o) y el Número de Curva (CN) es:

$$CN(II) = \frac{5080}{50.8 + P_o}$$

Las equivalencias de CN entre las distintas condiciones de humedad son:

$$CN(I) = \frac{4.2 * CN(II)}{10 - 0.058 * CN(II)}$$

$$CN(III) = \frac{23 * CN(II)}{10 - 0.13 * CN(II)}$$

Para el presente proyecto se asume como más adecuados para la zona los valores de umbral de escorrentía correspondientes a unas condiciones de humedad tipo II (medias), sin embargo, se calculan y comparan los valores para las tres condiciones de humedad definidas por el SCS.

5.3.2 Clasificación hidrológica del suelo.

Un grupo hidrológico de suelo (GHS) es un conjunto de suelos que tiene similar comportamiento frente a la generación de escorrentía y se clasifica en una de las siguientes categorías según el NRCS, 2009 **Fuente especificada no válida.**:

- **Grupo A:** son suelos predominantemente arenosos, donde el agua se transmite libremente a través del perfil y por ende tienen un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos.
- **Grupo B:** son suelos con texturas moderadamente finas a moderadamente gruesas que tienen un potencial de escorrentía moderadamente bajo cuando están completamente húmedos.
- **Grupo C:** Son suelos con una capa que limita el movimiento vertical del agua y texturas de moderadamente finas a finas. El potencial de escorrentía es moderadamente alto cuando están húmedos.
- **Grupo D:** son suelos con alto potencial de escorrentía y tasas de infiltración muy bajas. Las texturas son arcillosas, el nivel freático es alto o son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable.

En la Tabla 17 se presenta la información correspondiente a los grupos hidrológicos del suelo, para una mejor interpretación.

Tabla 17. Tipología de suelos hidrológicos según el S.C.S

| GRUPO | INFILTRACIÓN | POTENCIA | TEXTURA | DRENAJE |
|----------|--------------|---|---|-------------------|
| A | Rápida | Grande | Arenosa Areno-limosa | Perfecto |
| B | Moderada | Media grande | Franco-Arenosa Franca Franca-Arcillosa Franco-limosa | Bueno a moderado |
| C | Lenta | Media a pequeña | Franco-Arcillosa Franco-Arcillo | Imperfecto |
| D | Muy lenta | Pequeño (litosuelo) u horizontes de arcilla | Limosa Arcillo-arenosa | Pobre o muy pobre |

La clase hidrológica del suelo depende de la textura de estos, por lo tanto, para el presente estudio se tuvo como base la información de Unidades Geológicas Superficiales obtenida del POMCA del Río Guaitara, a escala 1:25.000, las cuales proporcionan información del tipo de UGS presentes en el área de estudio y a su vez indican características físicas del suelo que contiene dichas UGS, juntos con el tipo y uso de suelo que se identificó. De esta manera fue posible conocer las características de la textura del suelo del área de estudio, en donde se distingue suelos arcillo-arenosos y areno-limosos, correspondientes a dos clases hidrológicas de suelos, grupo A y Grupo D respectivamente **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, como se describe a continuación:

- **Grupo de suelo A:** ocupa el 16% del área total de la microcuenca, sus características indican que son suelos que tienen un alto índice de infiltración y por ende un bajo potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos. Son suelos arenosos bien drenados, presentan una tasa elevada

de transmisión de agua; estos se encuentran distribuidos desde la parte media hacia la parte baja de la microcuenca.

- **Grupo de suelo D:** ocupa el 84% del área total de la microcuenca, se caracteriza por tener tasas de infiltración muy bajas y un alto potencial de escorrentía cuando están completamente húmedos, tienen texturas finas, son suelos poco profundos, asentados sobre material impermeable que presentan capas de arcilla; estos se encuentran principalmente en la parte alta y media de la microcuenca.

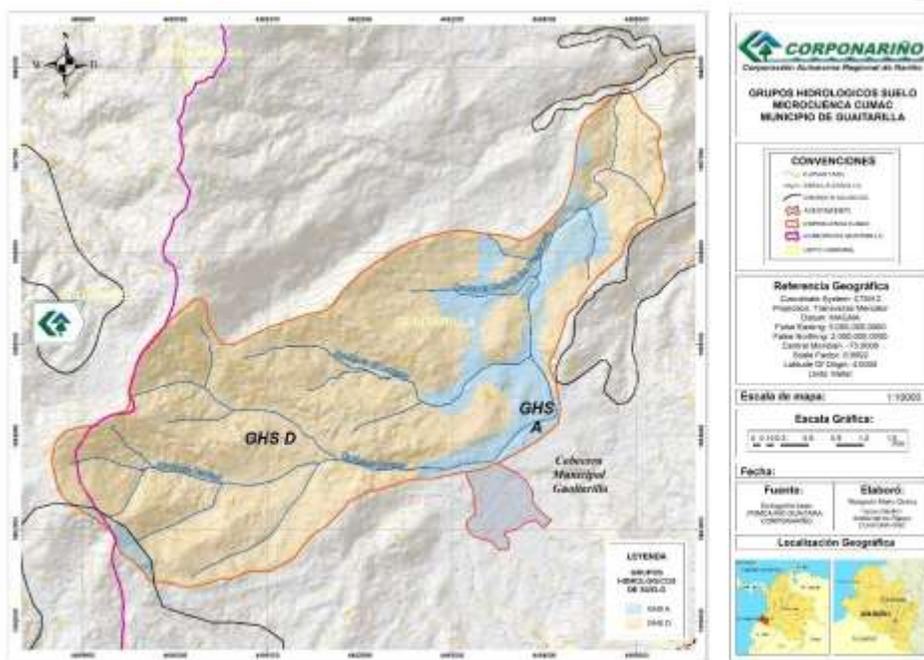


Figura 26. Mapa de grupo hidrológico del suelo.

De esta manera, para cada grupo de suelo, el umbral de escorrentía (P_o) depende de las características hidrológicas del suelo, de la pendiente y del uso al que se destina. Para el cálculo del CN en una cuenca de superficie total A como se verá más adelante, se divide ésta en diferentes subáreas A_i correspondientes a

combinaciones de tipo y usos del suelo distintos y se obtiene un Po_i asociado a cada subárea.

Para condiciones de humedad media, los valores de Po habitualmente utilizados se recogen en la Tabla 18:

Tabla 18. Tipología de usos de suelos según el S.C.S.

| USO DE LA TIERRA | PENDIENTE (%) | CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS | GRUPO DE SUELO | | | |
|--|---------------|------------------------------|----------------|----|----|----|
| | | | A | B | C | D |
| Barbecho | >3 | R | 15 | 8 | 6 | 4 |
| | | N | 17 | 11 | 8 | 6 |
| | <3 | R/N | 20 | 14 | 11 | 8 |
| Cultivos en hilera | >3 | R | 23 | 13 | 8 | 6 |
| | | N | 25 | 16 | 11 | 8 |
| | <3 | R/N | 28 | 19 | 14 | 11 |
| Rotación de cultivos pobres | >3 | R | 26 | 15 | 9 | 6 |
| | | N | 28 | 17 | 11 | 8 |
| | <3 | R/N | 30 | 19 | 13 | 8 |
| Rotación de cultivos densos | >3 | R | 37 | 20 | 12 | 9 |
| | | N | 42 | 23 | 14 | 11 |
| | <3 | R/N | 47 | 25 | 16 | 13 |
| Praderas | >3 | Pobre | 24 | 14 | 8 | 6 |
| | | Media | 53 | 23 | 14 | 9 |
| | | Buena | * | 33 | 18 | 13 |
| | | Muy buena | * | 41 | 22 | 15 |
| | <3 | Pobre | 58 | 25 | 12 | 7 |
| | | Media | * | 35 | 17 | 10 |
| | | Buena | * | * | 22 | 14 |
| Muy buena | * | * | 25 | 16 | | |
| Plantaciones regulares Aprovechamiento forestal | >3 | Pobre | 62 | 26 | 15 | 10 |
| | | Media | * | 34 | 19 | 14 |
| | | Buena | * | 42 | 22 | 15 |
| | <3 | Pobre | | 34 | 19 | 14 |
| | | Media | | 42 | 22 | 15 |
| | | Buena | | 50 | 25 | 16 |
| Masas forestales (bosques, monte bajo, etc) | | Muy clara | 40 | 17 | 8 | 5 |
| | | Clara | 60 | 24 | 14 | 10 |
| | | Media | * | 34 | 22 | 16 |
| | | Espesa | * | 47 | 31 | 23 |
| | | Muy espesa | * | 65 | 43 | 33 |

1. N: denota cultivo según las curvas de nivel.
2. R: denota cultivo según la línea de máxima pendiente.
3. *: denota que esa parte de cuenca debe considerarse inexistente a efectos de cálculo de caudales
4. Las zonas abancladas se incluyen entre las de pendiente menor del 3%.

5.3.3 Cálculo de Po y CN para el Área de Drenaje.

El umbral de escorrentía depende de los siguientes factores:

- Tipo de suelo
- Grado de desarrollo y tipo de cubierta vegetal
- Pendiente del terreno
- Estado de humedad inicial del complejo suelo-vegetación

Obtenidos los mapas de coberturas y suelos se procede a calcular el valor del Número de Curva de la microcuenca, asociando a cada cobertura su respectivo tipo de suelo. De esta manera, por tablas se obtiene el valor del umbral de escorrentía Po para cada masa forestal y se calcula por lo tanto la curva número respectiva. A continuación, se presenta los valores del CN (II) para el área 1:

5.3.3.1 Área 1 de la microcuenca Cumac

Tabla 19. Resultados cálculo del CN para el Área 1.

| Uso de Suelo (SCS) | Área (Ha) | Área (%) | Área por cobertura (%) | Pendiente (%) | Características hidrológicas | Grupo hidrológico de suelo | Umbral de escorrentía (mm) | Umbral de escorrentía ponderado (mm) | CN II |
|----------------------------|-----------|----------|------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------|
| Masas forestales | 4,21 | 0,58 | 31,35 | | Media | A | * | 12,49 | 80,26 |
| Masas forestales | 114,58 | 15,88 | | | Media | D | 16 | | |
| Masas forestales | 11,54 | 1,60 | | | Muy Clara | A | 40 | | |
| Masas forestales | 95,96 | 13,30 | | | Muy Clara | D | 5 | | |
| Praderas | 44,36 | 6,15 | 62,48 | <3 | Pobre | A | 58 | 11,64 | 81,35 |
| Praderas | 10,69 | 1,48 | | >3 | Pobre | A | 24 | | |
| Praderas | 349,79 | 48,47 | | >3 | Pobre | D | 6 | | |
| Praderas | 46,13 | 6,39 | | <3 | Pobre | D | 7 | | |
| Rotacion de cultivos pobre | 0,59 | 0,08 | 4,79 | >3 | R | A | 26 | 8,24 | 86,05 |
| Rotacion de cultivos pobre | 2,73 | 0,38 | | <3 | R/N | A | 30 | | |
| Rotación de cultivos pobre | 31,28 | 4,33 | | >3 | R | D | 6 | | |
| Cultivos en hilera | 0,37 | 0,05 | 0,05 | >3 | R | D | 6 | 6 | 89,44 |
| Área construida | 9,50 | 1,32 | 1,32 | <3 | | D | 2 | 2 | 96,21 |

$$CN(II) = 81,44$$

El CN II ponderado para el área 1 de la microcuenca Cumac tiene un valor de 81,44 indicando un alto potencial de escorrentía, debido a que todos los usos de suelo identificados aquí tienen un bajo umbral de escurrimiento, es decir que no tienen buena capacidad de infiltración, esto se atribuye a las características del grupo hidrológico de suelo que abarca el 90% de esta área, texturas muy finas que favorecen el escurrimiento. Así mismo se ve la influencia de usos de suelo, un 62.5% del área se encuentra con cobertura de praderas con densidades de muy baja densidad o pobres y que en su mayoría se ubican en zonas de pendiente, lo cual disminuye los efectos de abstracción del agua.

De la misma manera se calculó el CN(II) para el área 2 obteniendo los resultados que se observan en la Tabla 20:

Tabla 20. Resultados cálculo del CN para el Área 2.

| Uso de Suelo (SCS) | Área (Ha) | Área (%) | Área por cobertura (%) | Pendiente (%) | Características hidrológicas | Grupo hidrológico de suelo | Umbral de escorrentía (mm) | Umbral de escorrentía ponderado (mm) | CN |
|----------------------------|-----------|----------|------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------|
| Masas forestales | 1,75 | 0,66 | 13,87 | | Muy claras | A | 40 | 6,79 | 88,21 |
| Masas forestales | 32,47 | 12,18 | | | Muy claras | D | 5 | | |
| Masas forestales | 2,76 | 1,04 | | | Medias | D | * | | |
| Praderas | 2,41 | 0,91 | 69,91 | >3 | Pobres | A | 24 | 10,37 | 83,05 |
| Praderas | 14,82 | 5,56 | | <3 | Pobres | A | 58 | | |
| Praderas | 169,09 | 63,44 | | >3 | Pobres | D | 6 | | |
| Rotación de cultivos pobre | 8,91 | 3,34 | 13,95 | >3 | R | A | 26 | 10,84 | 82,41 |
| Rotación de cultivos pobre | 0,07 | 0,03 | | <3 | R/N | A | 30 | | |
| Rotación de cultivos pobre | 28,19 | 10,58 | | >3 | R | D | 6 | | |
| Cultivos en hilera | 2,72 | 1,02 | 2,27 | >3 | R | A | 23 | 13,64 | 78,83 |
| Cultivos en hilera | 3,33 | 1,25 | | >3 | R | D | 6 | | |

$$CN(II) = 83,58$$

En el área 2 de la microcuenca se obtuvo un CN II ponderado de 83,58, siendo éste el mayor valor con relación al área 1 y 3, aquí se evidencia un alto potencial de escorrentía ocasionado por umbrales de escurrimiento muy bajos para todos los usos de suelo identificados en el área 2, donde predominan coberturas de praderas con condicione hidrológica sobre grupo hidrológico de suelo D; las coberturas con masas forestales muestran el menor valor de umbral de escorrentía, demostrando una alta influencia dada por el tipo de suelo con características que limitan la infiltración y por ende resulta un numero de curva mayor en relación con los demás usos de suelo.

Finalmente, en la Tabla 21 se presentan los resultados del área 3 para el cálculo del CN(II):

Tabla 21. Resultados cálculo del CN para el Área 3.

| Uso de Suelo (SCS) | Área (Ha) | Área (%) | Área por cobertura (%) | Pendiente (%) | Características hidrológicas | Grupo hidrológico de suelo | Umbral de escorrentía (mm) | Umbral de escorrentía ponderado (mm) | CN |
|----------------------------|-----------|----------|------------------------|---------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------------------|-------|
| Masas forestales | 23,12 | 5,25 | 16,52 | | Muy claras | A | 40 | 16,11 | 75,92 |
| Masas forestales | 49,68 | 11,27 | | | Muy claras | D | 5 | | |
| Praderas | 30,20 | 6,85 | 58,82 | >3 | Pobres | A | 24 | 13,51 | 79,00 |
| Praderas | 24,80 | 5,63 | | <3 | Pobres | A | 58 | | |
| Praderas | 111,99 | 25,41 | | <3 | Pobres | D | 7 | | |
| Praderas | 92,19 | 20,92 | | >3 | Pobres | D | 6 | | |
| Rotación de cultivos pobre | 10,30 | 2,34 | | >3 | R | A | 26 | | |
| Rotación de cultivos pobre | 21,28 | 4,83 | <3 | R/N | A | 30 | 13,18 | 79,40 | |
| Rotación de cultivos pobre | 55,66 | 12,63 | >3 | R | D | 6 | | | |
| Rotación de cultivos pobre | 17,42 | 3,95 | <3 | R/N | D | 8 | | | |
| Rotación de cultivos pobre | 17,42 | 3,95 | <3 | R/N | D | 8 | | | |
| Cultivos en hilera | 0,10 | 0,02 | 0,92 | <3 | R/N | A | 28 | 11,42 | 81,64 |
| Cultivos en hilera | 3,94 | 0,89 | | <3 | R/N | D | 11 | | |

$$CN(II) = 78,61$$

En el área 3 correspondiente a la parte baja de la microcuenca se obtuvo un valor de CN II ponderado de 78,61, indicando una alta capacidad de generar escorrentía superficial en esta zona de la microcuenca debido a condiciones físicas de permeabilidad alta; aquí predominan las coberturas de rotación de cultivos pobre o con escasa vegetación y las coberturas de praderas pobres bajo las cuales se encuentra suelos de grupo D en mayor proporción, limitando de esta manera la infiltración.

En general los valores de CN II calculado para las tres subdivisiones de la microcuenca Cumac, son altos y se ven fuertemente influenciados por el tipo de cobertura de pasturas naturales con bajas densidad vegetal y por el tipo de suelo con texturas finas que la capacidad de infiltración superficial y ocasionando un alto potencial de escorrentía en toda la microcuenca

Cabe mencionar que el número de curva calculado para las anteriores áreas tuvo en cuenta humedad del suelo media, no obstante, dependiendo de las condiciones de humedad de la zona de estudio, la metodología propuesta por S.C.S plantea realizar ajustes para determinar el CN.

Otro parámetro importante para la modelación es el tiempo de desfase al pico, el cual se puede estimar con la siguiente expresión:

$$T_{lag} = 0.6T_c$$

Siendo T_c el tiempo de concentración. De este modo los tiempos de concentración y de Lag para cada una de las Áreas se presentan en la Tabla 22:

Tabla 22. Valores de los tiempos de concentración (T_c) y desfase al pico (TLag).

| CUENCA | T_c (min) | TLag(min) |
|--------|-------------|-----------|
|--------|-------------|-----------|

| | | |
|---|-------|------|
| 1 | 10.21 | 6.13 |
| 2 | 23.18 | 14 |
| 3 | 18.66 | 11.2 |

5.4 Cálculo de hidrogramas de crecida a partir de Hec-Hms

5.4.1 Modelo de la cuenca.

La geometría del modelo de cuenca se elabora a partir de la disposición relativa entre las subcuencas. A cada área se le asocia un elemento tipo subbasin y se conectan entre sí respetando su posición en la cuenca.

El programa calcula el hidrograma de cada una de las Áreas en su punto de desagüe, sin considerar la propagación por el recorrido de su cauce principal. El desagüe de la cuenca se representa por un elemento tipo confluencia.

De acuerdo con las anteriores consideraciones en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa el modelo de la cuenca.

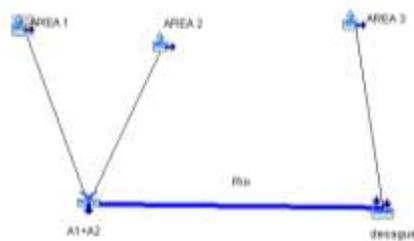


Figura 27. Esquema de las áreas de drenaje en Hec HMS.

5.4.2 Método de Modelación (Modelos de infiltración S.C.S. Curve Number).

El modelo que se utiliza para simular la infiltración en la cuenca es el modelo del número de curva del S.C.S. (S.C.S. Curve Number). La formulación original del S.C.S. fue desarrollada a partir del número de curva (CN) pero en algunos países suele utilizarse dicho método en función de un parámetro diferente, P_o (Umbral de escorrentía). En general, Números de curva $CN = 0$ indican permeabilidad total mientras que $CN = 100$ corresponden al caso totalmente impermeable.

En cuanto a la propagación en cauces, en Hec-HMS se pretende determinar el hidrograma de caudal en un punto de un curso de agua, para lo cual se tiene en cuenta los hidrogramas conocidos en uno o más puntos aguas arriba.

El modelo de mayor aceptación para la propagación de hidrogramas en cauces naturales es el de Muskingum. El método de Muskingum fue presentado por McCarthy (1938) y maneja relaciones caudal-almacenamiento variable.

Este método modela el almacenamiento en un cauce mediante la combinación de dos tipos de almacenamientos:

- Un almacenamiento prismático, formado por un volumen de sección transversal constante a lo largo del cauce prismático.
- Un almacenamiento en cuña, formado por la diferencia entre los caudales de entrada y salida, o bien, por la pendiente de la lámina de agua en el tramo considerado. (Oriol).

5.4.3 Hietogramas de tormenta.

Obtenido el valor del tiempo de concentración, se puede considerar ya la duración de la tormenta para el cálculo de los caudales de la microcuenca. El tiempo de concentración nos marca la duración crítica en la cual toda la microcuenca está aportando escorrentía al desagüe, dando idea sobre el tiempo que puede tardar una crecida en llegar a ese punto y provocar una emergencia. El tiempo de duración

para la lluvia se tomó como 30 minutos como anteriormente, de este modo todos los hietogramas tendrán esta duración.

Obtenidas las curvas IDF, se puede elaborar los hietogramas de precipitación de diseño, los cuales requiere como input Hec-HMS para generar escorrentía en el sistema. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, se presenta como ejemplo el hietograma de precipitación para T50 con tiempo de duración 30 minutos y discretización cada 5 minutos.

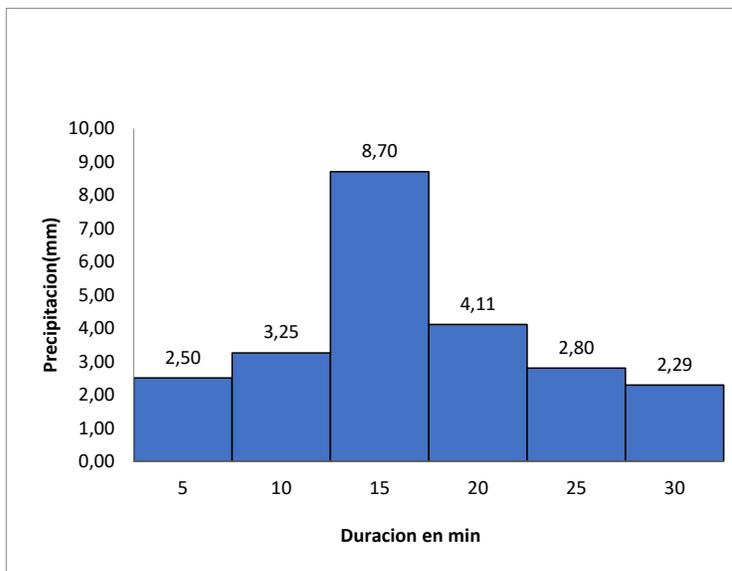


Figura 28. Hietograma de precipitación usando coeficiente de Brasil.

5.4.4 Cálculo de Caudales para diferentes tiempos de retorno.

Ingresados los valores al programa, este cálculo los caudales generados por las áreas 1,2 y 3 que se desean saber cómo insumo para el cálculo hidráulico de la avenida torrencial. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el hidrograma de las Áreas para T50:

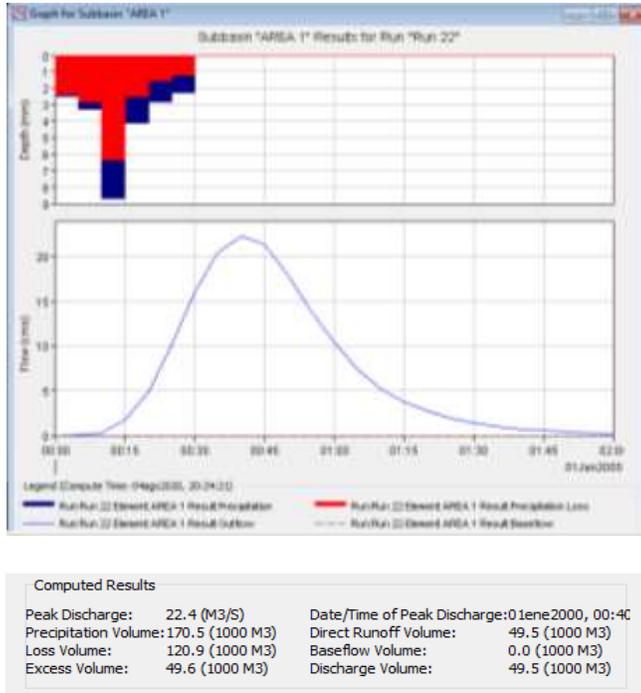


Figura 29. Hidrograma del área 1.

De acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** el caudal pico de descarga del área 1 para un periodo de retorno 50 años es 22.4 m³/s a los 40 min del inicio de la tormenta, generando así un volumen total de 49.500 m³.

En cuanto al área 2 el valor del caudal es más bajo debido a que el área es menor que el área 1. El caudal pico esta sobre los 11.6 m³/s a los 35 min de empezada la tormenta, generando un volumen de 20.200 m³ como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

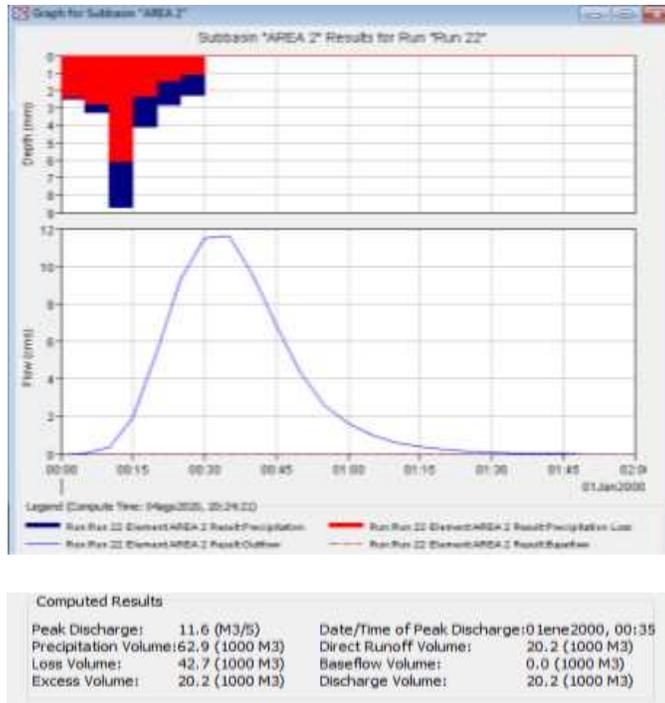


Figura 30. Hidrograma del área 2.

Por último, el área 3, correspondiente al desagüe del área de drenaje, produce un caudal pico de 12.7 m³/s a los 35 minutos y genera un volumen total de 24.100 m³ como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.:**

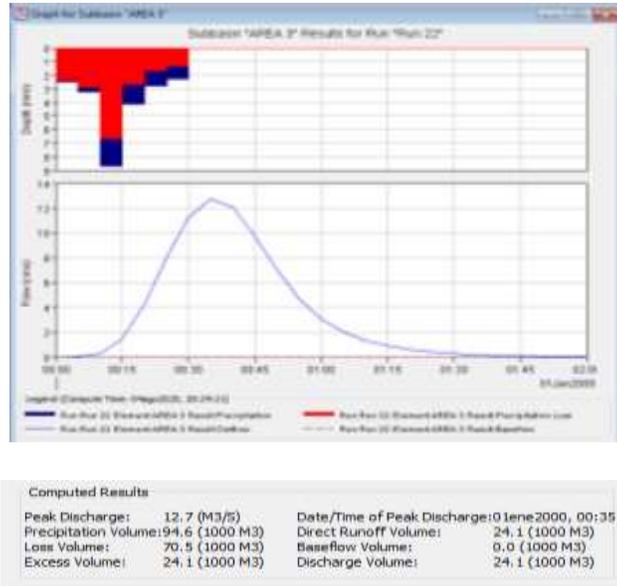
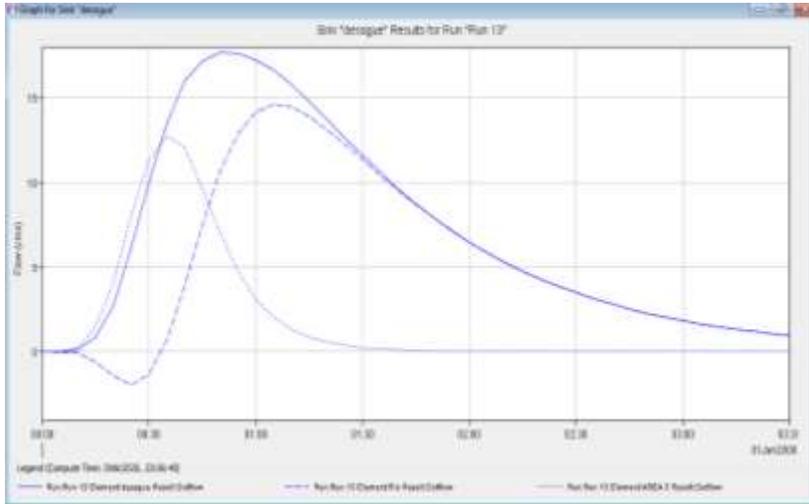


Figura 31. Hidrograma del área 3.

Por último, el hidrograma final en el punto de desagüe recogerá toda el agua de las tres áreas aportantes generando el hidrograma que se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



| Computed Results | |
|-----------------------------|---|
| Peak Discharge: 17.7 (M3/S) | Date/Time of Peak Discharge: 01ene2000, 00:50 |
| Volume: 91.2 (1000 M3) | |

Figura 32. Hidrograma del punto de desagüe.

Analizando la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se observa que el caudal pico tiene un valor de $17.7 \text{ m}^3/\text{s}$ a los 50 min de iniciado el evento de lluvia; además se observa que este último genera escorrentía en la zona de estudio hasta las 2 horas después. Así mismo, el volumen de agua generado en escorrentía superficial es de $91.200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Así mismo, considerando el periodo de retorno más alto dentro de las curvas IDF con las cuales se puede obtener los caudales de mayor magnitud, se obtuvo el hidrograma para un periodo de retorno $T=100$ años del punto de desagüe, el cual se presenta a continuación:

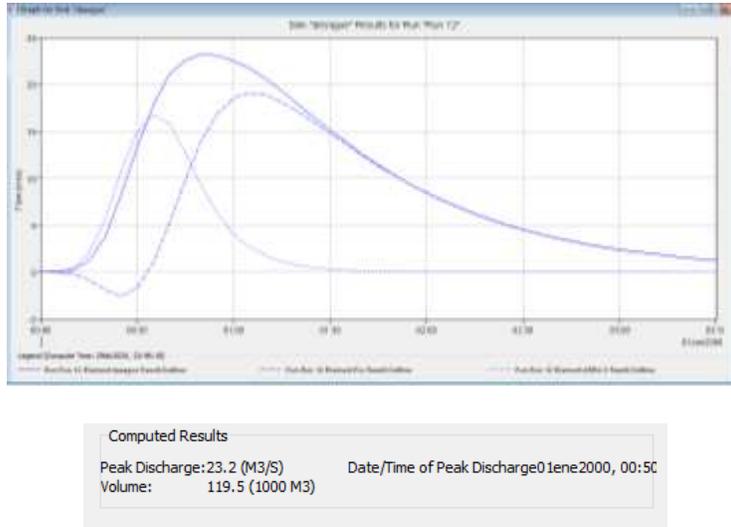


Figura 33. Hidrograma final para T=100 años

Aumentando el periodo de retorno, se observa que el pico está en 23.2 m³/s a los 50 min, generando un volumen de 119 500 m³. Comparando con los valores para T=50 años, es evidente el crecimiento del valor del caudal pico y del volumen generado, no obstante, el valor no es tan significativo en términos de magnitud debido a que los cuantiles de lluvia encontrados y ajustados a la función de distribución TCEV, tienden asintóticamente al valor extremo superior cada vez que el periodo de retorno aumente.

6 TIPO DE FLUJO ÁREA DE ESTUDIO Y SUS CARACTERÍSTICAS

Para llevar a cabo el modelo en Flo-2D es importante identificar el tipo de flujo que se presenta en el área de estudio, para lo cual en primera instancia se analiza los antecedentes de los diferentes eventos torrenciales que se han presentado en la zona de estudio, y de esta manera definir el tipo de flujo torrencial para finalmente hacer una comparación con la clasificación propuesta en el software (FLO 2D, 2017), que permitirá determinar la concentración volumétrica en relación a la concentración de material sólido, lo cual es uno de los factores que determina el

comportamiento del flujo al momento de realizar la simulación del flujo en el modelo Flo-2D.

En este sentido con base en información suministrada por funcionarios de la Alcaldía y comunidad de la zona, se conoció que las zonas mas afectadas de la microcuenca corresponde desde el sector El Empedrado hasta el caserío de la Vereda El Rosal como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**; este tramo de la quebrada Cumac se caracteriza por ser zonas de baja pendiente y morfologías alomadas aterrazadas casi planas cercanas al cauce principal, el cual a su vez tiene un canal estrecho y poco profundo, características que facilitan el desbordamiento de la quebrada cuando aumenta su cauce debido al transporte de flujos torrenciales.

A lo largo de esta zona se observa erosión lateral por acción natural de la Quebrada Cumac, generando inestabilidad en taludes y hasta daños en estructuras, como por ejemplo en la Figura 35 se observa un talud sobre el cual se ubican algunas viviendas, y se pueden identificar algunos procesos de reptación y deslizamientos al pie del talud; morfológicamente corresponde a un depósito aluvial aterrazado, compuesto por clastos de cantos de rocas ígneas de diferentes tamaños, dentro de una matriz areno – limosa de color naranja, cubiertos por una capa de suelos orgánicos color café.



Figura 34. Zona de mayor afectación Sector El Empedrado – El Rosal.



Figura 35. Zonas de erosión lateral.

A lo largo del cauce se observan depósitos conformados por clastos heterolíticos poco seleccionados, con tamaños desde gravas hasta bloques con esfericidad muy angular y poca redondez, que se encuentran en una matriz areno – arcillosa poco compacta que es fácilmente removida por el cauce natural. En la **¡Error! No se**

encuentra el origen de la referencia. se aprecia los vestigios de flujos torrenciales que se han depositado y acumulado en terrazas de diferentes espesores dejando a la vista bloques de grandes tamaños; de igual manera se puede apreciar que el transporte de estos flujos ha causado daños en estructuras como puentes y muros de contención **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** De acuerdo con estas características que han dejado los diferentes flujos torrenciales ocurridos años atrás, se puede determinar que para la zona de estudio se presenta un flujo torrencial de detritos/escombros y lodos (Debris Flow/Mud Flow) (Hunger, Evans, Bovis, & Hutchinson, 2001; Suárez, 2001; Celi & Tanta, 2019), que se transporta a altas velocidades con gran cantidad de material sólido en su mayoría rocas de grandes tamaños (detritos/escombros) y en menor proporción sedimentos finos como arenas y lodos, este flujo tiene una depositación rápida y turbulenta evidenciada por la mala selección de los depósitos ubicados a lo largo del cauce.

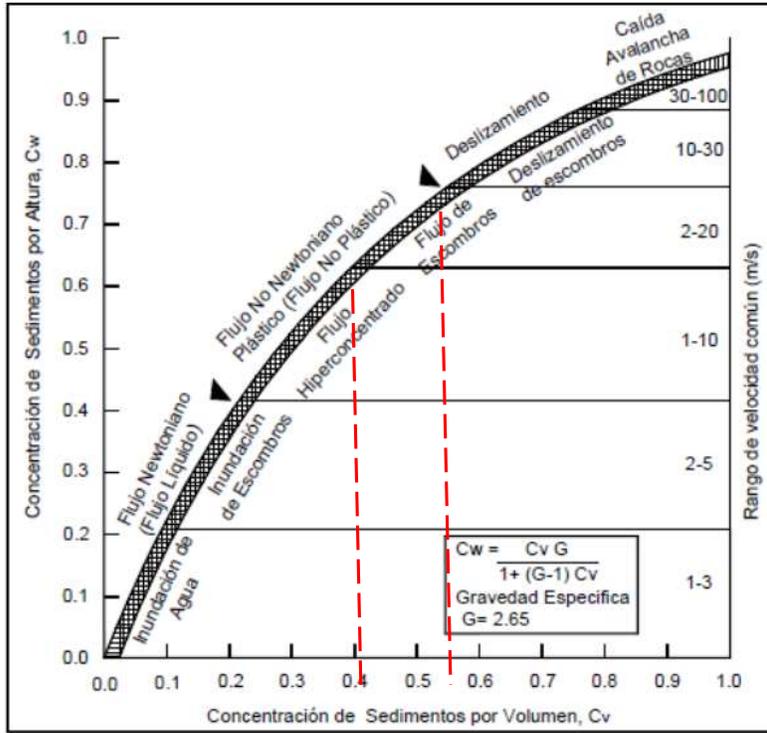


Figura 36. Depósitos de flujos torrenciales.



Figura 37. Depósitos de escombros.

Para realizar el modelo en Flo-2D se debe determinar el tipo de flujo con base en la concentración volumétrica definida por (O'Brien & Julien, 1985), para lo cual se toma la gráfica de estos autores modificada por (Suárez, 2004) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** A, haciendo una comparación con la misma gráfica presentada en el Manual de referencia de (FLO 2D, 2017) **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** B, concluyendo de esta manera que el flujo de escombros corresponde a una zona de transición entre un flujo de lodo a un deslizamiento de acuerdo con la clasificación presentada en (FLO 2D, 2017), determinando de esta manera una concentración volumétrica C_v entre 0.4 y 0.6, que considera un flujo pedregoso con mayor concentración de sólidos en relación a la concentración de agua.



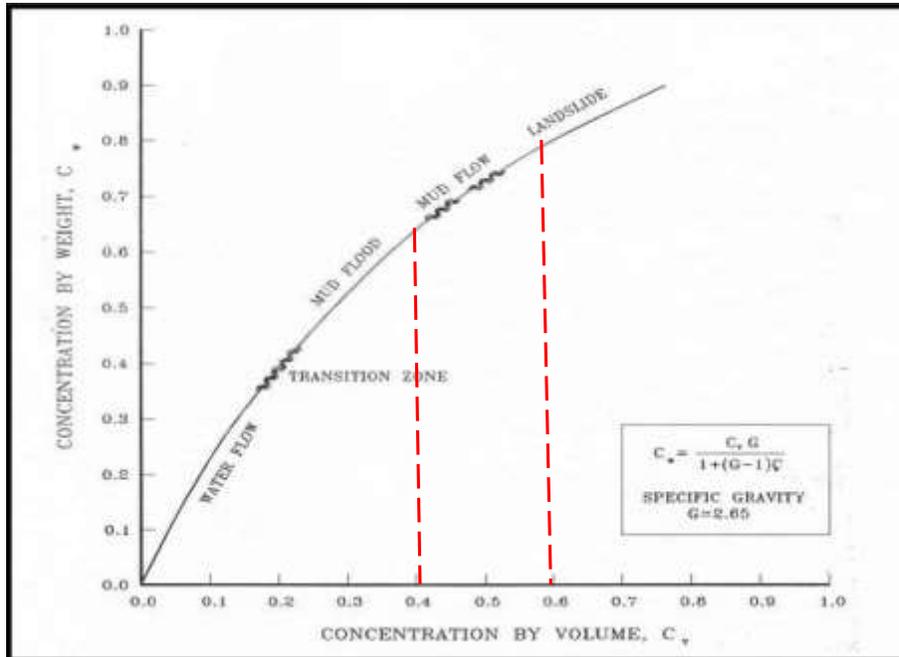


Figura 38. Clasificación de los flujos de acuerdo con la velocidad y concentración de sedimentos según (O' Brian, 2000). **A.** Modificado por (Suárez, 2004). **B.** tomado de (FLO 2D, 2017).

Un flujo de escombros está compuesto por múltiples fases de granos desordenados que cambian desde materiales finos hasta cantos rodados y bloques suspendidos en una matriz lodosa, mezclados con agua y aire entre sí. Por lo general el aporte de material sólido se da por uno o varios deslizamientos, además de material vegetal (troncos y ramas) que se desprende de las laderas, formando una mezcla de comportamiento hidráulico complejo logrando velocidades muy altas, que alcanzan un gran poder destructivo.

Con relación en diferentes cuencas estudiadas donde se han presentado flujos de escombros (Castillo, 2006) describe algunas propiedades características de este tipo de flujo como se muestra en la Tabla 23, donde se destaca la velocidad que depende en cierta medida de la geométrica del cauce, tamaño, pendiente y

sinuosidad observando variaciones de 0.5 m/s a 20 m/s. Así mismo, la pendiente es un factor importante, donde algunos autores definen que los flujos de escombros ocurren en pendientes pronunciadas, y se transporta a lo largo de pendientes muy suaves, donde finalmente la velocidad del flujo disminuye, depositándose primero las partículas de mayor tamaño, en tanto las partículas finas antes de producirse la sedimentación tratan de recorrer una distancia mayor.

Tabla 23. Propiedades de Flujos de escombros (Castillo, 2006).

| Ubicación | Velocidad (m/s) | Pendiente (%) | Densidad (gr/cm ³) | Viscosidad dinámica | %arena/lluvia | Profundidad (m) | Sólidos (% en arena) | Nº Reynolds |
|------------------------------|-----------------|---------------|--------------------------------|---------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-------------|
| Río Reventado, Costa Rica | 2,9 - 10 | 4,6 - 17,4 | 1,13 - 1,98 | - | 1 - 10 | 8 - 12 | 20 - 79 | - |
| Hunshui Gully, China | 10 - 13 | - | 2 - 2,3 | 15 - 20 | 3,6 (<0,005mm) | 3 - 5 | 80 - 85 | 40 000 |
| Bullock Creek, Newzealand | 2,5 - 5,0 | 10,5 | 1,95 - 2,13 | 2100 - 8 100 | 4 | 1,0 | 77 - 84 | 28,57 |
| Pine Creek, Mt. St. Helena | 10 - 31,1 | 7 - 32 | 1,97 - 2,03 | 200 - 3 200 | - | 0,13 - 1,5 | - | 200 |
| Wrightwood Canyon Ca. (1941) | 1,2 - 4,4 | 9 - 31 | 2,4 | 2 100 - 6 000 | <5 | 1,2 | 79 - 85 | 23,8 |
| Wrightwood Canyon Ca. (1969) | 0,6 - 3,8 | 9 - 31 | 1,62 - 2,13 | 100 - 60 000 | - | 1,0 | 59 - 86 | 1,33 |
| Mayflower Gulch, Colorado | 2,5 | 27 | 2,53 | 30 000 | 1,1 (<0,004 mm) | 1,5 | 91 | 3,2 |
| Dragon Creek, Arizona | 7,0 | 5,9 | 2,0 | 27 800 | - | 5,8 | 80 | 29,2 |
| Jian-jia Ravine, China | 8,0 | 0,06 | 2,3 | 15,5 - 1 736 | - | 1,4 | 89 | 148-11 561 |

7 MODELO FLO-2D ÁREA DE ESTUDIO.

7.1 INSUMOS Y CRITERIOS PARA EL MODELO FLO2D SECTOR EL EMPEDRADO Y EL ROSAL.

Para realizar la simulación en Flo-2D, se tomó un tramo de la quebrada Cumac, la cual se discriminó con relación a los antecedentes de flujos torrenciales que han afectado a la comunidad y que corresponde el sector El Empedrado Vereda San Germán hasta el caserío de la Vereda El Rosal, que de acuerdo con el EOT 2000 – 2011 de Guaitarilla, hacen parte del sector o suelo rural, sin embargo, se ubica a pocos metros hacia el noroeste del Casco urbano como se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**



Figura 39. Mapa de ubicación simulación.

Este tramo comprende alrededor de 2 kilómetros, tomados a lo largo de la quebrada y morfológicamente corresponde a la parte final de un flujo torrencial, es decir a la zona de depósito del flujo conocida como abanico de escombros o llanura de inundación cuando solo se presenta agua y pocos sedimentos, en esta zona la pendiente es menor y el flujo disminuye su velocidad y energía, formando un depósito de sedimentos mal seleccionados **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

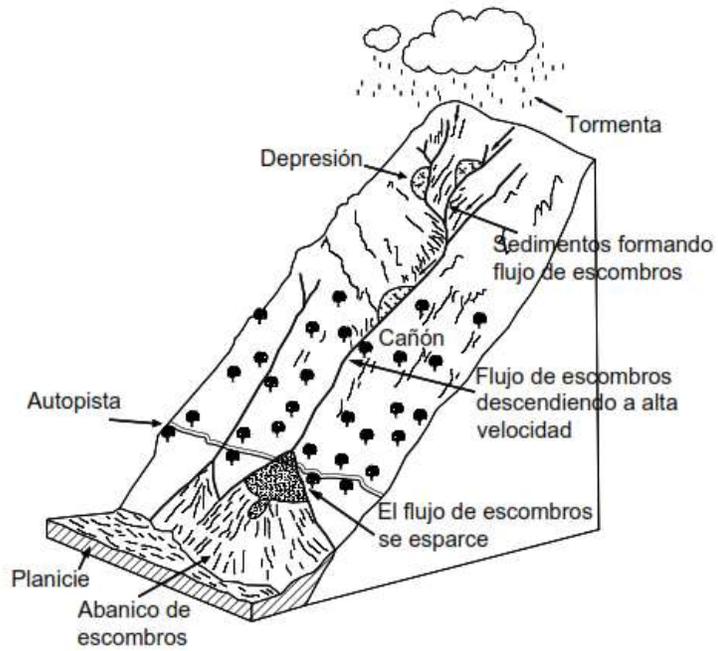


Figura 40. Partes y formación de un flujo torrencial en zonas de alta pendiente (Suárez, 2004).

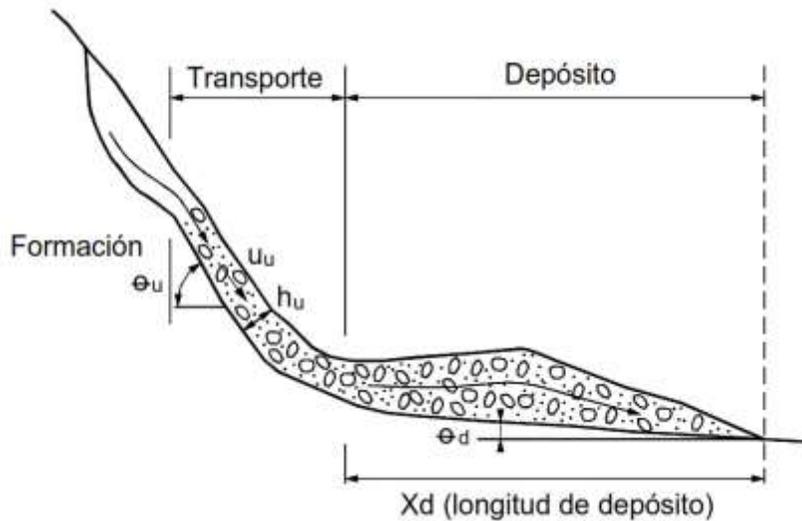


Figura 41. Esquema de un flujo de detritos/escombros (Suárez, 2004).

Partiendo de lo anterior para realizar el modelo hidrológico – hidráulico en el software Flo 2D de la zona comprendida entre El Empedrado hasta El Rosal se requiere de los siguientes insumos y criterios para el modelo en Flo-2D.

7.1.1 ORTOFOTOMOSAICO ZONA DE ESTUDIO.

Figura 42. Ortofotomosaico zona de estudio.

7.1.2 TOPOGRAFÍA

Se realizó un levantamiento topográfico en la zona de mayor impacto por flujos torrenciales y que históricamente han afectado a la comunidad generando daños en infraestructuras y cultivos, por tanto, se realizó recorridos en campo para determinar un tramo de 2 kilómetros iniciando en el sector El empedrado de la vereda San German hasta un punto de la vereda El Rosal, cubriendo 14 hectáreas, a partir del cual se obtuvo curvas de nivel cada 0.5 m con una altitud mínima de m.s.n.m y máxima de m.s.n.m.

Figura 43. Levantamiento topográfico desde sector El Empedrado hasta vereda rosal.

PROCESO DE ELABORACIÓN DE DEM.

Teniendo en cuenta lo anterior y ya obtenida la topografía se procedió a la creación de un Modelo Digital de Elevación (DEM) de la zona de interés. A partir de los puntos de elevación y utilizando el software ArcGIS se establece la creación de una red irregular de triángulos (TIN), la cual se define como un plano basado en vectores utilizado para representar la morfología de la superficie. Una vez generado el TIN, lo siguiente que realizaremos será convertir a Modelo Digital de Elevaciones (DEM) (Vectores a píxeles).

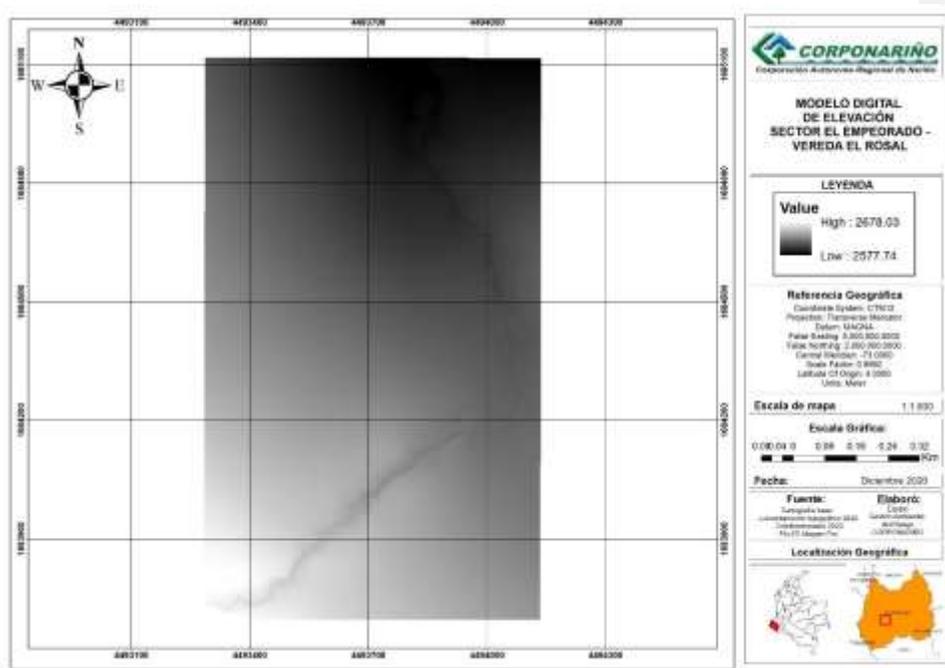


Figura 44. Modelo Digital de Elevación

7.1.3 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD “N” DE MANNING

El coeficiente de rugosidad de Manning es el parámetro más importante dentro del análisis de la rugosidad de un sistema, este nos muestra la resistencia de un flujo al movimiento sobre un elemento base que puede ser un lecho del río, un canal, el suelo, etc. En este contexto se recoge la información de este parámetro para diferentes tipos de suelos:

Tabla 24. Valores de n de Manning para diferentes usos.

| Descripción de la corriente | Mínimo | Normal | Máximo |
|---|--------|--------|--------|
| A Canales naturales | | | |
| A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m) | | | |
| <i>A.1.1 Cursos en planicies</i> | | | |
| - Limpios, rectos, sin fallas ni pozos | 0,025 | 0,030 | 0,033 |
| - Rectos con algunas piedras y pastos | 0,030 | 0,035 | 0,040 |
| - Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos | 0,033 | 0,040 | 0,045 |
| - Meandros con algunas piedras y pastos | 0,035 | 0,045 | 0,050 |
| - Meandros con muchas piedras | 0,045 | 0,050 | 0,060 |
| - Tramos sucios, con pastos y pozos profundos | 0,050 | 0,070 | 0,080 |
| - Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y natural | 0,075 | 0,100 | 0,150 |
| <i>A.1.2 Cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</i> | | | |
| - Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| - Cauce de cantos rodados, con grandes rocas | 0,040 | 0,050 | 0,070 |
| A.2 Cursos en planicies inundadas | | | |
| <i>A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos</i> | | | |
| - Pasto corto | 0,025 | 0,030 | 0,035 |
| - Pasto alto | 0,030 | 0,035 | 0,050 |
| <i>A.2.2 Zonas cultivadas</i> | | | |
| - Sin cultivo | 0,020 | 0,030 | 0,030 |
| - Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica | 0,025 | 0,035 | 0,045 |
| - Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| <i>A.2.3 Zonas arbustivas</i> | | | |
| - Escasos arbustos y pasto abundante | 0,035 | 0,050 | 0,070 |
| - Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal) | 0,035 | 0,050 | 0,060 |
| - Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa) | 0,040 | 0,060 | 0,080 |
| - Arbustos medianos a densos durante la parada invernal | 0,045 | 0,070 | 0,110 |
| - Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa | 0,070 | 0,100 | 0,160 |
| <i>A.2.4 Zonas arboresas</i> | | | |
| - Sauten densos, temporada invernal | 0,110 | 0,150 | 0,200 |
| - Terreno claro con ramas sin brotes | 0,030 | 0,040 | 0,050 |
| - Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes | 0,050 | 0,060 | 0,080 |
| - Zonas de explotación maderera con árboles cuidados, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por dibujo de las ramas | 0,080 | 0,100 | 0,120 |
| - Zonas de explotación maderera con árboles cuidados, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas | 0,100 | 0,120 | 0,160 |
| A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida > 30 m) | | | |
| En este caso, los valores del coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor, | | | |
| - Sección regular sin rocas ni arbustos | 0,025 | | 0,060 |
| - Sección irregular y rugosa | 0,035 | | 0,100 |

Para la asignación del coeficiente de rugosidad, se identificó las coberturas del área de simulación tomando como base el ortofotomosaico elaborado, y se asignó el n-manning para cada una de las coberturas con base en la tabla anterior.

Tabla 25. Asignación n-manning para cada cobertura del área de simulación.

| Cobertura | n-manning |
|--------------------|-----------|
| Área construida | 0.017 |
| Cultivos en hilera | 0.035 |
| Cultivo rotacional | 0.035 |
| Cauce quebrada | 0.04 |
| Masas forestales | 0.05 |
| Praderas | 0.03 |

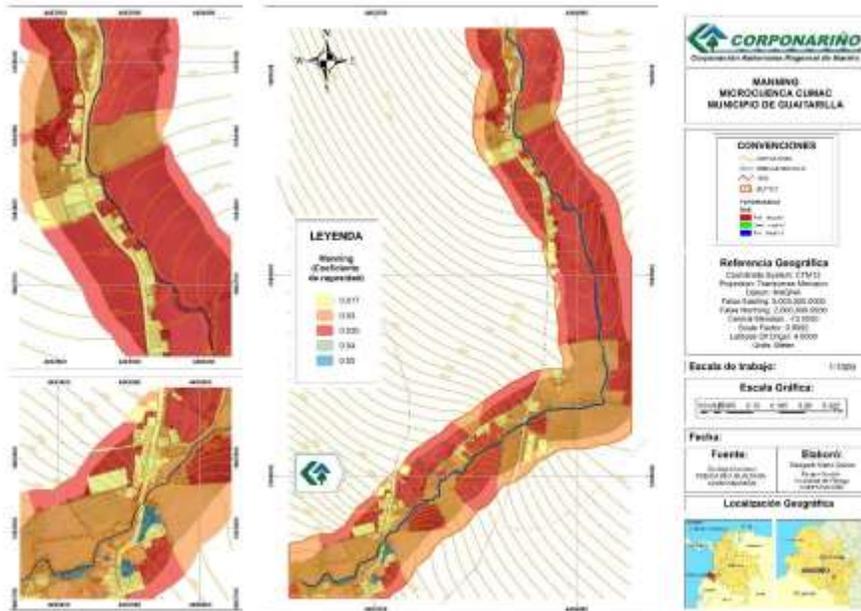


Figura 45. N-manning para modelo Flo2D.

Con formato: Justificado, Espacio Antes: 12 pto, Después: 0 pto

7.1.4 PARÁMETROS DE COEFICIENTES EN RELACIÓN A LA CONCENTRACIÓN DE SEDIMENTOS.

El modelo reológico y las mezclas de agua – sedimento que describen O’Brien & Julien en el modelo Flo 2D, analiza estos parámetros desde las mediciones de la tensión de cizallamiento a varias velocidades de deformación angular; y la viscosidad de la mezcla agua - sedimento, que se define como la pendiente de la relación tensión-deformación, aumenta con la concentración de sedimentos; a partir de esto el modelo de (O’Brien & Julien, 1985), formuló una ecuación cuadrática de la pendiente de fricción para estimar la velocidad, la cual representa la velocidad de flujo, que se calcula a través del límite de la planicie de inundación o elemento de canal utilizando la profundidad de flujo promedio entre los elementos (O’Brien & Julien, 1985). De esta manera estos autores a partir análisis de laboratorio de muestras de flujos de lodo definieron las propiedades en términos de la distribución del tamaño de sedimento y el contenido de arcilla como se muestra en la Tabla 26; a partir de lo cual realizando análisis de regresión obtienen relaciones empíricas por tanto valores de tensión de corte τ_y y la viscosidad η , que varían principalmente con la concentración de sedimento, incrementando exponencialmente con el aumento de dicha concentración (C_v) Tabla 27.

Tabla 26. Propiedades de matriz de flujo en función de tamaño de sedimentos y contenido de arcilla.

| Sample (1) | Sediment Size Distribution | | | | Liquid limit (6) | Plasticity index (7) |
|---------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|------------------------|----------------------------|
| | Clay (%) (2) | D_{16} (mm) (3) | D_{50} (mm) (4) | D_{84} (mm) (5) | | |
| Glenwood original | 4.8 | 0.010 | 0.034 | 0.062 | — | — |
| Glenwood sample 1 | 6.8 | 0.009 | 0.023 | 0.050 | — | — |
| Glenwood sample 2 | 3.0 | 0.016 | 0.035 | 0.061 | — | — |
| Glenwood sample 3 | 4.8 | 0.011 | 0.025 | 0.053 | — | — |
| Glenwood sample 4 | 7.6 | 0.001 | 0.018 | 0.032 | — | — |
| Aspen pit 1 | 31.3 | 0.001 | 0.011 | 0.032 | 0.32 | 0.11 |
| Aspen natural soil | 27.0 | 0.001* | 0.012 | 0.028 | 0.25 | 0.06 |
| Aspen mine fill | 27.8 | 0.001* | 0.013 | 0.030 | 0.24 | 0.06 |
| Aspen natural soil source | 31.6 | 0.001* | 0.016 | 0.039 | — | — |
| Aspen mine fill source | 25.2 | 0.001* | 0.018 | 0.061 | — | — |

*These values were extrapolated from sieve analysis graphs.

A menos que se disponga de un análisis reológico del material del sitio de flujo de lodo, se pueden utilizar las relaciones empíricas de la Tabla 26, que para el caso del área de estudio se determinó estos coeficientes identificando las unidades geológicas que afloran en la zona y el tipo de suelo que estas pueden generar en los procesos de meteorización; en este sentido las rocas que afloran en el sector corresponden a depósitos de lavas y cenizas que presentan un alto grado de meteorización que forman suelos residuales y saprolitos, sin embargo, como no se cuenta con ensayos y análisis de laboratorio, para conocer la cantidad de arcillas que puede tener este tipo de rocas se tomó el estudio de (Herrera Ardila, 2006), quien describe las características y algunas propiedades de los suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia y sus implicaciones en la ingeniería, donde mediante ensayos convencionales de tamizado y sedimentación de suelos derivados de cenizas volcánicas de diferentes regiones establece el predominio de partículas en fracciones de arcilla y limo en estos suelos.

Tabla 27. Coeficientes de tensión de corte y viscosidad (O'Brien & Julien, 1985).

| Table 9. Yield Stress and Viscosity as a Function of Sediment Concentration | | | | |
|---|---|-----------|---|---------|
| Source | $\tau_v = \alpha e^{\beta C_{sv}}$ (dynes/cm ²) | | $\eta = \alpha e^{\beta C_{sv}}$ (poises) | |
| | α | β | α | β |
| <i>Field Data</i> | | | | |
| Aspen Pit 1 | 0.181 | 25.7 | 0.0360 | 22.1 |
| Aspen Pit 2 | 2.72 | 10.4 | 0.0538 | 14.5 |
| Aspen Natural Soil | 0.152 | 18.7 | 0.00136 | 28.4 |
| Aspen Mine Fill | 0.0473 | 21.1 | 0.128 | 12.0 |
| Aspen Watershed | 0.0383 | 19.6 | 0.000495 | 27.1 |
| Aspen Mine Source Area | 0.291 | 14.3 | 0.000201 | 33.1 |
| Glenwood 1 | 0.0345 | 20.1 | 0.00283 | 23.0 |
| Glenwood 2 | 0.0765 | 16.9 | 0.0648 | 6.20 |
| Glenwood 3 | 0.000707 | 29.8 | 0.00632 | 19.9 |
| Glenwood 4 | 0.00172 | 29.5 | 0.000602 | 33.1 |
| <i>Relationships Available from the Literature</i> | | | | |
| Iida (1938) ^a | - | - | 0.0000373 | 36.6 |
| Dai et al. (1980) | 2.60 | 17.48 | 0.00750 | 14.39 |
| Kang and Zhang (1980) | 1.75 | 7.82 | 0.0405 | 8.29 |
| Qian et al. (1980) | 0.00136 | 21.2 | - | - |
| | 0.050 | 15.48 | - | - |
| Chien and Ma (1958) | 0.0588 | 19.1-32.7 | - | - |
| Fei (1981) | 0.166 | 25.6 | - | - |
| | 0.00470 | 22.2 | - | - |
| See O'Brien (1986) for the references. | | | | |

Conversion: Shear Stress: 1 Pascal (PA) = 10 dynes/cm²
 Viscosity: 1 PAs = 10 dynes-sec/cm² = 10 poises

Tabla 28. Distribución de partículas de suelos derivados de cenizas volcánicas.

| Región | Arcilla | Limo | Arena |
|---|-----------|-----------|-----------|
| New Zealand (Allbrook, 1983) | 21% - 42% | 52% - 76% | 0% - 30% |
| West Indies y Japón (Warkentin y Maeda, 1974) | 17% - 19% | 23% - 51% | 25% - 59% |
| Colombia – este estudio | 5% - 25% | 55% - 70% | 5% - 40% |

En consecuencia de lo anterior en primera instancia se determina que de acuerdo con las unidades geológicas del área de estudio el porcentaje de arcillas es entre el 5 – 25% de acuerdo con (Herrera Ardila, 2006) Tabla 28, y por tanto se establece que corresponde a una muestra de Aspen Mine fill Source de acuerdo con las clasificaciones de (O'Brien & Julien, 1985), tal como se muestra en la Tabla 26 y

Tabla 27, definiendo de esta manera para el flujo del área de estudio los coeficientes de tensión de corte y viscosidad que se muestran en la tabla Tabla 29.

Tabla 29. coeficientes de tensión de corte y viscosidad para el área de estudio.

| Source | $\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 C_v}$ (dynes/cm ²) | | $\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 C_v}$ (poises) | |
|---|---|---------|---|---------|
| | α | β | α | β |
| Field Data | | | | |
| Aspen Mine Source Area | 0.291 | 14.3 | 0.000201 | 33.1 |
| *See O'Brien (1986) for the references. Conversion: Shear Stress: 1Pascal (PA) = 10 dynes/cm ² Viscosity: 1Pas = 10 dynes-sec/cm ² =10 poises | | | | |

7.1.5 HIDROGRAMAS SÓLIDOS.

Las características hidrológicas de la cuenca son necesarias para conocer el comportamiento cuando se dan las máximas precipitaciones, este fenómeno hidrológico se representa con una lluvia o tormenta de diseño a partir del cual se crea un hidrograma líquido en base al modelo hidrológico HEC-HMS y la metodología del Soil Conservation Service (SCS), como se menciona en el capítulo 5.4.

En este sentido para el modelo como un flujo de entrada es necesario asignar una concentración volumétrica C_v a la cantidad de agua (caudal) calculada para diferentes tiempos de retorno y de acuerdo con la discretización temporal definida, y de esta manera modelar el tipo de flujo que se definió y que se ha presentado años atrás en el sector El Empedrado y La Vereda El Rosal.

En relación a lo anterior para elaborar los hidrogramas sólido-líquido se definió un C_v de 0.45 para los caudales calculados de los tiempos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años.

7.2 RESULTADOS MODELO FLO 2D SECTOR EL EMPEDRADO – VEREDA EL ROSAL.

Se tomó los caudales calculados en dos horas con una discretización temporal cada 5 minutos para los tiempos de retorno a 2, 25, 50 y 100 años, donde para los picos más bajos se asigna un Cv constante desde 0.20, asumiendo una concentración de sedimentos baja, la cual aumenta en cuanto comienza a ascender los caudales hasta asignar un Cv de 0.45 al valor de mayor caudal de la serie, asumiendo que en los picos más altos hay mayor concentración y transporte de material sólido; de igual manera cuando desciende el hidrograma el Cv disminuye vuelve a ser constante, por tanto la concentración de sedimentos también disminuye.

Para un tiempo de retorno de 2 años el caudal más alto es de $6 \text{ m}^3/\text{s}$, donde los resultados de la simulación indican que el flujo alcanza unas profundidades de 0.4 a 0.8 metros en las partes más distantes del eje de la quebrada y de 2.7 a 3.27 metros sobre el cauce de la quebrada a una velocidad promedio de 2.3 m/s como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

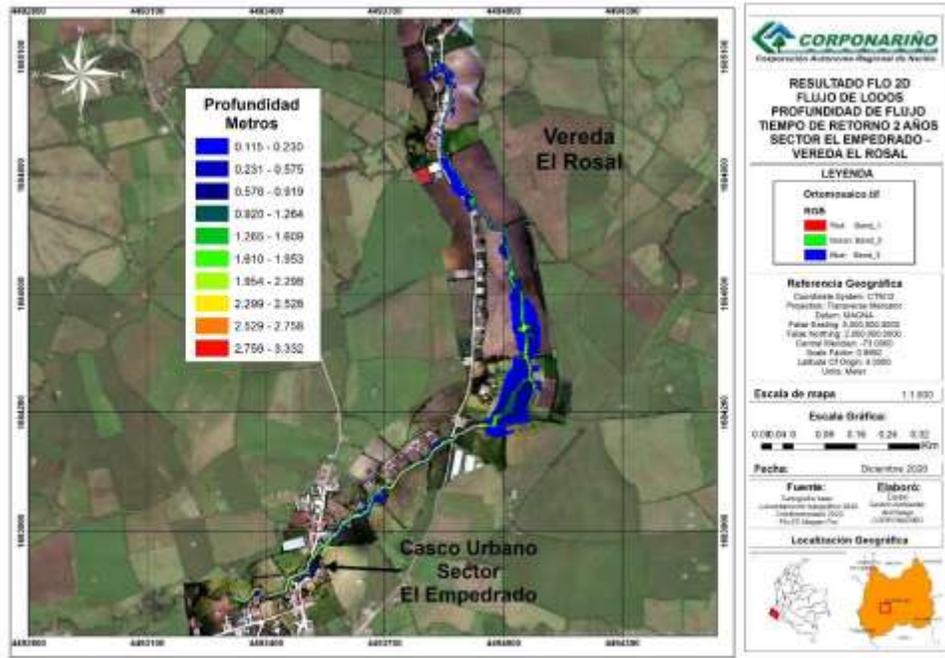


Figura 46. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 2 años.

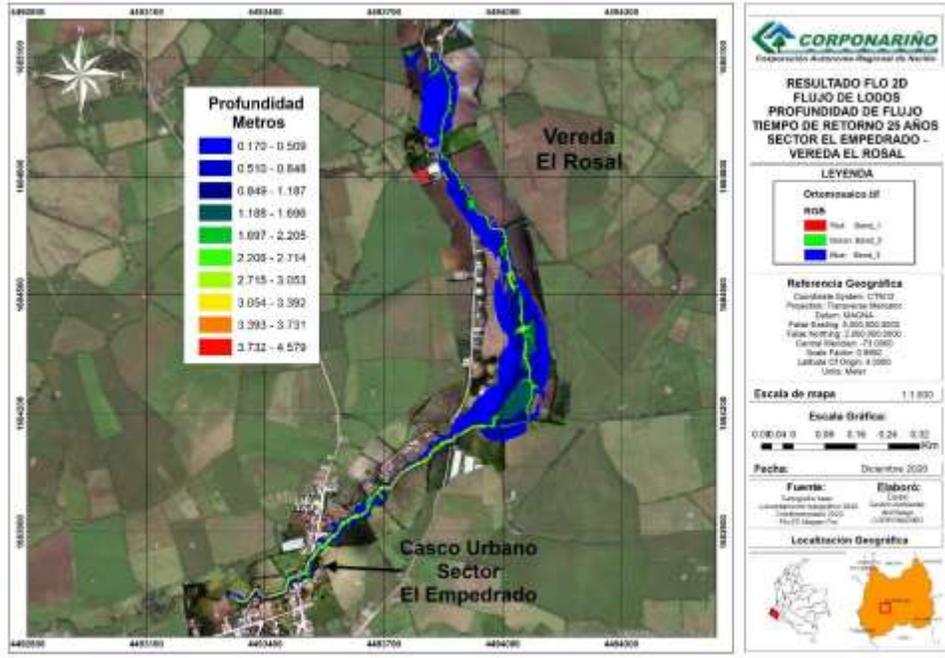


Figura 48. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.

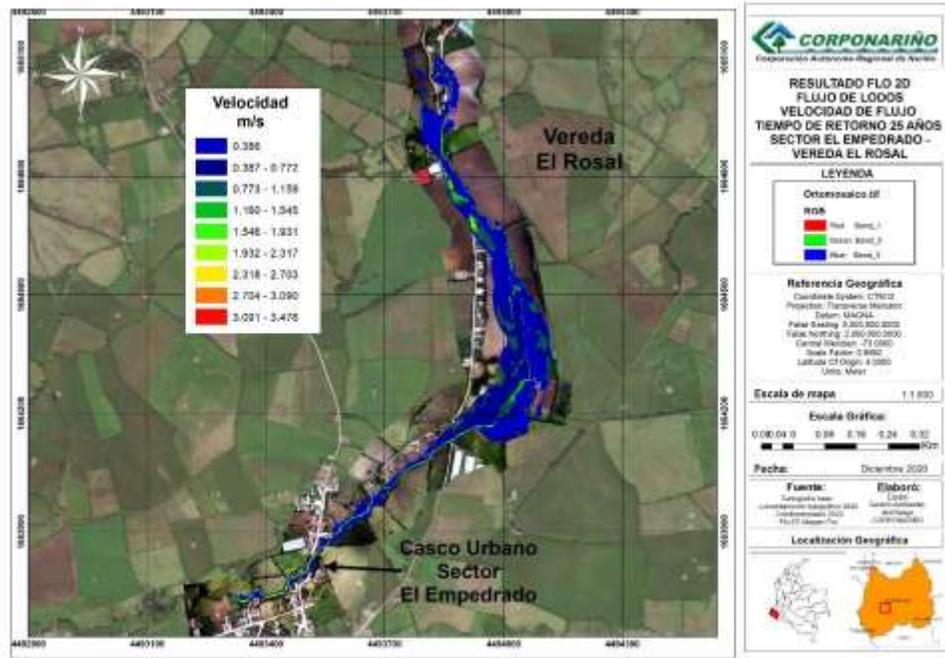


Figura 49. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 25 años.

Para un tiempo de retorno de 50 años el caudal más alto es de 22.4 m³/s, donde los resultados de la simulación indican que el flujo alcanza unas profundidades de hasta 2 metros en las partes más distantes del eje de la quebrada y de 3.8 metros sobre el cauce de la quebrada a una velocidad promedio de 1.7 m/s como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

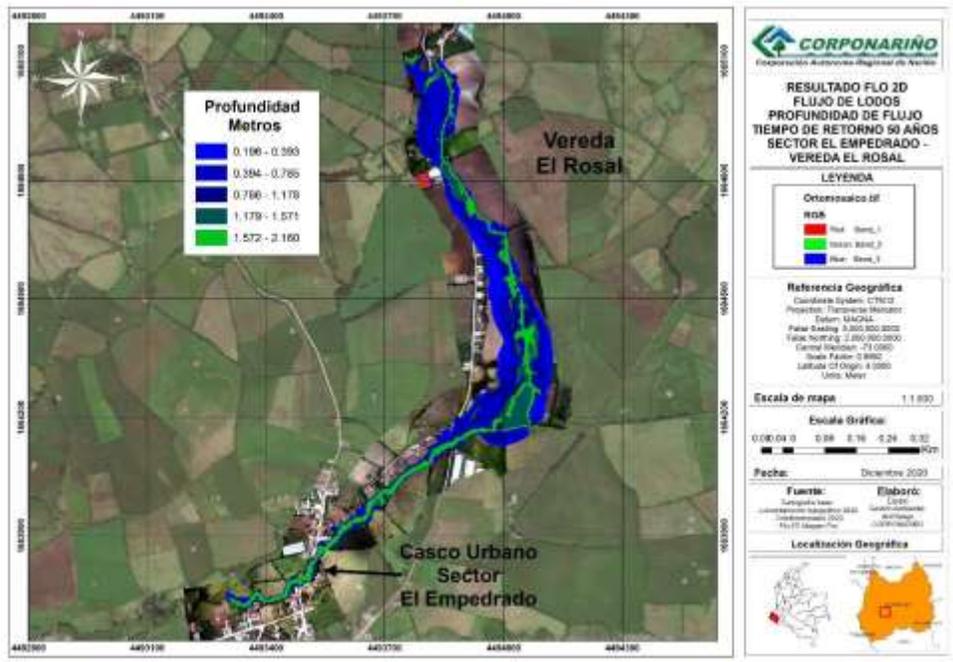


Figura 50. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.

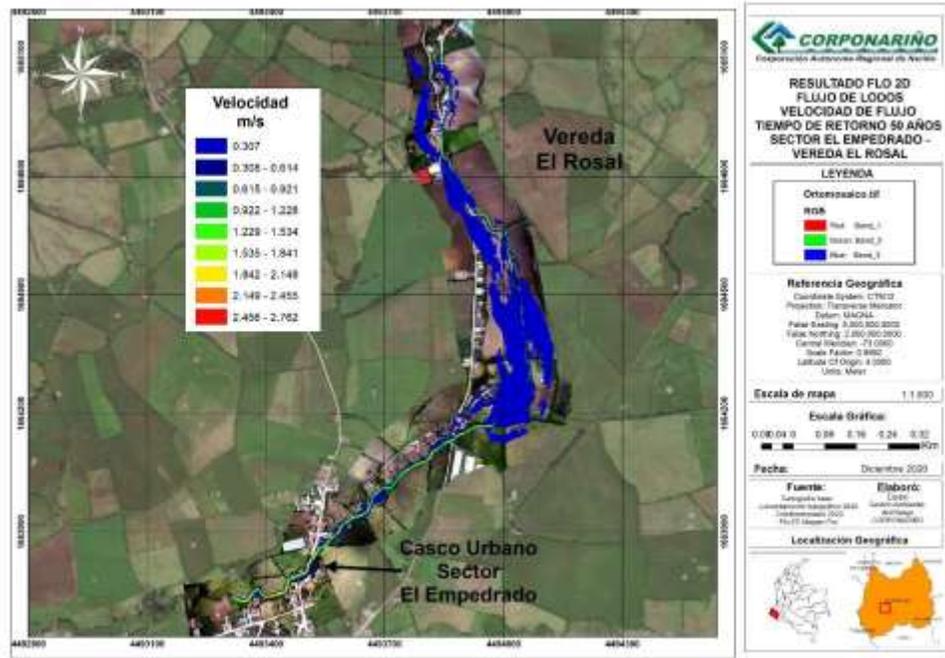


Figura 51. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 50 años.

Para un tiempo de retorno de 100 años el caudal más alto es de 29.3 m³/s, donde los resultados de la simulación indican que el flujo alcanza unas profundidades de hasta 1.5 metros en las partes más distantes del eje de la quebrada y de 5 metros sobre el cauce de la quebrada a una velocidad promedio de 2.2 m/s como se observa en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**

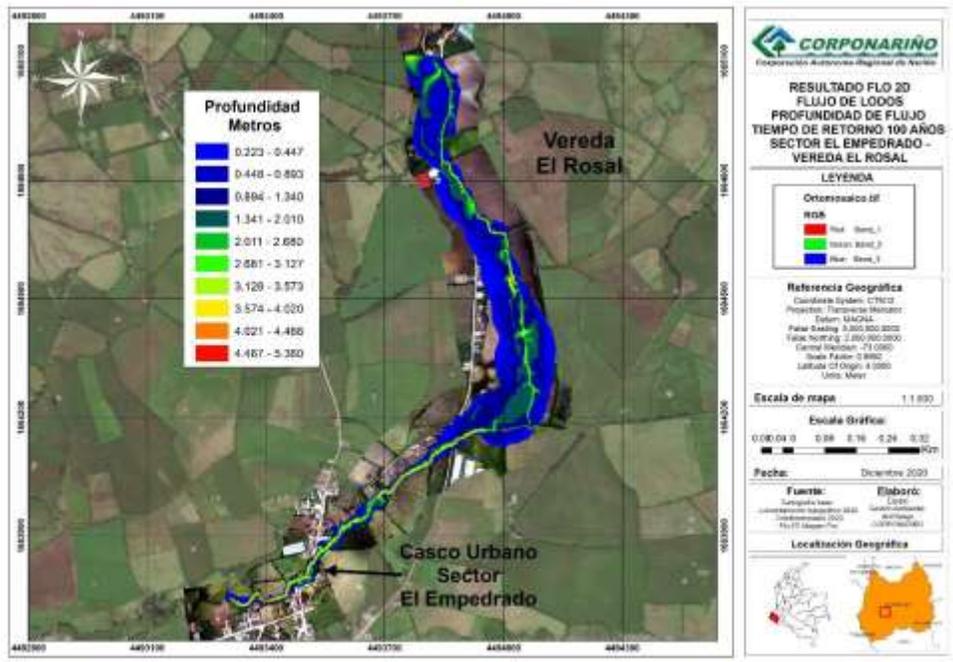


Figura 52. Mapa de profundidad de flujo a tiempo de retorno de 100 años.

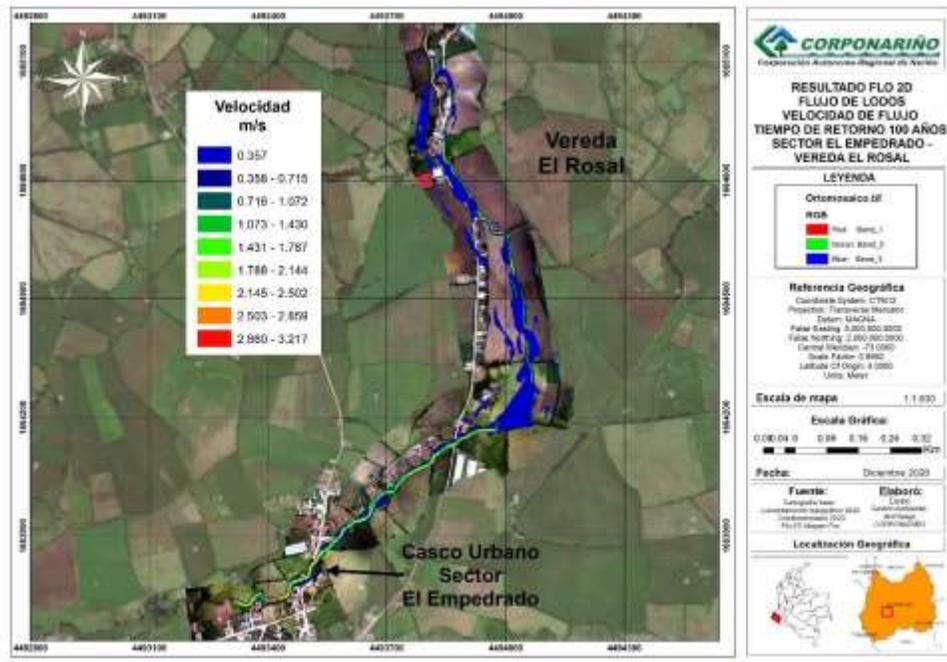


Figura 53. Mapa de velocidad de flujo a tiempo de retorno de 100 años.

7.3 MAPA DE AMENAZA POR AVENIDAS TORRENCIALES SEGÚN MODELO FLO2D PARA EL SECTOR EL EMPEDRADO Y VEREDA EL ROSAL.

El modelo Flo 2D calcula el nivel de amenaza para flujos torrenciales determinada por la probabilidad de ocurrencia del evento y su intensidad, siendo esta última función del tirante de profundidad y velocidad de flujo (García et al. (2002) y García y López (2005), como se muestra en la Tabla 30. Los criterios del mapa de delineación de la amenaza se propusieron por primera vez en el proyecto PREVENE, 2001, donde se aplicaron a dos abanicos aluviales en Caracas, Venezuela. El enfoque sigue los problemas suizos y austriacos que determinan tres zonas (Alto, medio y bajo) para delinear el nivel de amenaza de inundación.

La intensidad del flujo está definida por la profundidad y el producto de profundidad por la velocidad del flujo. La probabilidad de ocurrencia es inversamente

proporcional a la magnitud de la inundación. Por eso, los grandes eventos ocurren con menor frecuencia, pero poseen alta intensidad relativa a la profundidad y a la velocidad del flujo, mientras que los eventos pequeños son más frecuentes, pero menos dañinos.

El nivel de la amenaza se define, entonces, como una función discreta que combina la intensidad (magnitud del evento) y el periodo de retorno (frecuencia) Tabla 31.

Tabla 30. Nivel de Intensidad por flujo torrencial.

| DEFINICIÓN DE LA INTENSIDAD ANTE FLUJOS TORRENCIALES | | | |
|--|-------------------------------------|---|---|
| Intensidad | Máxima profundidad h(m) | | Producto de la máxima profundidad h (m) por la máxima velocidad v (m ² /s) |
| Alta | $h > 1.0 \text{ m}$ | ó | $v h > 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Media | $0.2 \text{ m} < h < 1.0 \text{ m}$ | y | $0.2 \text{ m} < v h < 1.0 \text{ m}^2/\text{s}$ |
| Baja | $0.2 \text{ m} < h < 1.0 \text{ m}$ | y | $v h < 0.2 \text{ m}^2/\text{s}$ |

Tabla 31. Nivel de amenaza por flujo torrencial.

| | | | | |
|----------------------------|-------|------|-------|------|
| INTENSIDAD | Alta | | | |
| | Media | | | |
| | Baja | | | |
| FRECUENCIA | | Alta | Media | Baja |
| Periodo de Retorno | | 2 | 20 | 100 |
| Probabilidad de ocurrencia | | 50% | 5% | 1% |

Acorde con lo anterior para elaborar el mapa de amenaza por flujos torrenciales se tomó los resultados de las simulaciones de los tiempos de retorno de 2, 25 y 50

años, debido a que representan a nivel de confiabilidad probabilística los periodos donde pueden suceder estos eventos, sin llegar a pasarnos del lado de la incertidumbre, debido a que nuestra serie de datos solo cuenta con 49 años de registros. En este sentido se presenta los resultados en el mapa de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

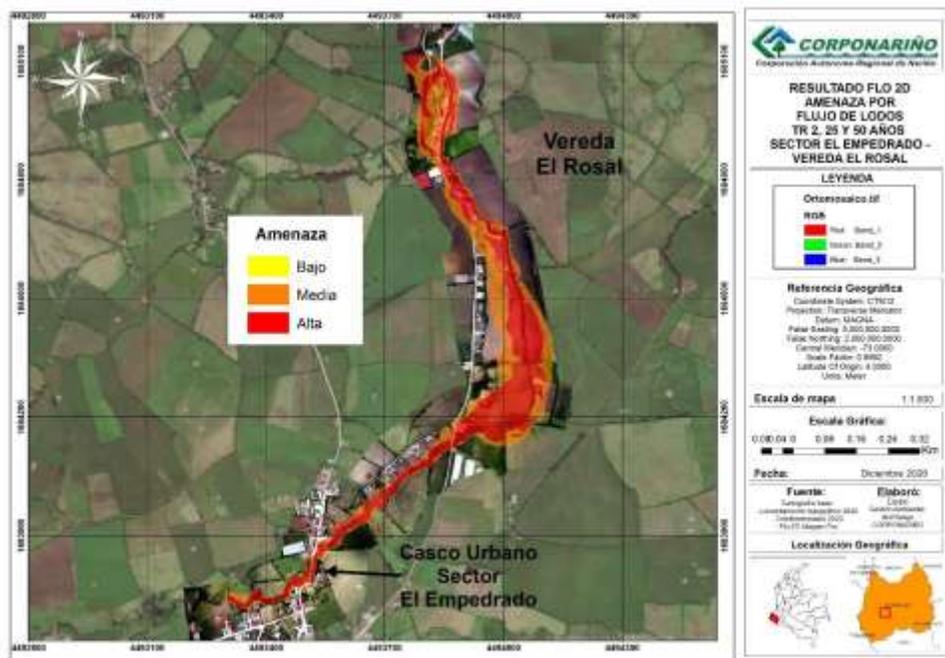


Figura 54. Mapa de amenaza por flujos torrenciales del Sector El Empedrado Vereda San Germán hasta el caserío de la Vereda El Rosal.

8 CONCLUSIONES

La zona de estudio se encuentra marcada por ambientes denudativos que modelan el relieve actual; se definen principalmente por procesos intensos de erosión y meteorización, que generan suelos residuales de diferentes composiciones y texturas, a partir de las unidades geológicas que afloran en el sector. Las unidades geológicas corresponden principalmente a lavas y flujos los cuales se encuentran relacionados con la actividad de los volcanes Galeras, Morasurco y Bordoncillo.

Comentado [46]: Revisar o precisar

Comentado [47]: Y otros volcanes extintos de la zona?

Estos procesos denudativos permiten la generación de movimientos en masa en el terreno, lo cual aporta sedimentos de múltiples tamaños a las fuentes hídricas y al transportarse pueden generar avenidas o flujos torrenciales.

De acuerdo con las definiciones de diferentes autores en cuanto a los flujos torrenciales, se estableció que en el tramo comprendido entre El Sector El Empedrado y La Vereda El Rosal, se presenta un flujo combinado por lodos y escombros, donde los sedimentos de gran tamaño (bloques), se depositan a lo largo de la quebrada, emplazándose principalmente en estructuras como puentes y zonas donde el cauce se estrecha, represando el flujo y haciendo que este se desborde y a partir de estos puntos se comporta como un flujo de lodos que es el que ha causado alertas en la comunidad y daños en viviendas y cultivos.

Comentado [48]: Revisar redaccion

Para realizar el modelo en el software Flo2D, era necesario definir el flujo de acuerdo con la clasificación que hace (O'Brien & Julien, 1985) en el manual de referencia de Flo2, para establecer la concentración volumétrica C_v del flujo; en este sentido partiendo de las características de los depósitos que se ubican a lo largo de la quebrada, los cuales son mal seleccionados y están conformados por clastos de tamaños desde bloques hasta gravas, embebidos por una matriz areno – arcillosa poco compacta, la cual predomina entre los clastos; de esta manera se estableció que se trata de un flujo de lodos (Mud Flow) que tienen una concentración volumétrica C_v entre 0.4 y 0.6, rangos que se asignan a los valores máximos de

caudal calculados en una discretización temporal de cada 5 minutos para los tiempos de retorno de 2, 25, 50 y 100 años. Partiendo de esto para realizar la simulación del flujo, se crean los hidrogramas sólidos para cada tiempo de retorno y se establecen otros insumos necesarios como el DEM, que se elabora a partir del levantamiento topográfico de la zona, la asignación del valor de Manning para cada cobertura y las características reológicas del flujo.

En consecuencia, se obtuvo que para un tiempo de retorno de dos años, el flujo se transporta a lo largo del cauce con profundidades de hasta 2 metros, dependiendo de la morfología del canal e inunda zonas planas con una profundidad de flujo de hasta 0.57 metros, y alcanza velocidades de 1.1 m/s sobre el canal y de hasta 0.45 en zonas inundadas.

Para un tiempo de retorno de dos años, el flujo se transporta a lo largo del cauce con profundidades de hasta 3 metros, dependiendo de la morfología del canal y se amplía la zona de inundación que morfológicamente son planas con una profundidad de flujo de hasta 1.69 metros, zona donde se ubican viviendas y cultivos, y alcanza velocidades de 1.5 m/s sobre el canal y de hasta 0.7 en zonas inundadas.

Para un tiempo de retorno de cincuenta años, el flujo se transporta a lo largo del cauce con profundidades de hasta 2.1 metros, dependiendo de la morfología del canal, y amplía aún más la zona de inundación con una profundidad de flujo de hasta 0.7 metros, y alcanza velocidades de 2.45 m/s sobre el canal y de hasta 0.9 en zonas inundadas.

Finalmente, para un tiempo de retorno de 100 años, el flujo se transporta a lo largo del cauce con profundidades de hasta 4 metros, dependiendo de la morfología del canal y amplía la zona de inundación que morfológicamente son planas con una profundidad de flujo de hasta 1.3 metros, alcanzando velocidades de 2.8 m/s sobre el canal y de hasta 0.7 en zonas inundadas.

Finalmente, al generar el mapa de amenaza se estableció que las zonas de amenaza alta corresponden al canal de la quebrada y las zonas de inundación donde el flujo alcanza hasta 1.7 metros, donde se ubican cultivos, viviendas y estructuras como puentes y vías de acceso, y en la zona más distante al cauce de la quebrada se presenta una zona de amenaza media por flujos torrenciales.

9 RECOMENDACIONES

- De acuerdo con los resultados obtenidos, se pudo identificar que gran cantidad de viviendas y cultivos se encuentran en zonas de amenaza alta por flujos torrenciales, por tanto, se recomienda a la administración municipal, realizar control y monitoreo constante de la quebrada, principalmente antes y durante, las épocas más lluviosas, con el fin de identificar cambios en el caudal de la quebrada y/o la generación de movimientos en masa que puedan generar represamientos; esto con el fin de tomar las medidas preventivas necesarias de manera oportuna e informar a la comunidad sobre la posibilidad de daños o pérdidas, evitando posibles escenarios de desastre; de esta manera; salvaguardar la vía y el bienestar de la comunidad que reside en tanto en Sector El Empedrado como en la Vereda El Rosal.
- De acuerdo con lo anterior, es importante que la secretaría de planeación tenga en cuenta lo establecido en el Decreto 1076 de 2015 “Artículo 2.2.1.1.18.2. Protección y conservación de los bosques: En relación con la protección y conservación de los bosques, los propietarios de predios están obligados a respetar una faja no inferior a 30 metros de ancha, paralela a las líneas de mareas máximas, a cada lado de los cauces de los ríos, quebradas y arroyos, sean permanentes o no, y alrededor de los lagos o depósitos de agua”; por tanto se debe hacer respetar dicha faja de protección y restringir el uso de suelo para otras actividades diferentes a la protección, con el fin de recuperar el entorno natural para preservar y conservar el medio ambiente, y mitigar en cierta medida el riesgo de desastres.
- Así mismo, se debe tener en cuenta lo dispuesto en el Decreto 1077 de 2015, Título 2, Sección 3: “Incorporación de la gestión del riesgo de desastres en los planes de ordenamiento territorial”; donde establece que los municipios deben realizar los estudios básicos y detallados de gestión del riesgo, con el fin de identificar los sectores que presentan mayor grado de amenaza y riesgo por fenómenos naturales y tomar las medidas para el manejo y la

Comentado [49]: Porque gran cantidad? cuántas viviendas son? Es un buen dato

prevención de desastres naturales; cabe resaltar que los estudios mencionados, son insumos importantes para el proceso de revisión y ajuste del Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) que el municipio debe adelantar de manera urgente, lo cual permitirá orientar la propuesta del modelo de ocupación del territorio y establecer los proyectos correspondientes en el componente programático. Se recomienda gestionar los recursos pertinentes a través de proyectos, encaminados a efectuar de manera urgente la revisión y ajuste del EOT, paralela o inmediatamente después de los resultados que arrojen los estudios básicos de gestión del riesgo, considerando que este instrumento se encuentra vencido en cuanto a sus contenidos de corto, mediano y largo plazo.

- Es importante tener en cuenta para mitigar daños por avenidas torrenciales la limpieza de ríos y quebradas: Identificar aquellas zonas sobre las fuentes hídricas, donde se presentan avenidas torrenciales y realizar seguimientos sobre su cauce, realizando limpieza de material vegetal y material sedimentario que pueda obstruir el flujo normal de la corriente.
- De igual manera es importante realizar actividades de restauración ecológica, llevando a cabo mejoras de la cubierta vegetal de las cuencas a partir de la repoblación arbórea de vertientes y riberas, evitando procesos erosivos que desencadenen fenómenos de avenidas torrenciales; finalmente se debe tener en cuenta los cultivos a nivel, donde es necesario en algunas ocasiones llevar a cabo actividades agrícolas en fajas y/o bancales para disminuir procesos erosivos en zonas con elevadas pendientes y con poca cobertura vegetal.
- Se recomienda al municipio actualizar el Plan Municipal de Gestión del Riesgo y formular la Estrategia Municipal de Respuesta a Emergencias (EMRE), puesto que son una herramienta dinámica que ayuda a la toma de decisiones dentro de los procesos de conocimiento y reducción del riesgo,

así como del manejo del desastre, conforme al ámbito de sus competencias, en cumplimiento de la Política Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres (Ley 1523/2012), construyendo comunidades menos vulnerables y más resilientes, con la adecuada articulación con los instrumentos de planificación.

10 BIBLIOGRAFÍA

- Aristizábal, E., Arango, C. M., & García, L. I. (2019). *Definición y clasificación de las avenidas torrenciales y su impacto en los Andes colombianos*. Medellín, Colombia: Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía 29 (1): 242-258. doi: 10.15446/rcdg.v29n1.72612.
- Carvajal, J. H. (2012). *PROPUESTA DE ESTANDARIZACION DE LA CARTOGRAFÍA GEOMORFOLOGICA EN COLOMBIA*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Castillo, L. (2006). *Aplicación de un Modelo Numérico de Flujos de Escombros y Lodo en una Quebrada en el Perú (Tesis de pregrado)*. Lima, Perú: Universidad Nacional de Ingeniería. Obtenido de <http://cybertesis.uni.edu.pe>
- Celi, F. C., & Tanta, A. Y. (2019). *Modelamiento y Simulación de la Quebrada Lloracllamayo para control de flujos de escombros Región de Puno*. Lima, Perú: Universidad Ricardo Palma. Facultad de Ingeniería. Programa de titulación por Tesis Escuela Profesional de Ingeniería Civil.
- FLO 2D. (2017). En *Reference Manual. Build No. 17*.
- GEMMA. (2007). *Movimientos en Masa en la Región Andina - Una Guía para la Evaluación de Amenazas*. Grupo de Estándares para Movimientos en Masa (GEMMA).
- Herrera Ardila, M. (2006). *Suelos derivados de cenizas volcánicas en Colombia: Estudio fundamental e implicaciones en ingeniería*. Bogotá: Universidad de los Andes. Grupo de investigación en Geotecnia.
- Hunger, O., Evans, S. G., Bovis, M. J., & Hutchinson, J. N. (2001). *A review of the classification of landslides of the flow type*. Canada: Environmental and Engineering Geoscience.

- IDEAM. (2013). En M. y. Instituto de Hidrología, *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua*. Bogotá.
- IIAMA. (2019). *Instituto de Ingeniería del Agua y medio Ambiente*. Recuperado el 05 de 2019, de <https://www.iiama.upv.es/iiama/es/transferencia/software/afins-2-0-e>
- MADS. (2014). *Protocolo para la Incorporación de la Gestión del Riesgo en los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas*. Bogotá: Fondo de Adaptación .
- O'Brien, J. S., & Julien, P. Y. (1985). *Physical processes of hyperconcentrated sediment flows”, Proceedings of the ASCE Specialty Conference on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah*. . Utah Water Research Laboratory.
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Pierson , T. C., & Costa, J. E. (1987). *A reologyc classifications of subaereal sediment - water flows* (Vol. 2). Colorado, Boulder: U.S Geological Survey.
- PMGRD. (2015). *Plan Municipal de Gestión del Riesgo*. Guaitarilla .
- SGC. (2015). *MEMORIA EXPLICATIVA MAPA GEOMORFOLÓGICO APLICADO A MOVIMIENTOS EN MASA, ESCALA 1:100.000, PLANCHA 429 - PASTO*. (S. G. Colombiano, Ed.) Bogotá: CONVENIO DE COOPERACIÓN ESPECIAL No. 039 DE 2013. .
- Suárez , J. (2001). *Control de erosión en zonas tropicales*. Bucaramanga, Colombia. Obtenido de <https://www.erosion.com.co/>
- Suárez, J. (2004). *Libro de Deslizamientos: Análisis geotécnico. Capítulo 5*. Bucaramanga. Obtenido de www.erosion.com

Takahashi, T. (2014). *Debris Flow. Mechanics, Prediction and Countermeasures*.
Londres, Reino Unido : CRC Press / Balkema.

TARBUCK, E., & LUTGENS, F. (2005). *Ciencias de la Tierra*.

VELEZ UPEGUI, J. J., & BOTERO GUTIERREZ, A. (2010). *researchgate*.
Recuperado el 2019, de <https://www.researchgate.net/>

Vergara, L. E. (2006). *Simulación de flujos hiperconcentrados, usando el modelo Flo2D: Un caso de estudio del Río Seco - Huaraz*. Huaraz, Ancash, Perú:
Hidráulica de Transporte de Sedimentos. Doctorado en Recursos Hídricos.