



**AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO DE LAS CUENCAS
DE LAS QUEBRADAS TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO Y EL CARMEN
Y LOS RÍOS MULATO Y SANGOYACO, MUNICIPIO DE MOCOA, ESCALA
1:5.000**

MOCOA – PUTMAYO.

Bogotá, febrero de 2018



GRUPO DE TRABAJO

Ing. Gloria Lucía Ruiz
Coordinadora Grupo de Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa

Ing. Andrés Reyes Merchán
Líder Técnico

Ing. Enif Medina
Geól. Astrid Sandoval
Geól. Helbert García
Geól. Joan Camilo Morales
Ing. Michael Pérez Moreno
Ing. Carlos Andrés Gamboa
Ing. Luis Antonio Barrera

Bogotá, febrero de 2018.

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	10
2. GENERALIDADES.....	11
2.1 LOCALIZACIÓN.....	11
2.2 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.....	12
2.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.....	14
2.3.1 Estudios previos.....	14
2.4.2 Cartografía base y sensores remotos.....	15
3. CARACTERIZACIÓN AMBIENTAL.....	19
3.1 Análisis morfométrico.....	21
3.1.1 Sinuosidad del frente de montaña (<i>Smf</i>).....	23
3.1.2 Curva hipsométrica (<i>IH</i>).....	25
3.1.3 Curva hipsométrica Quebrada San Antonio.....	28
3.1.4 Curva hipsométrica río Sangoyaco.....	28
3.1.5 Curva hipsométrica Taruca.....	30
3.1.6 Curva hipsométrica Mulato.....	31
3.1.7 Curva hipsométrica El Carmen.....	33
3.1.8 Curva hipsométrica Mocoa Centro.....	33
3.1.9 Factor de Asimetría Normalizado (<i>AF</i>).....	35
3.1.10 Longitud de corriente vs. Gradiente de corriente o índice de Hack (<i>SL</i>).....	38
3.1.11 Relación ancho del valle vs. -altura del valle (<i>Vf</i>).....	40
3.1.12 Relación de elongación vs. Formas de cuencas (<i>Re</i>).....	43
3.2 Análisis geológico.....	51
3.2.1 Control tectónico y litológico.....	52
3.3 Análisis geomorfológico.....	53
3.3.1 Procesos de estabilización de laderas e incisión de los drenajes.....	53
3.3.2 Mecanismos de amplificación del evento del 31 de marzo de 2017.....	56
3.4 Análisis hidrológico.....	62
3.4.1 Precipitación media anual.....	63
3.4.2 Precipitación media mensual.....	65
3.4.3 Días con lluvia.....	66
3.4.4 Precipitación máxima en 24 horas.....	67
3.4.5 Isoyetas.....	68
4 CALIBRACIÓN DEL EVENTO.....	75
4.4 Condiciones de borde.....	75
4.4.1 Parámetros del Modelo.....	75
4.4.2 Lluvia de diseño.....	75
4.4.3 Secciones de diseño.....	78

4.4.4	Análisis de Laboratorio.	80
4.5	Descripción del modelo matemático.	82
4.5.1	Ecuaciones que describen el movimiento del flujo.....	82
4.5.2	Características reológicas del flujo.	84
4.5.3	Limitaciones del modelo FLO2D.	85
4.6	Condiciones dinámicas del evento del 31 de marzo de 2017.	85
4.7	Análisis de Resultados.....	94
5	EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO DE LAS CUENCAS DE LAS QUEBRADAS TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO Y EL CARMEN Y LOS RÍOS MULATO Y SANGOYACO, MUNICIPIO DE MOCOA, ESCALA 1:5.000.....	95
6	CONCLUSIONES.....	101
7	BIBLIOGRAFÍA	104

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Área de estudio a escalas 25.000 y 5.000.	12
Figura 2. Modelo de sombras a partir del modelo digital de elevación GeoSAR, 5 metros de resolución espacial.	16
Figura 3. Planchas IGAC correspondientes al área de estudio.....	17
Figura 4. Cubrimiento areal de la imagen de Geoespacial – CORPOAMAZONÍA del año 2017, escala 1:5.000.....	18
Figura 5. Mapa de Unidades Geológicas Superficiales del área de estudio, escala 1:25.000.	19
Figura 6. Cuencas de la zona de estudio asociadas con evento del 31 de marzo de 2017. 22	22
Figura 7. Diagrama idealizado mostrando cómo se calcula el índice de sinuosidad de frente de montaña (Smf).....	23
Figura 8. Índice de sinuosidad del frente montañoso asociado a la Falla Mocoa-La Tebaida.	24
Figura 9. Relación y parámetros de la Curva hipsométrica e integral hipsométrica.	25
Figura 10. Valor de integral hipsométrica (IH), en las cuencas de la zona de estudio.	27
Figura 11. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca de la quebrada San Antonio.....	28
Figura 12. Valor de Curvas hipsométricas de la cuenca de la parte alta del río Sangoyaco.	29
Figura 13. Valor de Curvas hipsométricas de la cuenca de la parte baja del río Sangoyaco.	29
Figura 14. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte alta de la quebrada Taruca.	30
Figura 15. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte baja de la quebrada Taruca.	31
Figura 16. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte alta del río Mulato.....	32
Figura 17. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte baja del río Mulato.....	32
Figura 18. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca de la quebrada El Carmen.	33
Figura 19. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca Mocoa Centro.....	34
Figura 20. Valor de Curva hipsométrica normalizada para las cuencas.	35
Figura 21. Factor de asimetría y su significado tectónico.....	36
Figura 22. Índice de Asimetría normalizado de las cuencas quebradas San Antonio, Taruca, El Carmen, Mocoa Centro y los ríos Sangoyaco y Mulato.....	37
Figura 23. Procedimiento para calcular el índice SL.....	38
Figura 24. Índice de Hack (SL) para las cuencas de la zona de estudio.....	39

Figura 25. Relación ancho del piso del valle vs., altura del valle.	41
Figura 26. Valores de la relación entre ancho y altura del valle de los drenajes de la zona de estudio.	42
Figura 27. Procedimiento para calcular los radios de elongación R_e sobre las cuencas presentes en una zona de actividad neo-tectónica (Bull, 2009, en Oviedo, 2015).....	44
Figura 28. Relación de elongación y forma de las microcuencas de la zona de estudio. ...	44
Figura 29. Estilo estructural sugerido para las cuencas de la región de estudio. Se resaltan en rojo las fallas inversas N-S, NE_SW, con componente dextral, limitando los bloques A-B y C y fallas normales NW-SE que limita los bloques C y C' (Fuente SGC, 2017).	47
Figura 30. Extensión del abanico fluviotorrencial de la quebrada Taruca (línea punteada roja) y corte A-A' línea negra.....	49
Figura 31. Vista aérea de las quebradas Taruca y Taruquita donde se observa la morfología de valle en "V", la zona de mayor densidad de deslizamientos y de agradación del canal.	54
Figura 32. Sección longitudinal del cauce de las quebradas Taruca, Taruquita y río Sangoyaco.....	56
Figura 33. Sección longitudinal del cauce del río Mulato.	56
Figura 34. Análisis multitemporal a 15 años de los movimientos en masa detonados en las cuencas de estudio.	58
Figura 35. Gradación del material del flujo de detritos sobre la margen izquierda de la quebrada Taruca horas después del evento del 31 de marzo de 2017.	60
Figura 36. Ortofoto donde se observa la densidad de los movimientos en las quebradas Taruca (sur) y Taruquita (norte) en cercanías de la Falla Mocoa-La Tebaida (línea a trazos roja), así como la localización de las obstrucciones parciales o totales pre-evento (flechas rojas) y pos-evento (flechas amarillas).....	61
Figura 37. Localización de estaciones IDEAM en estudio.	62
Figura 38. Histograma de precipitación media anual multianual.....	64
Figura 39. Histograma de precipitación media mensual multianual. (mm/mes).	65
Figura 40. Curva de predicción.....	70
Figura 41. Isoyetas de precipitación media.....	71
Figura 42. Isoyetas de precipitación máxima.....	71
Figura 43. Isoyetas de precipitación para Tr2.33.....	72
Figura 44. Isoyetas de precipitación para Tr5.....	72
Figura 45. Isoyetas de precipitación para Tr25.....	73
Figura 46. Isoyetas de precipitación para Tr50.....	73
Figura 47. Isoyetas de precipitación para Tr100.....	74
Figura 48. Hidrograma estación Acueducto (01 de enero de 2017 – 07 abril de 2017).....	78
Figura 49. Intensidades de precipitación para el día 31 de marzo de 2017.	78
Figura 50. Hidrograma de diseño para el día 31 de marzo de 2017 y valores de intensidad.	78

Figura 51. Localización de las secciones de análisis para la generación de hidrogramas en la quebrada Taruca, Taruquita y San Antonio.....	79
Figura 52. Localización de la sección sobre el río Sangoyaco.	79
Figura 53. Localización de las secciones sobre el río Mulato.....	80
Figura 54. Granulometrías de los lechos de las quebradas Taruquita, Taruca, San Antonio y El Carmen y de los ríos Sangoyaco y Mulato.....	80
Figura 55. Localización general de muestreos.	81
Figura 56. Localización general de muestreos.	81
Figura 57. Localización de las secciones transversales analizadas para el cálculo de velocidades en las quebradas Taruca, Taruquita y el río Mulato.....	89
Figura 58. Sección Tq1-1, donde se el caudal transitado es de 165 m ³ /s.....	90
Figura 59. Tq2-2, donde se el caudal transitado es de 222 m ³ /s.....	90
Figura 60. Tc2-3, donde se el caudal transitado es de 110 m ³ /s.	91
Figura 61. Tc1-5, donde se el caudal transitado es de 108 m ³ /s.	91
Figura 62. Tc3-6, donde se el caudal transitado es de 390 m ³ /s.	92
Figura 63. Tc5-9, donde se el caudal transitado es de 362 m ³ /s.	92
Figura 64. S11, donde se el caudal transitado es de 79 m ³ /s.	93
Figura 65. S12-S13, donde se el caudal transitado es de 137 y 217 m ³ /s respectivamente.	93
Figura 66. Hidrograma tipo obtenido por la modelación FLO2DPro®. (Cuenca integrada).95	
Figura 67. Hidrograma típico obtenido por la modelación FLO2DPro® (Cuenca Mulato)...	96
Figura 68. Mapa de amenaza por movimientos en masa tipo flujo de las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio y El Carmen y los Ríos Mulato y Sangoyaco, municipio de Mocoa.....	99
Figura 69. Mapa Integrado de Amenaza por Movimientos en Masa y Avenidas Torrenciales del Área Urbana, Periurbana y de Expansión del Municipio de Mocoa.....	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Registro de los eventos fluvio-torrenciales que han afectado el casco urbano del municipio de Mocoa en los últimos 70 años.....	20
Tabla 2. Valores de índices morfométricos evaluados para las microcuencas de estudio..	45
Tabla 3. Parámetros para definir características de forma, drenaje y relieve.....	49
Tabla 4. Parámetros para definir características de forma, drenaje y relieve.....	50
Tabla 5. Estaciones IDEAM analizadas.	62
Tabla 6. Valores anuales de precipitación media, mínima y máxima. (mm/año).	63
Tabla 7. Precipitación media mensual.	65
Tabla 8. Días con lluvia.	66
Tabla 9. Precipitación máxima en 24 horas.	67
Tabla 10. Valores de distribución de Gumbel para valores extremos de precipitación máxima en 24 horas.	68
Tabla 11. Valores de precipitación media y máxima en 24 horas para cada una de las 6 estaciones en estudio.	70
Tabla 12. Valores de precipitación para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200 y 500.	70
Tabla 13. Hidrograma de diseño.	76
Tabla 14. Coeficientes para el cálculo de esfuerzos cortantes y viscosidad en el flujo.....	85
Tabla 15. Coeficiente de rugosidad con base en los valores de Xu y Feng (1979). Modificada de Cui et al. (2013).	86
Tabla 16. Relación entre el coeficiente de velocidad K_c y la profundidad del flujo H_c	87
Datos de Chen et al., 1983 y Du et al., 1987; Modificado de Cui et al., (2013).	87
Tabla 17. Valores de caudal y velocidad calculados con las relaciones empíricas: Wudu, Chezy y FLO2D para las quebradas Taruca (T_c), Taruquita (T_q) y el río Mulato (M_t).	88

LISTA DE ANEXOS.

Pág.

Anexo A. Análisis de laboratorio (PDF)

RESUMEN.

Este documento presenta la caracterización morfológica regional de las microcuencas que dieron lugar a la avenida torrencial que afectó el pasado 31 de marzo de 2017 al municipio de Mocoa, donde se identifican y analizan los principales índices para cada una de ellas a partir de la información secundaria y primaria obtenida por el SGC. A su vez muestra, desde el análisis hidrológico la identificación del comportamiento regional y puntal de la lluvia sobre las áreas de estudio 1:25.000 y 1:5.000 que integran los estudios adelantados por el SGC como apoyo técnico al municipio de Mocoa.

Por otra parte, y basado en los documentos técnicos elaborados por el SGC, “ZONIFICACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD Y AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA DE LAS SUBCUENCAS DE LAS QUEBRADAS TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO, EL CARMEN Y LOS RÍOS MULATO Y SANGOYACO DEL MUNICIPIO DE MOCOA – PUTUMAYO. Escala 1:25.000 (área de 4.678 ha)” y “CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO EN MASA TIPO FLUJO DEL 31 DE MARZO DE 2017 EN MOCOA – PUTUMAYO”, se presenta la calibración hidráulica del evento enfocada a simular la magnitud total del material transportado y área afectada, esto con el uso del software FLO2D con el que se realizaron numerosas modelaciones para flujos hiperconcentrados que permitieron tener un escenario cercano al sucedido el 31 de marzo, para finalmente presentar el mapa de amenaza por movimientos en masa tipo flujo en escala 1:5.000 sobre las 4.678 hectáreas que integran las microcuencas de las quebradas Taruquita, Taruca, San Antonio, El Carmen y de los ríos Sangoyaco y Mulato.

1. INTRODUCCIÓN.

El Servicio Geológico Colombiano como parte del apoyo al municipio de Mocoa presenta el estudio de zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo en escala 1:5.000 para las microcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y de los ríos Sangoyaco Y Mulato en un área de 4.678 Ha, en consideración a la emergencia presentada los días 31 de marzo y 1 de abril de 2017 por efectos de una avenida torrencial, la cual se caracterizó por el arrastre de rocas de gran volumen, capa vegetal y removilización de materiales de antiguos abanicos fluviotorrenciales del lecho de las corrientes de agua, lo que incrementó de manera significativa el volumen del material arrastrado, causando finalmente la pérdida de vidas, daños ambientales e infraestructura y en general a la economía regional del Putumayo.

Estos fenómenos naturales clasificados como avenidas torrenciales tienen un alto poder destructivo, donde factores como la geomorfología, cobertura y uso del suelo combinados con las condiciones particulares del suelo o rocas que los contienen, dan lugar a escenarios aptos para la ocurrencia de éstos, que sumados a una mayor recurrencia de eventos climáticos extremos permiten tener avenidas torrenciales cada vez más intensas y destructivas.

Debido al carácter destructivo de este tipo de eventos, se han definido herramientas de gestión del riesgo como el Decreto 1807 de 2014 y la Ley 1523 de 2012, en las cuales se define el nivel de conocimiento de este tipo de eventos y las escalas de trabajo. En esta perspectiva es importante tener claro que en Colombia no menos de 299 municipios están localizados sobre geoformas de origen denudacional y fluvial que pueden considerarse o tienen relación con corrientes torrenciales que desembocan en zonas planas habitadas.

Así las cosas, el SGC presenta este documento que integra los resultados de la calibración hidráulica de la avenida torrencial del 31 de marzo, el análisis geomorfométrico de las microcuencas y la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo.

2. GENERALIDADES.

2.1 LOCALIZACIÓN.

El departamento de Putumayo se localiza al sur occidente del país, abarca un área de 24.485 Km² que va desde el macizo colombiano pasando por el piedemonte amazónico y termina en la llanura amazónica.

El municipio de Mocoa se encuentra ubicado al noroccidente del departamento del Putumayo, desde el piedemonte amazónico a la altura del Nudo de Los Pastos limitando al norte con los municipios de Santa Rosa (Departamento del Cauca) y Tablón (Departamento de Nariño), por el oriente con los municipios de Santa Rosa y Piemonte (Departamento del Cauca) y Puerto Guzmán, por el sur con el municipio de Puerto Caicedo y por el occidente con el municipio de San Francisco y Villa Garzón. Tiene una extensión aproximada de 1.330 Km².

El área de estudio comprende las microcuencas que hicieron parte del evento fluviotorrencial del 31 de marzo el cual afectó gran parte del área urbana del municipio, las cuencas corresponden, a las quebradas San Antonio, Taruquita, Taruca, El Carmen y los ríos Sangoyaco y Mulato cubriendo un área total de 4.678 Ha (46,8Km²). (Figura 1).

La zona de estudio se caracteriza por presentar un cambio abrupto de pendientes con promedio entre 40°-50° al occidente y entre 3°-10° al oriente, con geformas que varían entre sierras estructurales, laderas suaves onduladas, abanicos fluviotorrenciales, llanuras de inundación, entre otras.

El sistema hidrográfico del área está constituido por tres quebradas y dos ríos que fluyen de occidente a oriente, estas corrientes nacen en la parte alta donde se encuentra el Monzogranito de Mocoa, para desembocar todas en el río Mocoa. La trayectoria de las quebradas y ríos presenta un fuerte control estructural acompañado de una gran disposición de sedimentos de diferentes eventos fluviotorrenciales localizados en la parte baja de las mismas.

El área de estudio abarca 11 veredas y los 52 barrios que conforman la zona urbana del municipio.

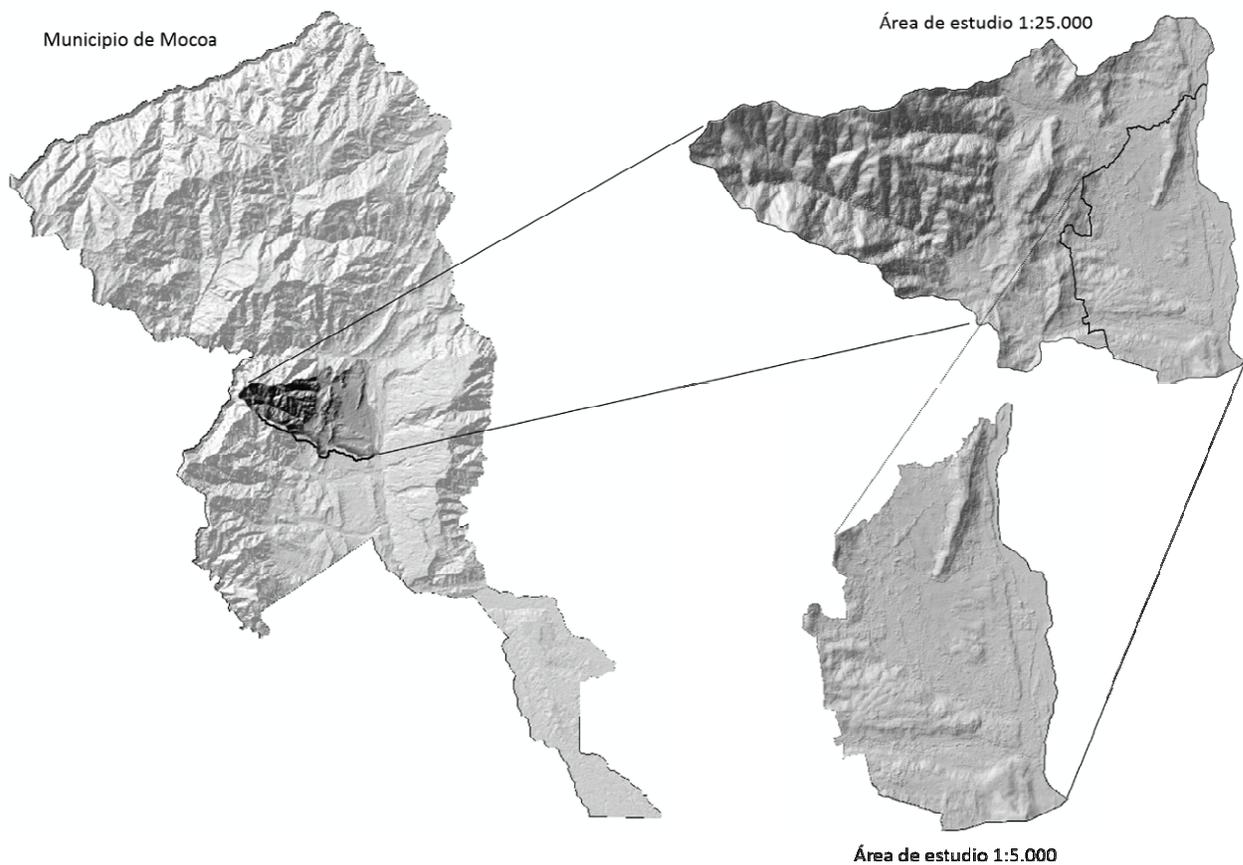


Figura 1. Área de estudio a escalas 25.000 y 5.000.

2.2 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL ESTUDIO.

El presente documento presenta los resultados de la modelación del mapa de amenaza por movimientos en masa tipo flujo, conocidos como avenidas torrenciales, para lo cual se realizó el cálculo de los hidrogramas de caudal líquido y sólido del evento del 31 de marzo de 2017 y los análisis morfométricos, geomorfológicos, geológico e hidrológico enfocados a conocer las características del área de estudio para generar la zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo en escala 1:5.000 (1.330 Ha).

La zonificación de amenaza por movimientos en masa tipo flujo se generó sobre un modelo digital del terreno, DTM GeoSAR, con resolución de 5 metros, el cual es uno de los insumos básicos requeridos por la herramienta FLO2D, utilizada para la modelación matemática. La base cartográfica donde se presentan los resultados de la zonificación se generó a partir de la cartografía 1:2.000 del área urbana entregada por el IGAC y del DTM GeoSAR 1:5.000, obteniendo un cubrimiento general que se ajusta con los resultados

obtenidos en la modelación. Toda la información cartográfica fue entregada al SGC por el IGAC en el marco de la Mesa Técnica Ambiental para la reconstrucción de Mocoa.

El DTM GeoSAR fue ajustado por el SGC con el uso de las secciones transversales levantadas por el SENA - Mocoa en los cauces de los ríos Sangoyaco, Mulato y quebrada Taruca, considerando que las condiciones de los drenajes fueron modificadas de manera importante después del evento y no permitían un ajuste adecuado tanto de la calibración como de la zonificación de amenazas por movimientos en masa tipo flujo.

Los hidrogramas básicos utilizados en el modelo calibrador fueron obtenidos a partir de la información de la página web (<http://hydras3.ideam.gov.co/LOGIN.HTM>) del IDEAM, entidad que igualmente entregó las series de registros pluviómetros para la construcción del análisis regional del comportamiento de la lluvia.

El documento integra un análisis multitemático que pretende explicar el comportamiento particular de la avenida torrencial en estudio, a partir de los índices morfométricos, geomorfología, geología y datos hidrológicos.

Por otra parte, la calibración del evento tiene como base el informe “CARACTERIZACIÓN DEL MOVIMIENTO EN MASA TIPO FLUJO DEL 31 DE MARZO DE 2017 EN MOCOA – PUTUMAYO” que permitió comparar resultados y ordenes de magnitud del evento, tales como caudales y área de afectación, siempre teniendo presente las limitantes cartográficas y de software.

Para la modelación matemática se utilizó el software FLO2D, que es una herramienta con dominio computacional estructurado y fondo del cauce fijo, lo que en este caso en particular se aleja de la realidad, ya que la socavación y removilización del material de lecho y ronda de las corrientes fue considerable.

Se debe considerar que el mapa de amenaza presentado en este documento está limitado a la intensidad del evento climático tanto como a su periodo de retorno y no a la evolución morfológica de las márgenes de las microcuencas y periodo de tiempo en el cual se presenta la depositación de material sobre los drenajes en las partes altas de las microcuencas.

Es importante aclarar que los hidrogramas contenidos en este documento podrán ser insumo directo para una futura zonificación de amenazas por movimientos en masa tipo flujo del área de estudio en escala 1:2.000, que depende exclusivamente de un DTM reciente que permita observar las condiciones actuales de los cauces y microcuencas objeto de estudio.

2.3 RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN SECUNDARIA.

2.3.1 Estudios previos.

- Estudios de amenaza de inundación con referencia a una máxima avenida de las quebradas Taruca y Conejo en el municipio de Mocoa, departamento del Putumayo, PI Ingeniería – Juan Diego Peña Pirazán (2016).
- PBOT municipio de Mocoa, 2000, 2002, 2003 y 2008.
- Plan de manejo y gestión de la microcuenca del río Mulato, CORPOAMAZONÍA (2009).
- Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa departamento del Putumayo, Omar Antonio Jojoa Chantre (2003).
- Análisis del cambio de cobertura y uso del suelo en los periodos 2002 - 2012 en el municipio de Mocoa, Universidad Nacional de Colombia (2015).
- Amenazas fluviales en el piedemonte amazónico colombiano, Universidad Nacional de Colombia, 2011.
- Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de las subcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa – Putumayo. escala 1:25.000. (SGC, 2017).
- Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo. (SGC, 2017).

El municipio de Mocoa ha llevado a cabo algunos estudios de evaluación de amenaza por movimientos en masas que abordan el tema de forma general con el enfoque geoambiental y han sido elaborados principalmente en el marco de los Planes de Ordenamiento Territorial del municipio desde el año 2000.

En el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del año 2000 (Acuerdo 036 del 2000) presenta un mapa de riesgos y amenazas del área urbana de Mocoa, escala 1:5.000, que incluye el riesgo por inundación y deslizamientos, amenazas por avenidas torrenciales, vulnerabilidad por erosión o deslizamientos y riesgos inducidos. Igualmente muestra el mapa de riesgo y amenazas para el área rural de Mocoa, escala 1:100.000, zonificado en categorías de riesgo alto, medio, bajo y riesgo inducido.

Así mismo, como parte del ajuste del Plan Básico del Ordenamiento Territorial (Acuerdo 013 del 2002) generó el mapa de amenazas ambientales en el área urbana, escala 1:5.000, que incluye sitios susceptibles a desbordamientos y deslizamientos, zonas de deslizamientos, cartografía de desbordamientos y deslizamientos, sitios con antecedentes de desbordamientos, sitios de inundación por obstrucción y áreas de contaminación por vertimientos y residuos sólidos. Donde muestra el mapa de riesgos hidrográficos para el área urbana de Mocoa, escala 1:5.000, que incluye las categorías de riesgo alto, medio,

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

bajo y amenaza antrópica, además incluye la cartografía histórica de las avenidas torrenciales en la zona.

El ajuste del Plan Básico del Ordenamiento Territorial del municipio de Mocoa en el año 2003 (PBOT, 2003) generó el mapa de amenazas por erosión del área rural, escala 1:50.000, incluyendo las categorías de erosión muy baja, baja, baja a moderada, moderada a alta, zonas potencialmente inestables y movimientos en masa (reptación, caídas de roca, flujos de lodo, deslizamientos) clasificándolos según su severidad o estado de actividad.

En la actualidad el municipio de Mocoa cuenta con un POT (Plan de Ordenamiento Territorial) del año 2008, en el cual se presentan las políticas y estrategias para el desarrollo municipal, tendientes a adecuar y organizar el municipio para el aprovechamiento de sus ventajas comparativas, garantizar la consecución de los propósitos de desarrollo económico y social y reorientar la ocupación, aprovechamiento y manejo del suelo y del conjunto de los recursos naturales en concordancia con el Artículo 12 de la Ley 388 de 1997 éste POT mantiene los estudios incluidos en el PBOT de 2003.

Por otra parte, el SGC en el marco del proyecto Mapa Nacional de Amenaza Relativa por Movimientos en Masa escala 1:100.000, generó los mapas de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de la Plancha 430-Mocoa con su respectiva memoria explicativa (SGC y UNAL, 2013). Como parte de los resultados el área urbana de Mocoa y la zona rural circundante se clasificó entre las categorías media y alta de susceptibilidad y alta y muy alta de amenaza por movimientos en masa.

2.4.2 Cartografía base y sensores remotos.

- DEM GEOSAR
Geos SAR es un sistema aerotransportado basado en una tecnología conocida como radar de apertura sintética (Synthetic Aperture Radar - SAR), permite obtener imágenes de radar y modelos digitales de elevación a partir de dos longitudes de onda (banda P y banda X). La longitud de onda de la banda P penetra tanto las nubes como el dosel de los árboles para determinar la elevación del terreno, las imágenes de esta banda poseen una resolución espacial de 5 metros. La longitud de onda de la banda X penetra las nubes y refleja el dosel de los árboles determinando la elevación de la superficie de la vegetación, las imágenes de esta banda poseen una resolución espacial de 3 metros.

Para el caso del área de estudio se contó con la banda X que representa el Modelo Digital del Terrreno (MDT), con un tamaño de pixel de 5 metros cuya fecha de procesamiento es del 24/09/2008 y publicación del 30/10/2008. Fue suministrada por el IGAC bajo lo establecido en el protocolo de la mesa técnica ambiental para la atención de la emergencia del 31 de marzo de 2017.

El MDT se ajustó con 215 secciones transversales topográficas entregadas por el SENA de Mocoa para tramos de interés sobre la quebrada Taruca (123) y río Sangoyaco (92), obteniendo un nuevo MDT con el que se realizaron las simulaciones finales para el mapa de amenaza por flujo de detritos, una vez calibrado el modelo hidráulico. (Figura 2).

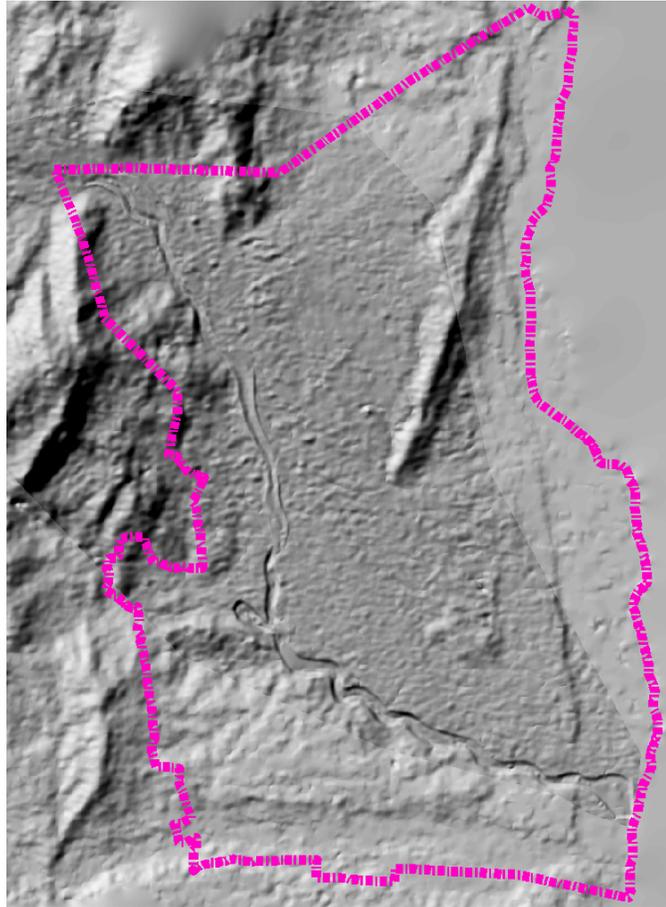


Figura 2. Modelo de sombras a partir del modelo digital de elevación GeoSAR, 5 metros de resolución espacial.

- Imágenes multiespectrales disponibles con baja cobertura de nubosidad: Landsat 7 30x30 (2002-2005-2008-2010), Landsat 8 30x30 (2013), Sentinel 2A 10x10 (2016); con base en estas imágenes y según la longitud de onda de cada una de las bandas se realizó la combinación “Color Infrarrojo”, Landsat7 4-3-2, Landsat8 5-4-3, Sentinel 2A 8-4-3.
- Cartografía base corresponde a las planchas IGAC 430IVB1a, 430IVB1b, 430IVB1c, 430IVB1f, 430IVB1g, 430IVB1h, 430IVB1k, 430IVB1l, 430IVB1m, 430IID3u, 430IID3v, 430IID3w, 430IID3q a escala 1:2.000, restituidas en el año 2013, escala 1:5.000. (Figura 3).

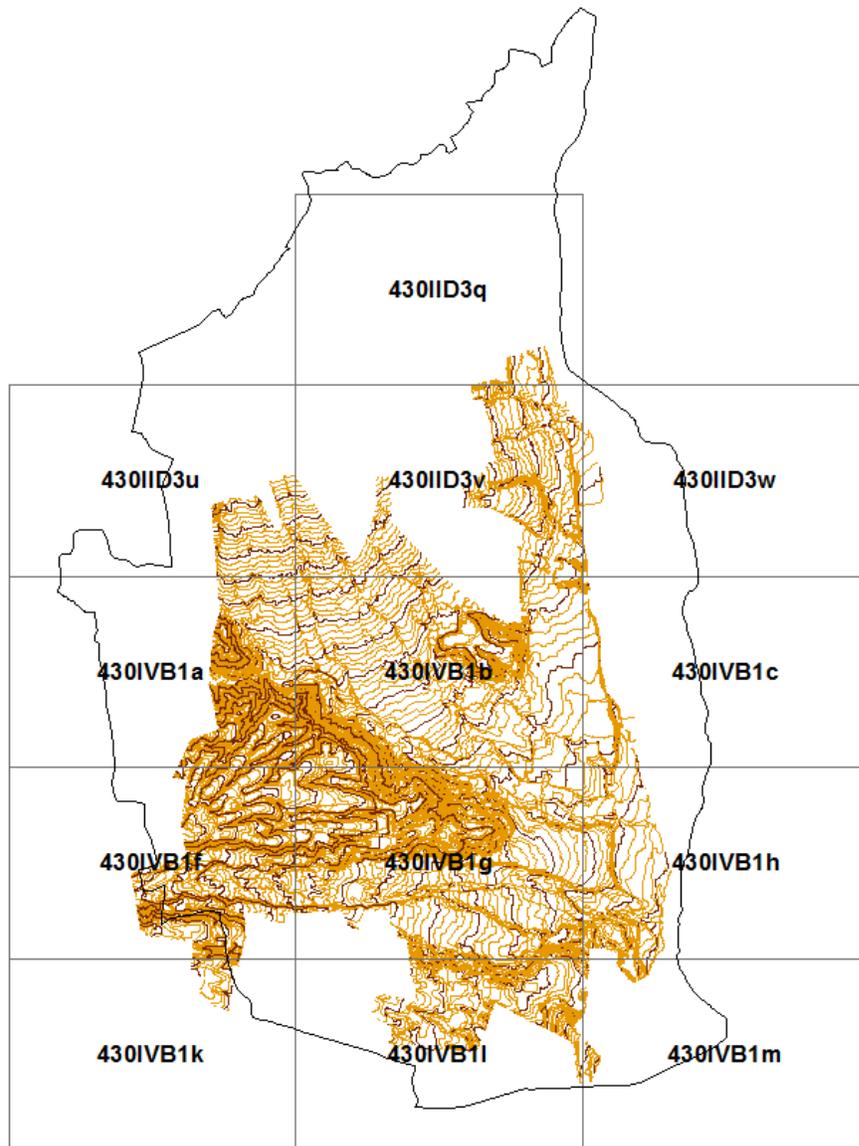


Figura 3. Planchas IGAC correspondientes al área de estudio.

- Imágenes multispectrales, ortofotomosaico 2008, 2013 y 4 de Abril de 2017 de alta resolución (0.2 m), adquirida por Geoespacial – Corpoamazonía (Figura 4) y las imágenes satelitales Digital Globe (posterior al evento).



Figura 4. Cubrimiento areal de la imagen de Geoespacial – CORPOAMAZONÍA del año 2017, escala 1:5.000.

Los registros históricos recientes de eventos fluviotorrenciales datan del año 1947 para el río Mulato y del año 1960 para la quebrada La Taruca, sin embargo, los depósitos sobre los cuales hoy se emplaza parte de la zona urbana del municipio de Mocoa corresponden a cientos de años. Según Jojoa (2003) y Robertson y Castiblanco (2011) la ocurrencia de por lo menos seis eventos en el río Mulato, tres en la quebrada Sangoyaco y tres en la quebrada Taruca desde 1947 han dejado en algunos casos víctimas, personas damnificadas y daños económicos, que se resumen en la Tabla 1. Los tipos de eventos referidos en la tabla corresponden a la descripción dada por el autor.

Tabla 1. Registro de los eventos fluvio-torrenciales que han afectado el casco urbano del municipio de Mocoa en los últimos 70 años.

Modificado de Jojoa (2003), Gómez (2014), Peña (2016). (*) Fuente: Ing. Guillermo Fajardo en reunión del 30 de junio de 2017, CORPOAMAZONÍA.

Tipo de evento	Fecha			Corriente	Daños	Observaciones	Precipitación (mm)
	Día	Mes	Año				
Avenida fluviotorrencial	12	6	1947*	Río Mulato	Pérdida de viviendas, animales domésticos y cultivos	Movimientos en masa en la parte alta de la microcuenca y represamiento	No hay registros
Flujo de lodo y escombros	10	12	1960*	Quebrada La Taruca	Muerte de tres personas y animales domésticos	Evento San Antonio o Pre-Mocoa	No hay registros
Avenida fluviotorrencial		5	1971	Río Mulato	Cinco viviendas con daños y pérdida de animales domésticos	Bocatoma del acueducto semi-destruida	No hay registros
Avenida torrencial y flujo de lodos			1972	Río Sangoyaco	Muerte de tres personas	La quebrada Sangoyaco rebasó el puente de la Avenida Colombia.	No hay registros
Avenida fluviotorrencial		2	1989	Ríos Mulato y Sangoyaco	Destrucción de cuatro viviendas en el barrio 4 de Julio, movimientos en masa detrás de la Caja Agraria	El río desbordo el muro de protección y corrió por la avenida 17 de Julio	En mes 199 mm generado con la estación Campucana. Max: 31.2 mm/24h
Avenida fluviotorrencial	24	5	1994	Quebrada La Taruca, ríos Sangoyaco y Mulato	Sectores inundados: plaza de mercado y barrios Miraflores, Pablo VI y Naranjito; destrucción parcial del puente peatonal sobre la quebrada Sangoyaco	Largos periodos de lluvia.	El día 25 - 91.2 mm/24h, el día 24 19.5 mm/24h. Verificar fecha evento

Tipo de evento	Fecha			Corriente	Daños	Observaciones	Precipitación (mm)
	Día	Mes	Año				
Avenida fluviotorrencial ***	22	11	1995	Quebrada La Taruca		Movimientos en masa, represamiento de la quebrada 2.5 mm/24h	2.5 mm/24 h
Flujo de ***escombros	17	6	1997	Río Mulato	Una niña muerta, una vivienda averiada, daños menores en viviendas	Periodo invernal. El río Mulato salió de su cauce y corría por la avenida 17 de Julio 50.2 mm/24h, 16 de junio 50 mm/42h	50.2 mm/24h
Avenida fluviotorrencial			1998	Ríos Mocoa, Sangoyaco, Mulato	Seis viviendas afectadas en el Estadero Caliyaco, seis viviendas en el barrio Las Américas	Altas precipitaciones, movimientos en masa, pérdidas económicas no cuantificables	
Avenida fluviotorrencial			2010	Río Mulato, Quebrada Taruca	Daños a viviendas e infraestructura. Transporte de material grueso, erosión lateral y colmatación de material en la zona media del cauce en la quebrada Taruca, Vereda San Antonio	Periodo invernal 2010	
Inundación	3	5	2011		Inundación de 5 viviendas	59 mm/24h el 2 de mayo 35 mm/24h	59 mm/24h
Movimiento en masa	15	5	2011		Pérdida de (1) vivienda	53.2 mm/24h el 14 de mayo 12.3 mm/24h	53.2 mm/24h
Movimientos en masa			2013	Barrio Palermo	Tres personas desaparecidas, cerca de cinco viviendas afectadas	Periodo invernal 2013	
Avenida torrencial	18	10	2014*	Quebrada Taruca		Remoción en masa	20 mm/24h

3.1 Análisis morfométrico

Los índices morfométricos son una herramienta que permite realizar la caracterización espacio temporal de las propiedades geométricas (morfo-métricas) de las cuencas hidrográficas y de las redes de drenaje: Estos índices son útiles para identificar áreas que experimentan rápida deformación tectónica. Se calculan a partir de información topográfica, fotografías aéreas e imágenes de satélite y modelos digitales de elevación (DEM), (Keller y Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

En general el análisis detallado de los índices morfométricos y/o geomorfológicos, se pueden correlacionar con un mapeo morfotectónico detallado de un área específica de estudio para delimitar zonas activas con una muy buena correlación.

La delimitación de la cuenca del río Mocoa y la construcción de su red de drenaje se realizó mediante la utilización del DEM de resolución de 5 m., generando el área total ocupada y el perímetro de la misma. De igual manera se obtuvo el sistema de drenaje, calculando distancias, midiendo longitudes tanto del cauce principal como de los afluentes y parámetros de elevaciones, tanto del punto más alejado del cauce, como el punto de la salida del mismo y el promedio. (Figura 6).

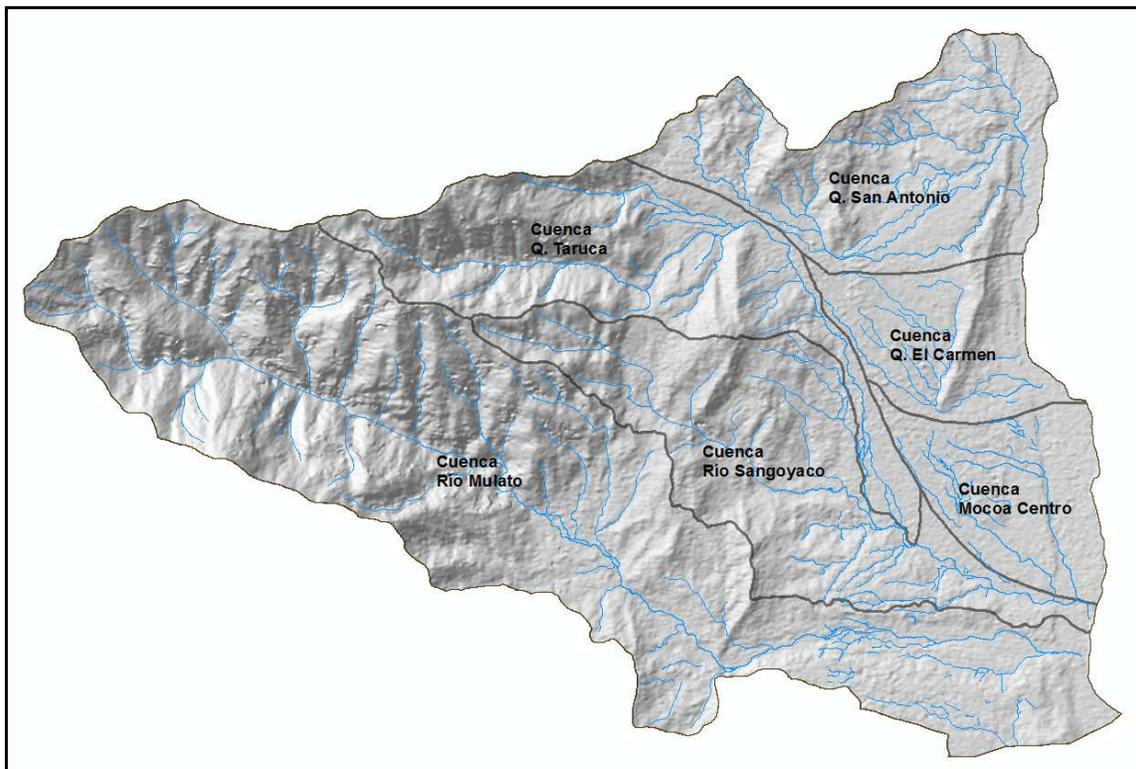


Figura 6. Cuencas de la zona de estudio asociadas con evento del 31 de marzo de 2017.

Para comprender e interpretar el comportamiento morfo-dinámico e hidrológico de las sub-cuencas hidrográficas involucradas en el evento catastrófico del 31 de marzo de 2017, se analizaron seis (6) índices morfométricos: Sinuosidad del Frente Montañoso (Smf), Hipsometría de la cuenca de drenaje (Curva Hipsométrica (CH) e integral Hipsométrica (IH), Factor de asimetría de la cuenca (FA), Relación ancho del piso y altura del Valle (Vf), Gradiente del perfil longitudinal del cauce del río (Sl) y forma de las cuencas y subcuencas (Bs), los cuales permiten detectar la presencia de deformaciones tectónicas actuales, asociadas con el evento.

3.1.1 Sinuosidad del frente de montaña (S_{mf}).

La sinuosidad del frente de montaña se define como:

$$S_{mf} = \left(\frac{L_{mf}}{L_s} \right) \quad (1)$$

Donde (S_{mf}) es la sinuosidad del frente de montaña; (L_{mf}) es el largo del frente de montaña a lo largo del pie de la montaña, y el quiebre pronunciado en pendiente; y (L_s) es la línea recta al frente de montaña. (Figura 7).

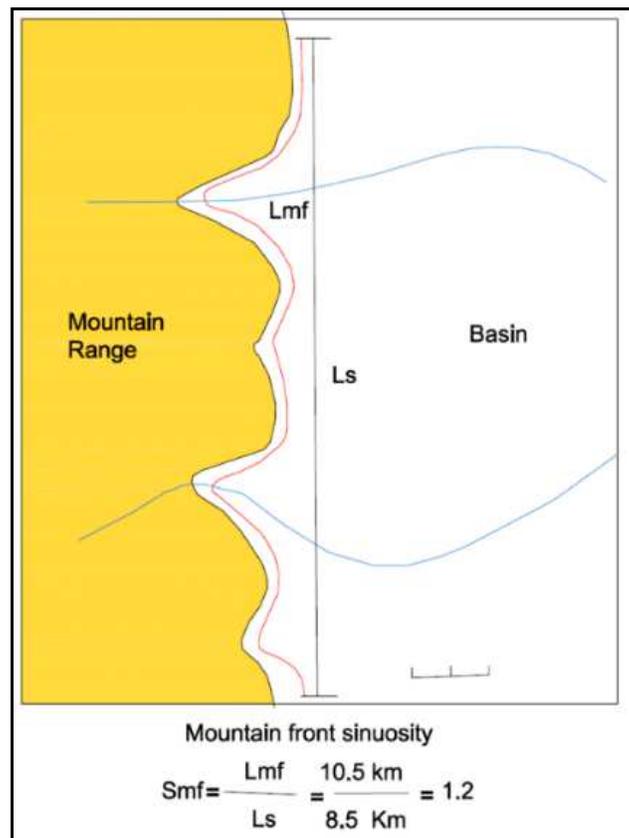


Figura 7. Diagrama idealizado mostrando cómo se calcula el índice de sinuosidad de frente de montaña (S_{mf}).

(Modificado de Keller y Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

La sinuosidad del frente de montaña refleja el balance entre las fuerzas erosivas que tienden a cortar en bahías dentro del frente de montaña y las fuerzas tectónicas que tienden a producir un frente recto coincidente con una falla activa de frente montañoso. Los frentes montañosos con tectónica activa y levantamiento son relativamente rectos, con bajos valores de S_{mf} . Si la tasa de levantamiento es baja cesa el levantamiento entonces los procesos erosionales deberían labrar un frente de montaña irregular (Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

El grado de actividad del frente montañoso se clasifica en los siguientes rangos (Keller & Pinter, 1996 en Cuellar, 2014):

Activo: 1.0 – 1.6,

Poco activo: 1.4 – 3.0 e

Inactivo: 1.8 – >5

Según Bull and McFadden, 1977, en Cuellar, 2014: Activo: 1.2 – 1.6, se asocian a abanicos aluviales atrincherados, cuencas de drenaje elongadas, valles de piso estrecho y vertientes empinadas. Poco activo: 1.8 – 3.4, se asocian a abanicos aluviales atrincherados, grandes cuencas de drenaje, vertientes empinadas y valles de pisos amplios. Inactivo: 2 – 7, se relacionan con frentes montañosos con bahías, asociados con vertientes empinadas únicamente en estratos recientes y bajo desarrollo de sistemas de drenaje.

En la Figura 8, se presenta los valores del índice de sinuosidad del frente montañoso, para las subcuencas de la zona de estudio.

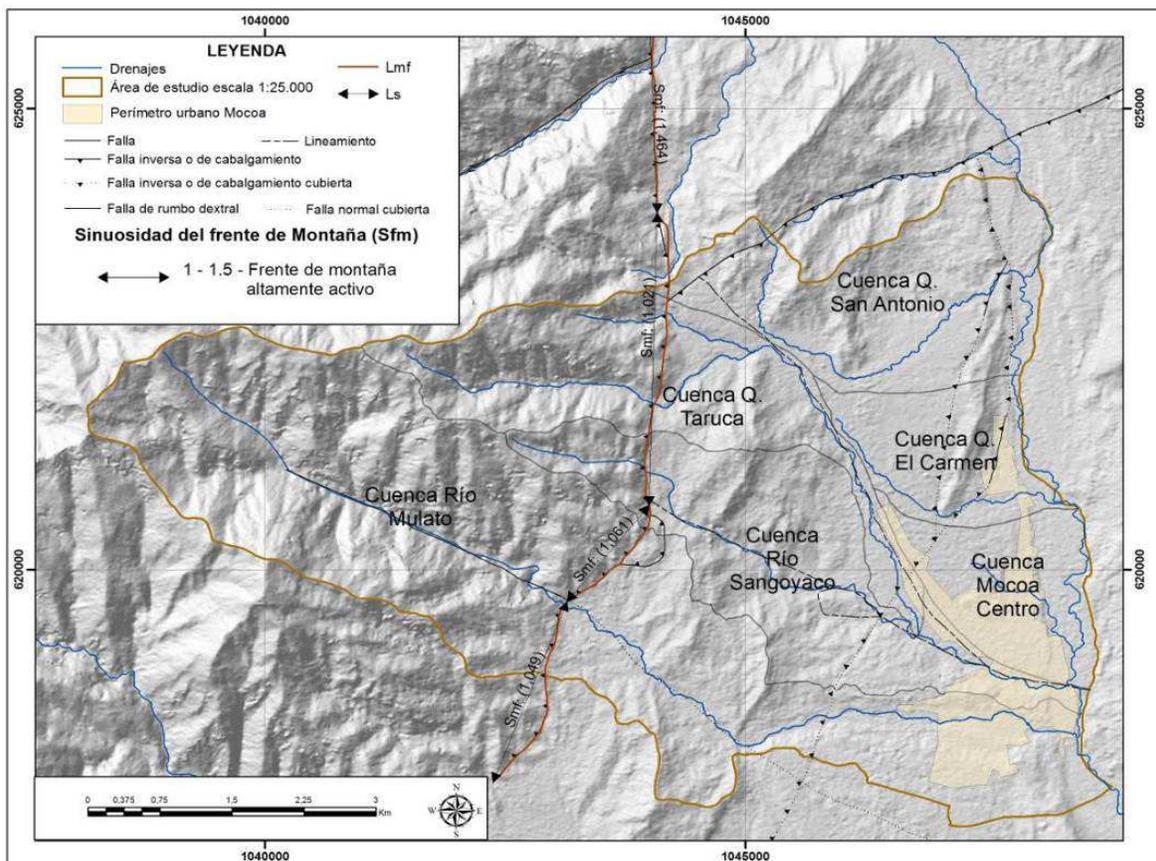


Figura 8. Índice de sinuosidad del frente montañoso asociado a la Falla Mocoa-La Tebaida.

Los resultados de este índice cuantifican la proximidad del frente a una morfología rectilínea, que está asociado a la Falla Mocoa –La Tebaida, con valores muy cercanos a 1, que representan un frente altamente activo. Al sur del río Mulato (1.049), entre el río Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

Mulato y Sangoyaco (1.061), entre el río Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita (1.021) y al norte de la quebrada Conejoyaco (1.464). Se concluye entonces, que la falla Mocoa – La Tebaida es activa que al actuar da lugar a este frente aproximadamente recto, que se hará más sinuoso a medida que pase el tiempo debido a la erosión que sufre.

En este frente montañoso se presenta el contacto del intrusivo Monzogranito de Mocoa con las lodolitas, areniscas y conglomerados de las formaciones Orito y Pepino respectivamente. En este frente vienen encajados los ríos Mulato y Sangoyaco y las quebradas Taruca y Taruquita. Justo a la salida de su frente, en el quiebre de pendiente se generan los depósitos fluviotorrenciales que han afectado y afectan a la población de Mocoa. Con los datos anteriores, el frente más activo es el que se encuentra entre el río Sangoyaco y la quebrada Taruquita, donde se presentó el evento catastrófico del 31 de Marzo de 2017.

3.1.2 Curva hipsométrica (IH).

La curva hipsométrica describe en una cuenca de drenaje la distribución de las elevaciones a través de un área de terreno, (Keller & Pinter, 1996, en Oviedo, 2015). Esta curva presenta la relación entre el área de la superficie dentro de la cuenca por encima de una elevación dada (a) y área total de la cuenca (A) y la proporción entre la altura relacionada a la superficie a (h) y la altura total de la cuenca (H) (Figura 9).

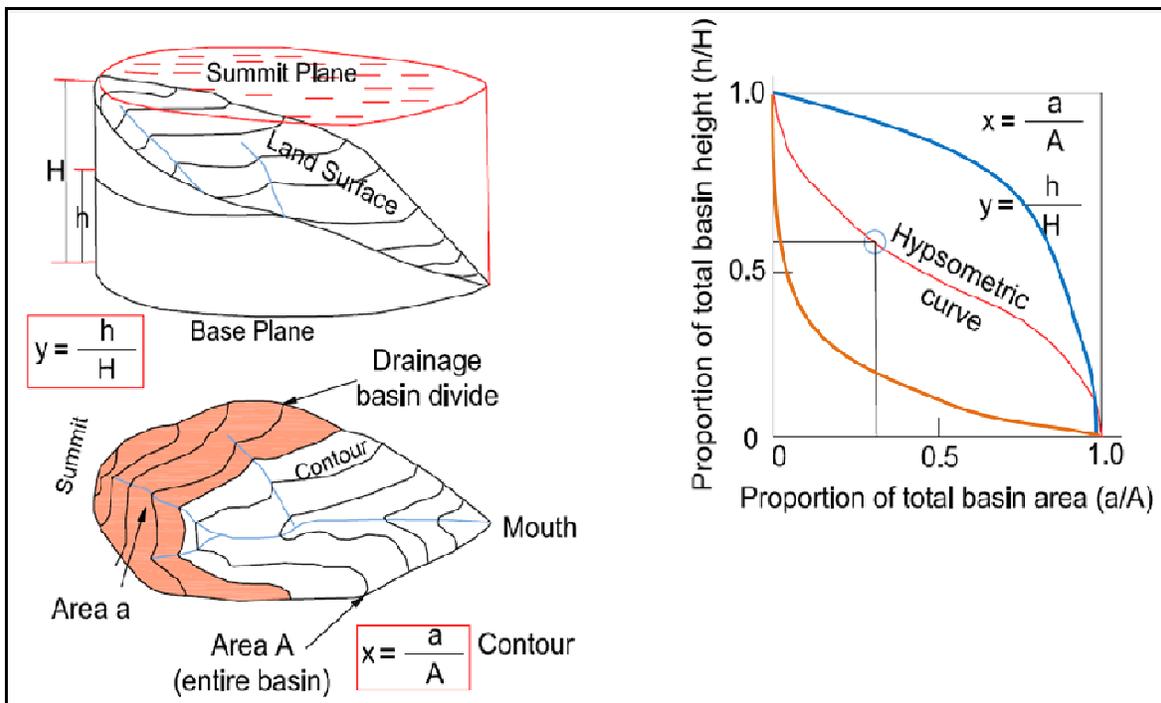


Figura 9. Relación y parámetros de la Curva hipsométrica e integral hipsométrica. (Keller& Pinter, 1996, modificado por Oviedo, 2015).

Con la curva hipsométrica se determina el estado del relieve a partir del análisis individual de los drenajes y sus cuencas: joven, maduro o viejo.

Los valores de los parámetros de la curva hipsométrica van de 0 a 1. Se representan los tres posibles estados del relieve: joven (curva convexa azul), maduro (curva en S roja) y viejo o senil (curva cóncava naranja). (Oviedo, 2015).

Un atributo de la curva hipsométrica es su independencia de las diferencias en el tamaño de la cuenca y el relieve porque el área y la elevación se grafican como funciones del área total y elevación total. Por esto cuencas de drenaje de diferentes tamaños pueden compararse unas con otras.

Como este método se centra en la evaluación de la cuenca como unidad fundamental del paisaje, mediante la identificación de los ajustes que realiza dependiendo de fuerzas tectónicas, procesos climáticos y erosivos, permite un análisis volumétrico y de compensación de áreas. El análisis consiste en comparar la curva calculada contra una curva teórica que refleja una cuenca en equilibrio, de tal forma que los desajustes indicarán puntos de inflexión donde el sistema está en desequilibrio por algún fenómeno tectónico o erosivo (Cuellar, et al, 2014).

Para determinar este índice de hipsometría de las cuencas, la zona se dividió en dos bloques limitados por la Falla Mocoa-La Tebaida.

Para las cuencas del área de estudio se analizaron las similitudes y convergencias en los aspectos hipsométricos que se relacionan con el dominio de los diversos procesos tectónicos de la zona. De igual manera, se interpretó el valor de la integral hipsométrica (IH), la cual es un índice del ciclo de erosión del paisaje. Valores altos indican relieve juvenil (0.6 -1.0), producto de levantamientos tectónicos, valores intermedios (0.35 -0.60) sugieren un relieve maduro donde existe un equilibrio entre el levantamiento tectónico y la disección de los drenajes y valores bajos (0 -0.35), muestra una cuenca sedimentaria envejecida, con un relieve muy tenue cerca de su nivel base, donde se presenta baja capacidad de carga en la dinámica fluvial. Se sugiere también etapas de transición, con curvas similares a la de la etapa de vejez, pero que incluyen prominencias topográficas que al ser erosionadas permiten caracterizar dichas zonas como áreas de relieve maduro (Strahler, 1952, en Cuellar, et al, 2014).

En la zona de estudio, Las curvas hipsométricas obtenidas presentan una forma general de "S", la cual inicia con una superficie cóncava en la parte superior que pasa a un segmento plano y termina con una forma convexa en su sección inferior. Presentan forma cóncava con valores para la curva integral hipsométrica de 0.27 a 0.36, por su parte Taruca, El Carmen y Mulato tienen forma de S cuyos valores oscilan entre 0.36 y 0.56. Estos valores obtenidos significan que las cuencas Taruca alta y Baja, Sangoyaco alta, El Carmen y Mulato son cuencas con un relieve maduro, donde existe un equilibrio entre el levantamiento tectónico y la incisión de los drenajes: Los procesos de agradación y

degradación tienden al equilibrio, aunque aún queda un área por erosionarse en la parte alta de la cuenca.

Las curvas de la quebrada San Antonio y del río Mocoa Centro presentan un relieve senil, donde el área de la cuenca se concentra en las partes bajas ya que la fase del drenaje se encuentra en la zona plana. La relación sedimentación es mayor que la erosión. La cuenca de la quebrada San Antonio podría estar experimentando una fase de transición a una cuenca madura, debido a que incluye las prominencias topográficas al noroeste de la formación Pepino.

En la Figura 10 se muestra el resultado de aplicar la metodología a las microcuencas del área de estudio, definiendo que las microcuencas de San Antonio y Mocoa Centro se comportan como cuencas cóncavas con datos de IH de 0.33 a 0.29 respectivamente. El material erosionado que viene de las partes altas ya ha sido depositado en esta zona. Las cuencas de los ríos Sangoyaco y Mulato y la quebrada Taruca son cuencas maduras o modernas, con valores IH de 0.44 a 0.56 que concuerdan muy bien y se relacionan con cuencas cóncavas.

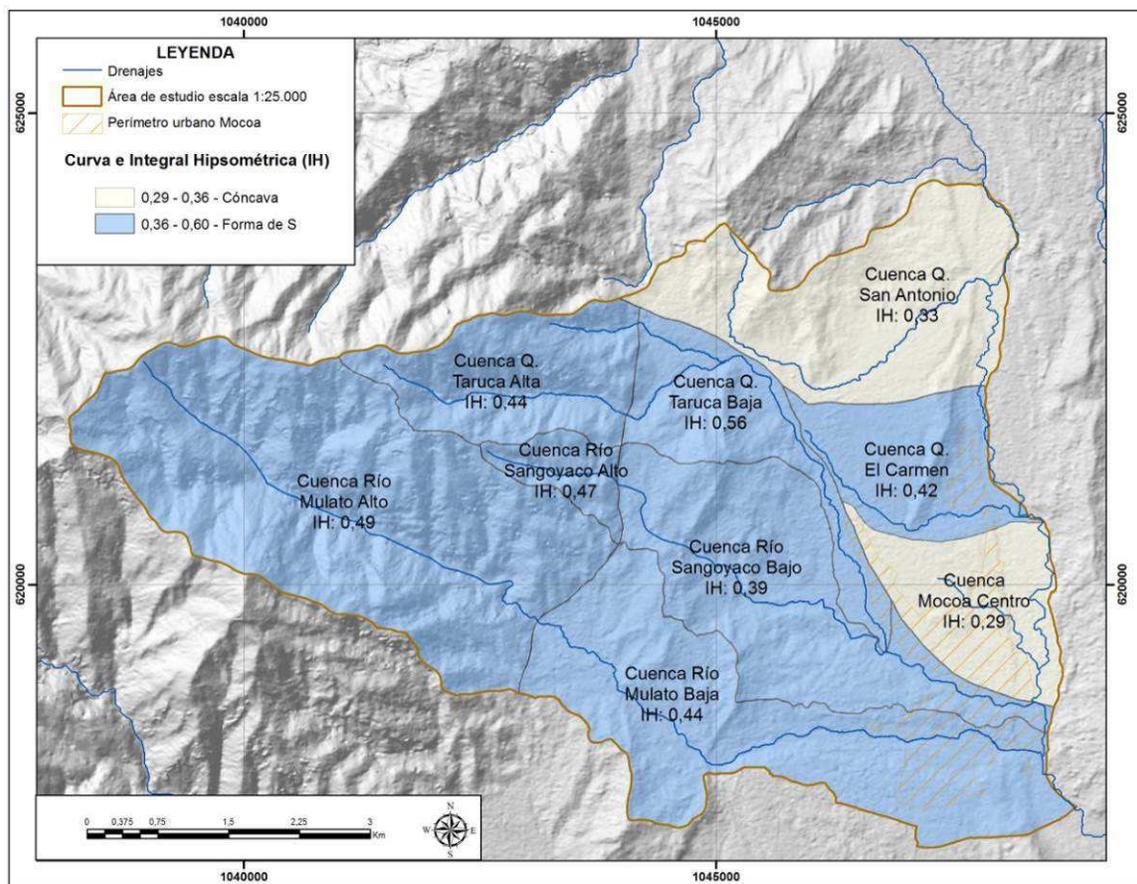


Figura 10. Valor de integral hipsométrica (IH), en las cuencas de la zona de estudio.

3.1.3 Curva hipsométrica Quebrada San Antonio.

La curva hipsométrica muestra que la dinámica de esta microcuenca se encuentra en etapa de vejez o senil, con un paisaje cerca de su nivel base, con un relieve bajo o tenue (Figura 11).

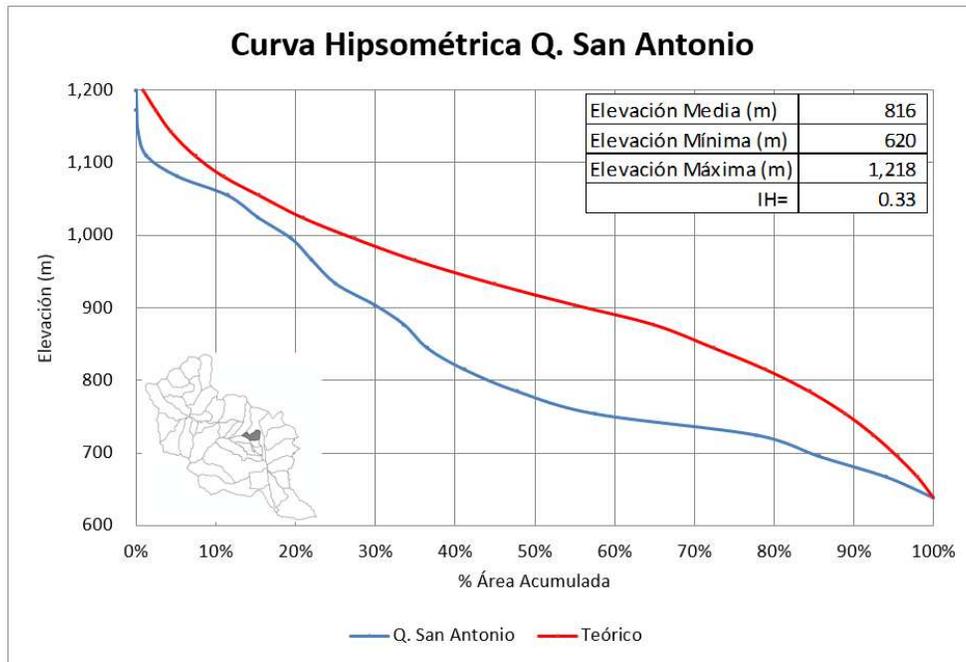


Figura 11. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca de la quebrada San Antonio.

Esta curva muestra que la quebrada San Antonio comienza aproximadamente a 1.200 m y su nivel base llega a 650 m. La curva se localiza por debajo de la curva teórica. Se registra un punto de inflexión alrededor de 850 m en un porcentaje de área acumulada del 35%.

3.1.4 Curva hipsométrica río Sangoyaco.

La curva hipsométrica muestra que la dinámica de esta microcuenca en la parte alta del bloque occidental limitado por la falla Mocoa- La Tebaida, es en forma de "S" que indica un relieve maduro y la curva de Sangoyaco de la parte baja que representa un relieve viejo o senil con un paisaje cerca de su nivel base, con un relieve bajo o tenue. (Figura 12 y 13).

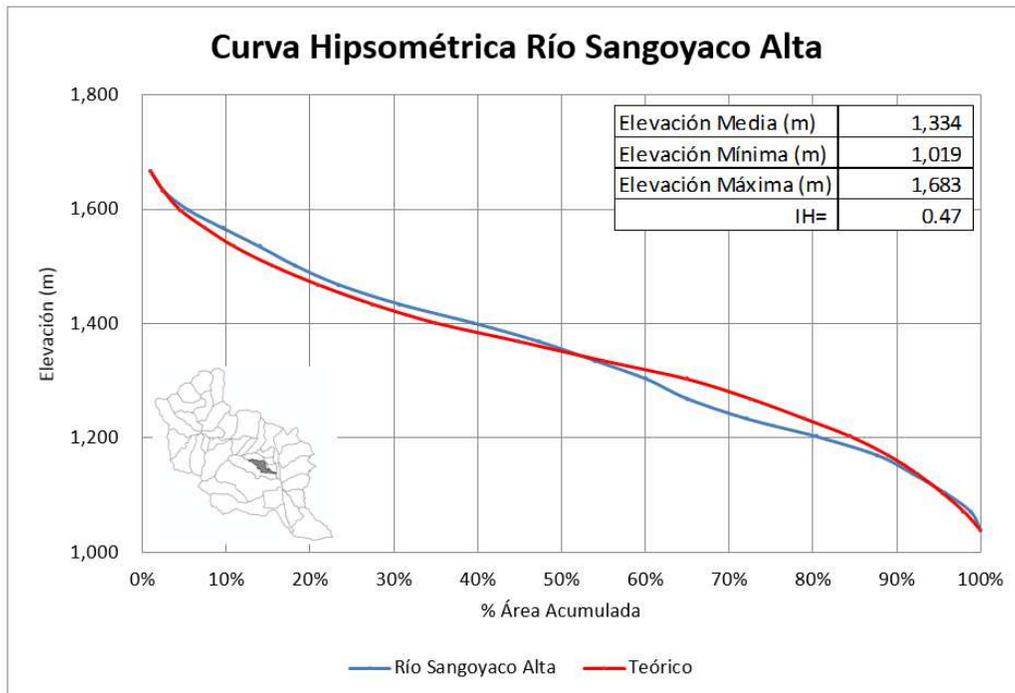


Figura 12. Valor de Curvas hipsométricas de la cuenca de la parte alta del río Sangoyaco.

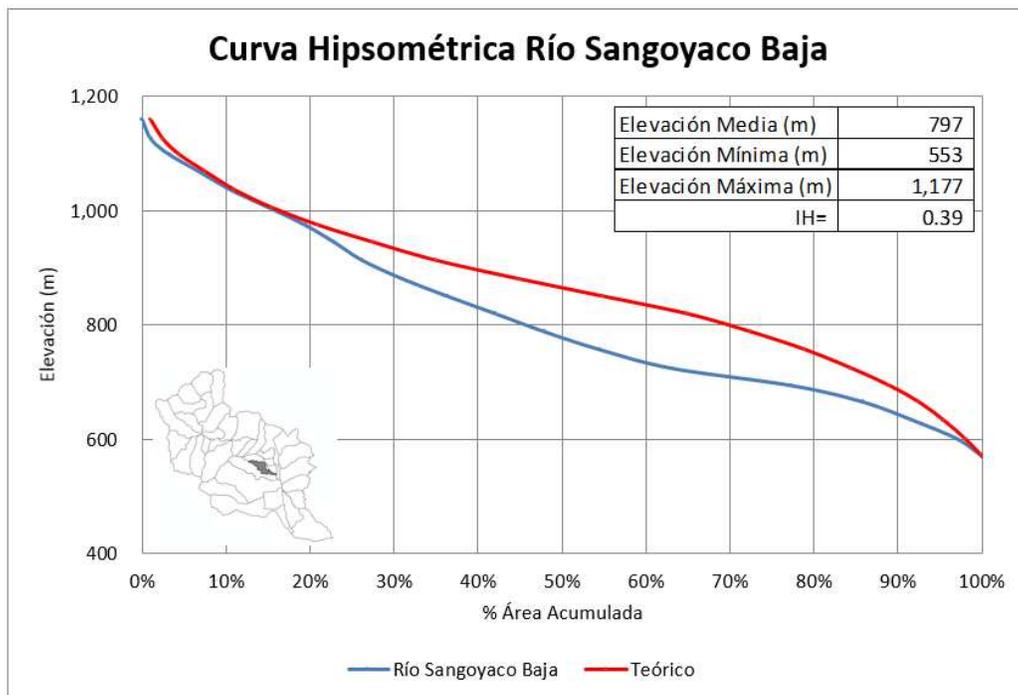


Figura 13. Valor de Curvas hipsométricas de la cuenca de la parte baja del río Sangoyaco.

La curva hipsométrica del río Sangoyaco tanto en su parte alta como baja, muestra que el río Sangoyaco, comienza aproximadamente a 1.650 m y su nivel base llega a 600 m. La curva en la parte alta de la cuenca (bloque occidental limitado por la falla Mocoa-La Tebaida), presenta forma de “S”, dando forma convexa hasta su punto de inflexión en

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

1.350 m aproximadamente, zona que se está erosionando y se compensa con la deposición de estos mismos materiales en la misma cuenca alta hasta llegar al punto de inflexión de 1.100 m que coincide con el trazo de la falla Mocoa- La Tebaida. Lo anterior se analiza con un relieve maduro que se compensa en la misma cuenca alta. En la cuenca baja del río Sangoyaco la curva hipsométrica se localiza por debajo de la curva teórica. Se registra un punto de inflexión alrededor de 880 m en un porcentaje de área acumulada del 22%, que coincide con el cambio litológico entre los miembros de la formación Pepino.

3.1.5 Curva hipsométrica Taruca.

La curva hipsométrica de la cuenca de la Quebrada Taruca nos muestra que la cuenca se comporta como madura, donde existe equilibrio entre los procesos erosivos y de deposición, en la parte alta del bloque occidental limitado por la falla Mocoa- La Tebaida, y en la parte baja del mismo en el bloque oriental. (Figura 14 y 15).

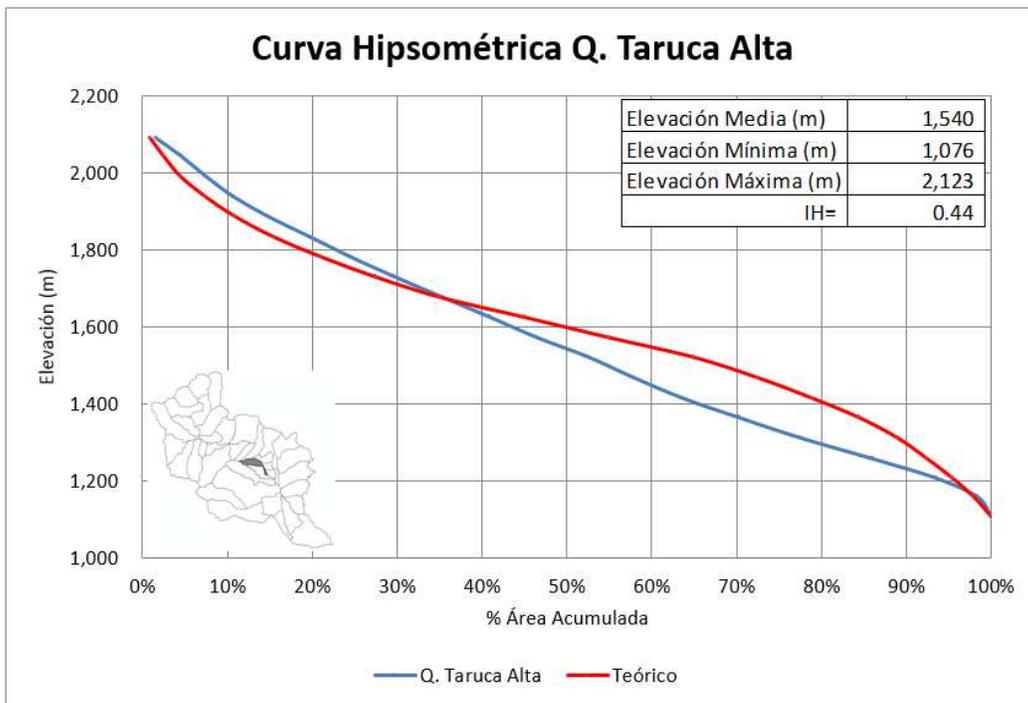


Figura 14. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte alta de la quebrada Taruca.

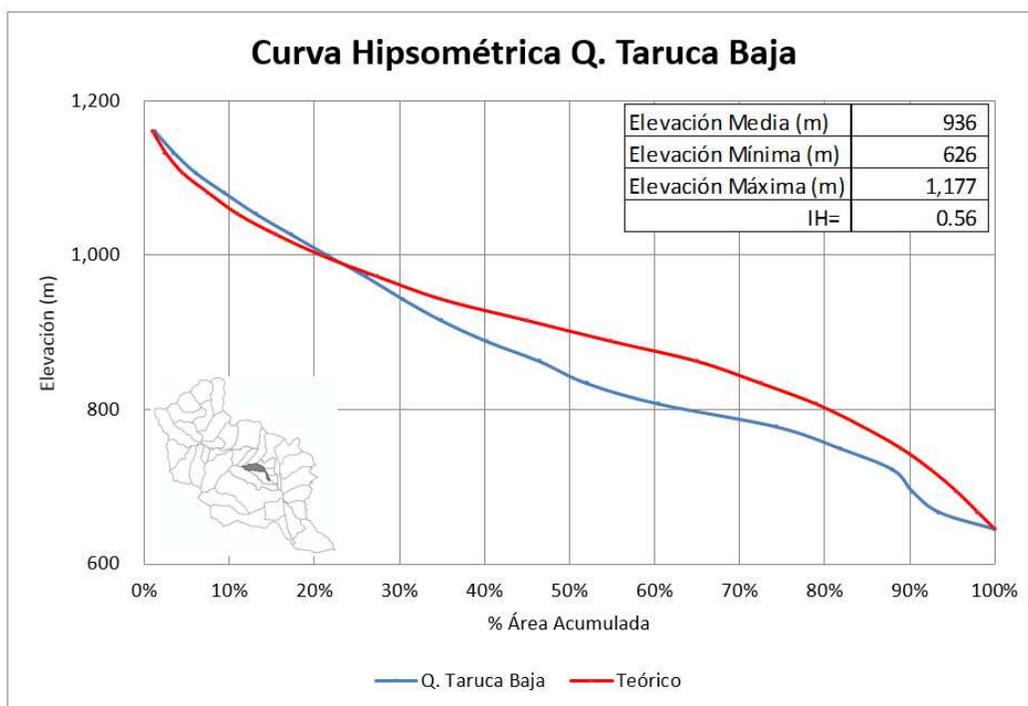


Figura 15. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte baja de la quebrada Taruca.

La curva hipsométrica de la quebrada Taruca, tanto en su parte alta como baja, muestra que la q. taruca, comienza aproximadamente a 2.100 m y su nivel base llega a 750 m. La curva en la parte alta de la cuenca (bloque occidental limitado por la falla Mocoa-La Tebaida), presenta forma de “S”, dando forma convexa hasta su punto de inflexión en 1.600 m aproximadamente, zona que se está erosionando y se compensa con la deposición de estos mismos materiales en la misma cuenca alta hasta llegar al punto de inflexión de 1.150 m que coincide con el trazo de la falla Mocoa- La Tebaida. Lo anterior se analiza con un relieve maduro que se compensa en la misma cuenca alta. En la cuenca baja de la quebrada Taruca la curva hipsométrica sigue presentando forma de “S”, con una zona por encima de la curva teórica que aporta material erosionable y en el punto de inflexión alrededor de 1.000 m en un porcentaje de área acumulada del 20%, la curva se registra por debajo de la curva teórica, lo que significa que todo este material disponible ya se ha depositado hasta su nivel base.

3.1.6 Curva hipsométrica Mulato.

La curva hipsométrica de la Cuenca del río Mulato, nos muestra que la cuenca se comporta como madura, donde existe equilibrio entre los procesos erosivos y de deposición (Figura 16 y 17).

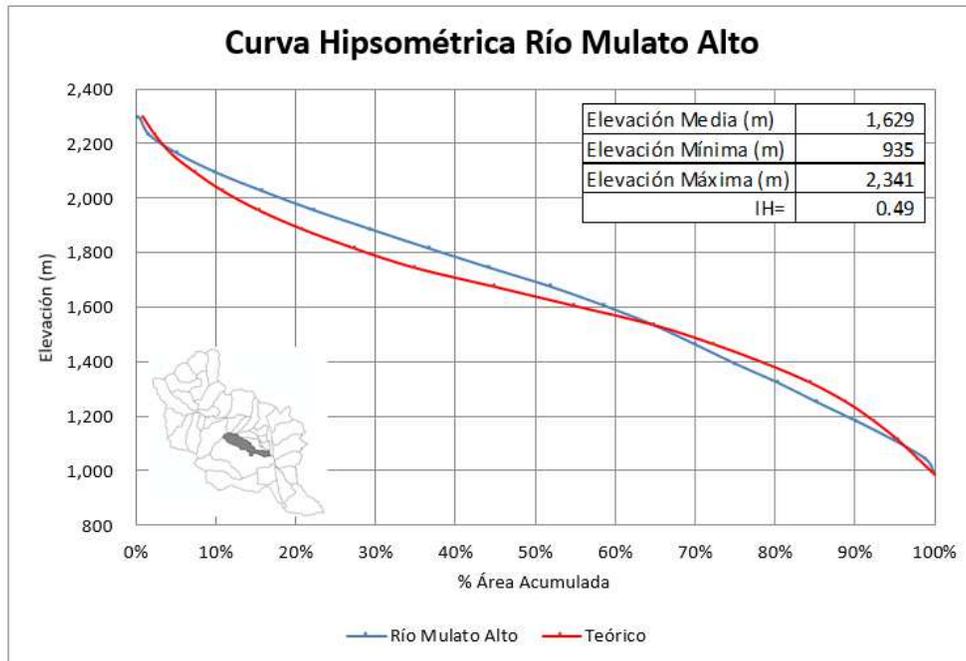


Figura 16. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte alta del río Mulato.

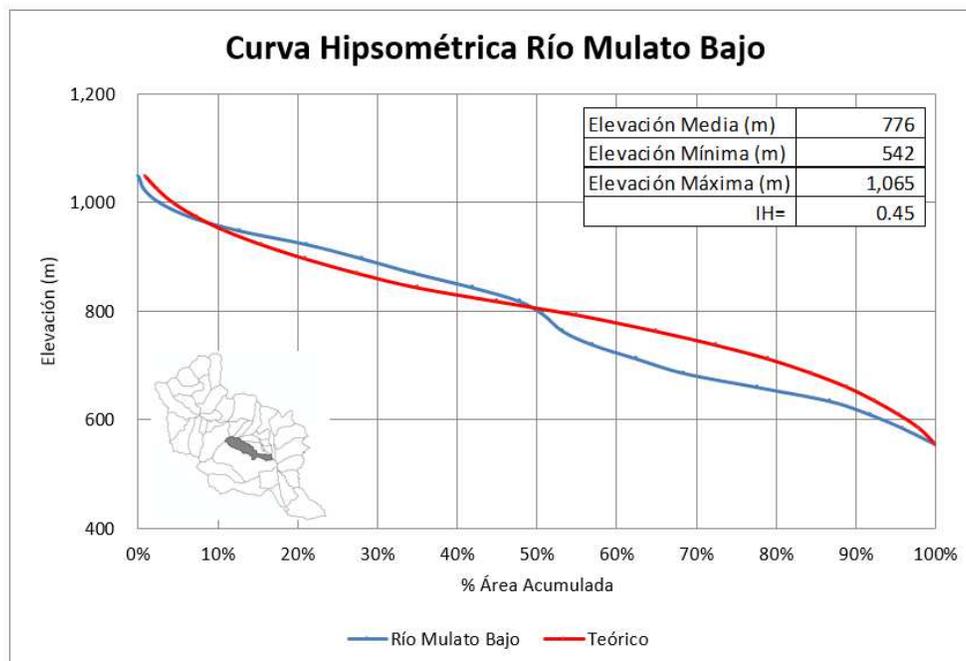


Figura 17. Valor de Curva hipsométrica de la cuenca de la parte baja del río Mulato.

La curva hipsométrica del río Mulato, tanto en su parte alta como baja, muestra que el río Mulato, comienza aproximadamente a 2.300 m y su nivel base llega a 550 m. La curva en la parte alta de la cuenca (bloque occidental limitado por la falla Mocoa-La Tebaida), presenta forma de "S", dando forma convexa hasta su punto de inflexión en 1.600 m aproximadamente, zona que se está erosionando y se compensa con la deposición de estos mismos materiales en la misma cuenca alta hasta llegar al punto de inflexión de

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

1.000 m que coincide con el trazo de la falla Mocoa- La Tebaida. Lo anterior se analiza con un relieve maduro que se compensa en la misma cuenca alta. En la cuenca baja del río Mulato, la curva hipsométrica sigue presentando forma de “S”, con una zona por encima de la curva teórica que aporta material erosionable y en el punto de inflexión alrededor de 800 m en un porcentaje de área acumulada del 50%, la curva se registra por debajo de la curva teórica, lo que significa que todo este material ya se ha depositado hasta su nivel base.

3.1.7 Curva hipsométrica El Carmen.

La curva hipsométrica de la Microcuenca de la quebrada El Carmen, muestra que la dinámica de la misma se encuentra en etapa de vejez o senil, con un paisaje cerca de su nivel base, con un relieve bajo o tenue. (Figura 18).

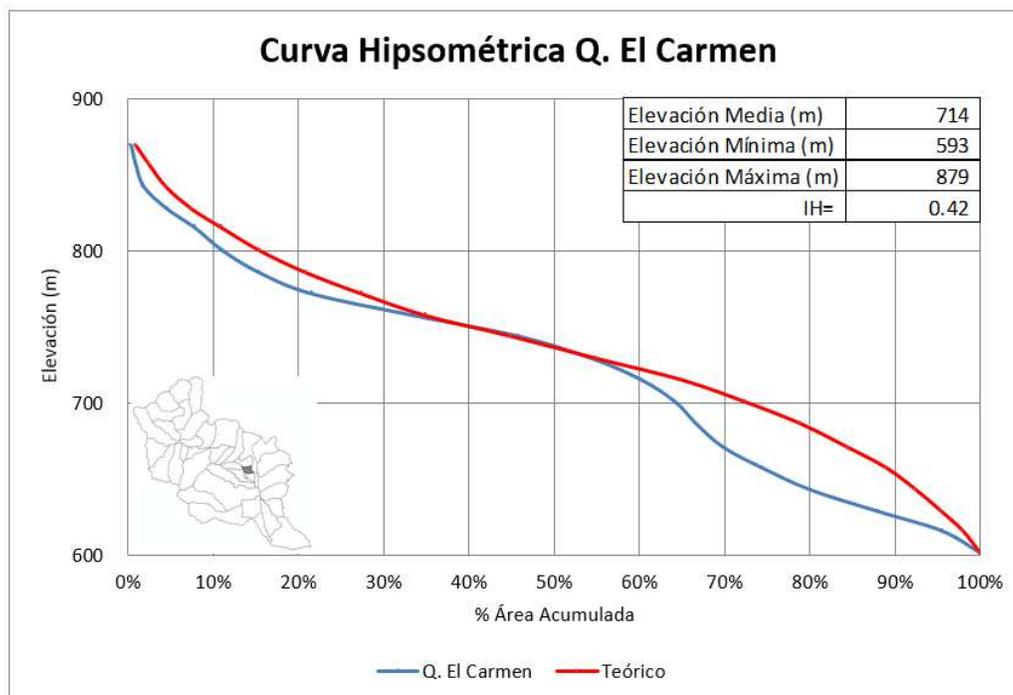


Figura 18. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca de la quebrada El Carmen.

Esta curva muestra que la quebrada El Carmen comienza aproximadamente a 880 m y su nivel base llega a 600 m. La curva se localiza por debajo de la curva teórica. Se registra un punto de inflexión alrededor de 700 m en un porcentaje de área acumulada del 65%.

3.1.8 Curva hipsométrica Mocoa Centro.

La curva hipsométrica de la Microcuenca Mocoa Centro, muestra que la dinámica de la misma se encuentra en etapa de vejez o senil, con un paisaje cerca de su nivel base, con un relieve bajo o tenue. (Figura 19).

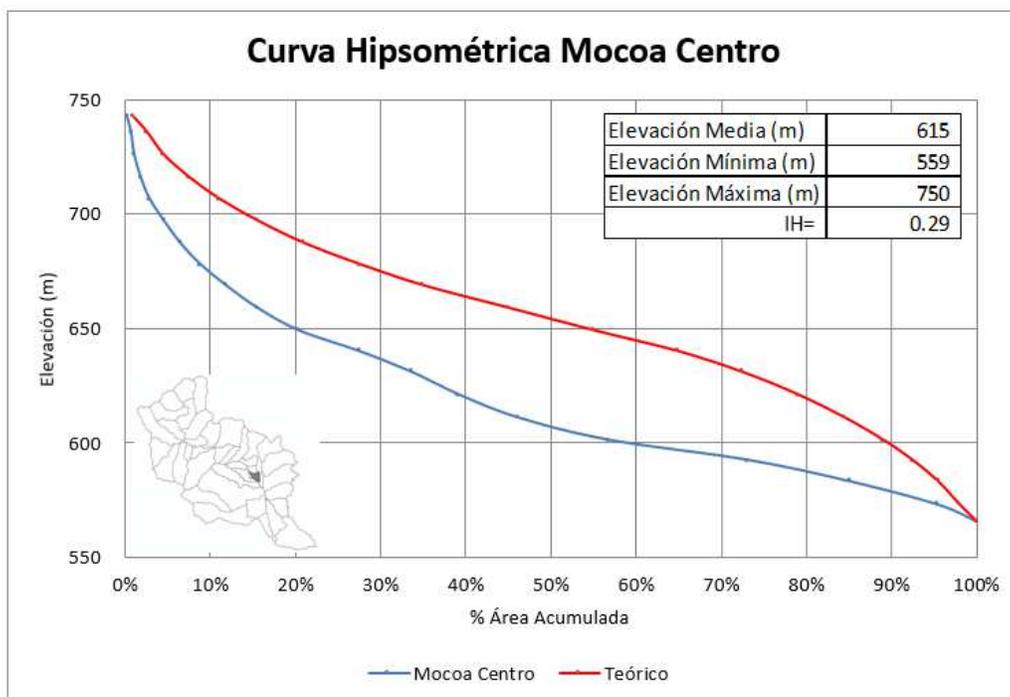


Figura 19. Valor de Curva hipsométrica en la cuenca Mocoa Centro.

Esta curva de la cuenca Mocoa Centro (drenajes canalizados en la ciudad), comienza aproximadamente a 740 m y su nivel base llega a 565 m. La curva se localiza por debajo de la curva teórica.

En la Figura 20 se presentan las curvas hipsométricas normalizadas de las cuencas con el fin de compararlas y analizarlas. En esta gráfica se resalta el comportamiento de cuencas seniles de las cuencas de la parte baja como Mocoa centro, San Antonio, Sangoyaco bajo, Taruca baja, mulato bajo, el Carmen, que se encuentran por debajo de la cuenca teórica, donde el material proveniente de las partes altas ya se ha depositado. Mientras que las cuencas Taruca alta, Sangoyaco alto y mulato alto presentan curvas maduras, que en su parte inicial se presentan por encima de la cuenca teórica y en su parte final, se ha depositado parte de este material y que aún queda material por erosionarse y depositarse en eventos futuros como el sucedido el 31 de marzo de 2017.

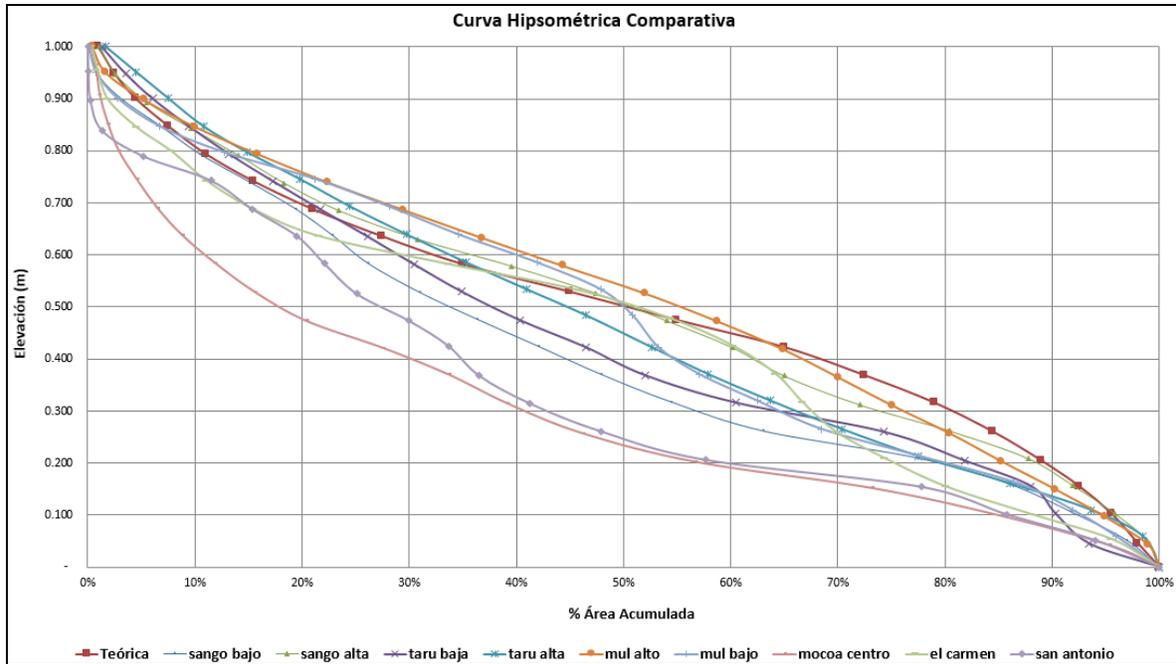


Figura 20. Valor de Curva hipsométrica normalizada para las cuencas.
La curva teórica se resalta en rojo.

3.1.9 Factor de Asimetría Normalizado (AF).

El factor de asimetría fue desarrollado para detectar basculamientos tectónicos perpendiculares a la dirección del drenaje principal, sobre cuencas de drenaje en áreas extensas (Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015). El factor de asimetría se calcula por la relación:

$$AF = 100 \times \left(\frac{Ar}{At} \right) \quad (2)$$

Donde, Ar es el área de la cuenca hacia la derecha del río aguas abajo y At es el área total de la cuenca. Si el índice AF es igual a 50, se trata de una cuenca simétrica, sin basculamiento, si el índice AF es mayor o menor de 50 sugiere un basculamiento de la cuenca (Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015). (Figura 21).

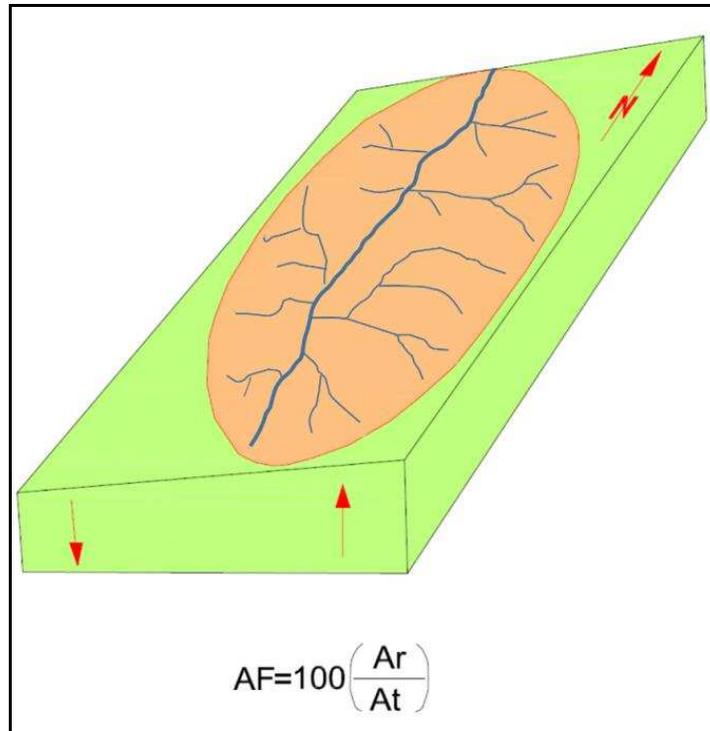


Figura 21. Factor de asimetría y su significado tectónico.
(Modificado de Keller y Pinter, 2002, en Oviedo, 2015)

En el diagrama se observa que los drenajes de mayor longitud se encuentran en la parte de la cuenca levantada, en la parte oriental, lo que expresa el basculamiento de la red. (Oviedo, 2015).

Las áreas utilizadas para el cálculo de este índice se obtuvieron a escala 1: 25.000, con el fin de incluir todos los tributarios y determinar correctamente la dirección de basculamiento. El método supone que ni controles litológicos ni climas localizados causan la asimetría.

El índice de asimetría de la cuenca intenta cuantificar la deformación tectónica a través del cambio que sufre el entramado de cauces dentro de la misma, mediante ausencia o presencia de basculamiento a escala regional de la cuenca de drenaje. Es una razón porcentual entre las áreas ocupadas por las dos márgenes de la corriente.

En la Figura 22, se presenta el factor de asimetría normalizado para las cuencas del área de estudio.

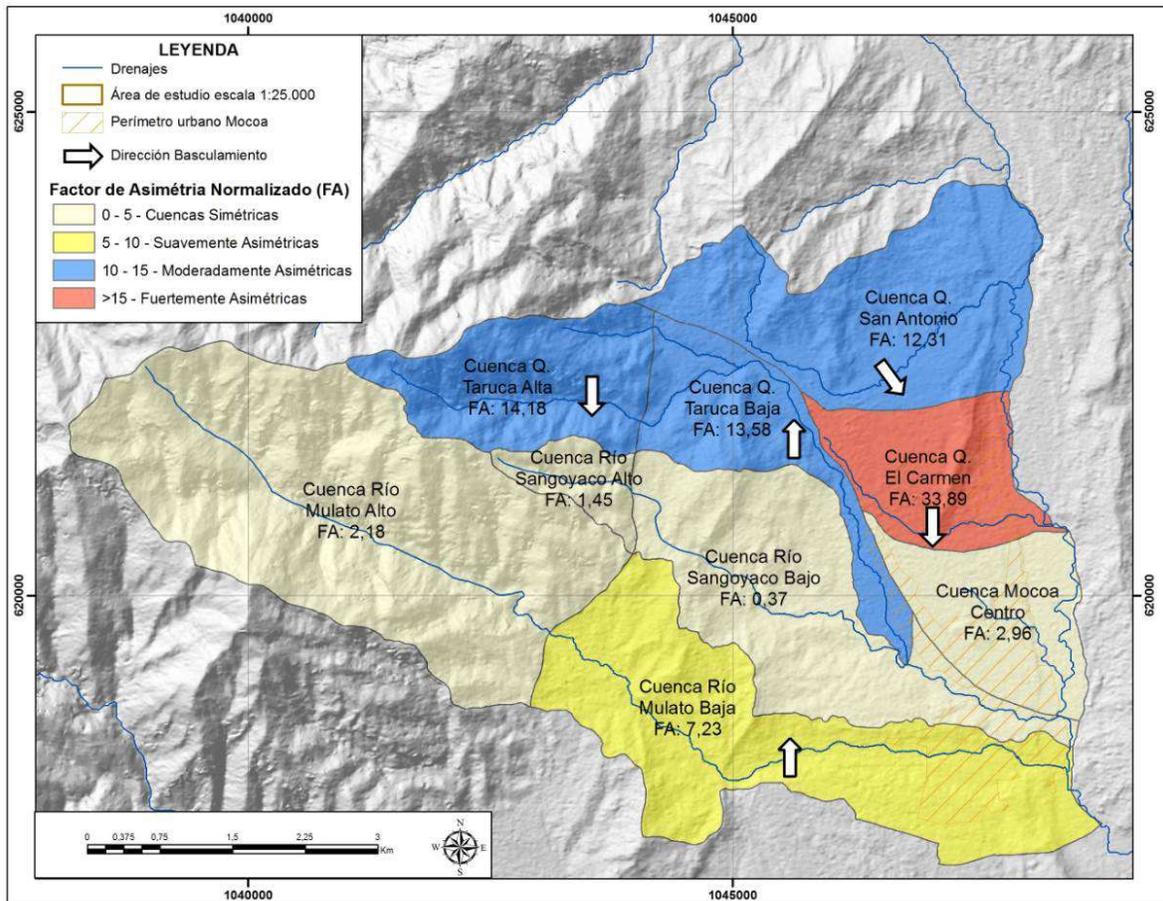


Figura 22. Índice de Asimetría normalizado de las cuencas quebradas San Antonio, Taruca, El Carmen, Mocoa Centro y los ríos Sangoyaco y Mulato. Las flechas indican la dirección del basculamiento.

Para determinar este índice del valor de asimetría normalizado de las cuencas, la zona de estudio se dividió en dos bloques limitados por la Falla Mocoa-La Tebaida.

Los resultados del factor de asimetría de las cuencas de la parte occidental alta de los ríos Mulato y Sangoyaco las definen como cuencas simétricas, sin basculamiento. Mientras que las cuencas de las Quebradas San Antonio, parte alta de la quebrada Taruca presentan asimetría hacia el sur-sureste y la quebrada El Carmen es fuertemente asimétrica presentando basculamiento hacia el sur. En este análisis se observa una dirección de basculamiento de la quebrada Taruca hacia el noreste, donde la quebrada cambia su curso dirigiéndose hacia el sureste donde desemboca al río Sangoyaco. Este basculamiento hacia el noreste explica el acercamiento de las quebradas Taruca y San Antonio, donde los sedimentos de los flujos torrenciales que se canalizan por la quebrada Taruca sobrepasan el canal en eventos extremos, trasvasándose hacia el cauce de la quebrada San Antonio.

3.1.10 Longitud de corriente vs. Gradiente de corriente o índice de Hack (SL).

El índice de gradiente de longitud de corriente se define por la relación:

$$SL = L \times \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \quad (3)$$

Donde $\Delta H / \Delta L$ es la pendiente o gradiente del canal de la corriente y L es la longitud total de la corriente de interés. El índice SL es sensible a cambios en la pendiente del canal y esta sensibilidad permite la evaluación de las posibles relaciones entre actividad tectónica, resistencia de la roca y topografía (Hack, 1973, en Oviedo, 2015). El índice SL es útil para determinar posibles zonas de actividad tectónica debido a que valores anómalos pueden indicar levantamientos. (Figura 23).

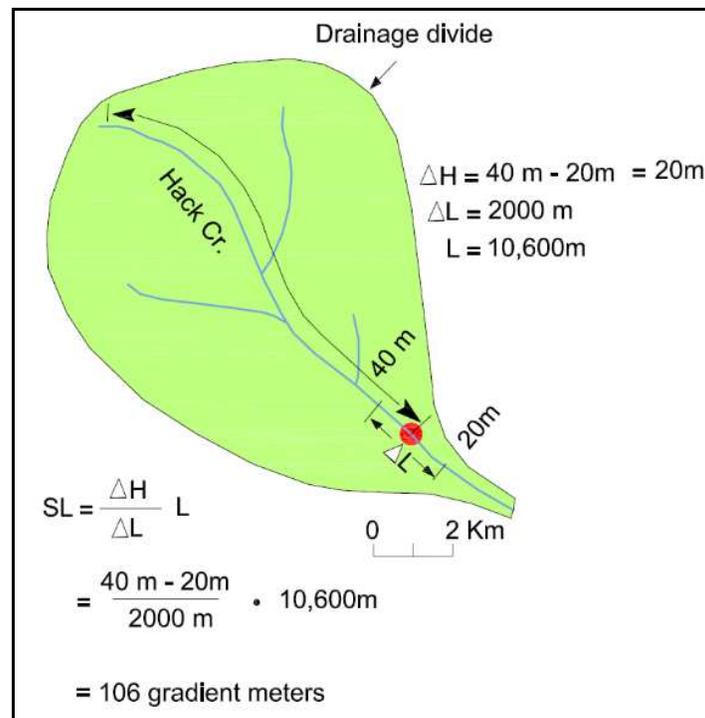


Figura 23. Procedimiento para calcular el índice SL.
(Modificado de Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

En un área con presencia de unidades blandas, altos o bajos valores de SL pueden indicar actividad tectónica reciente, por lo cual, este índice se relaciona con el poder erosivo y de descarga de corriente de un drenaje (Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015). El índice SL es muy sensible a los cambios de pendiente del cauce, lo que permite la evaluación de las relaciones entre la actividad tectónica, la litología (mayor o menor resistencia de las rocas a la erosión) y la topografía.

En la Figura 24, se presentan los valores del índice de Hack para las subcuencas del área de estudio.

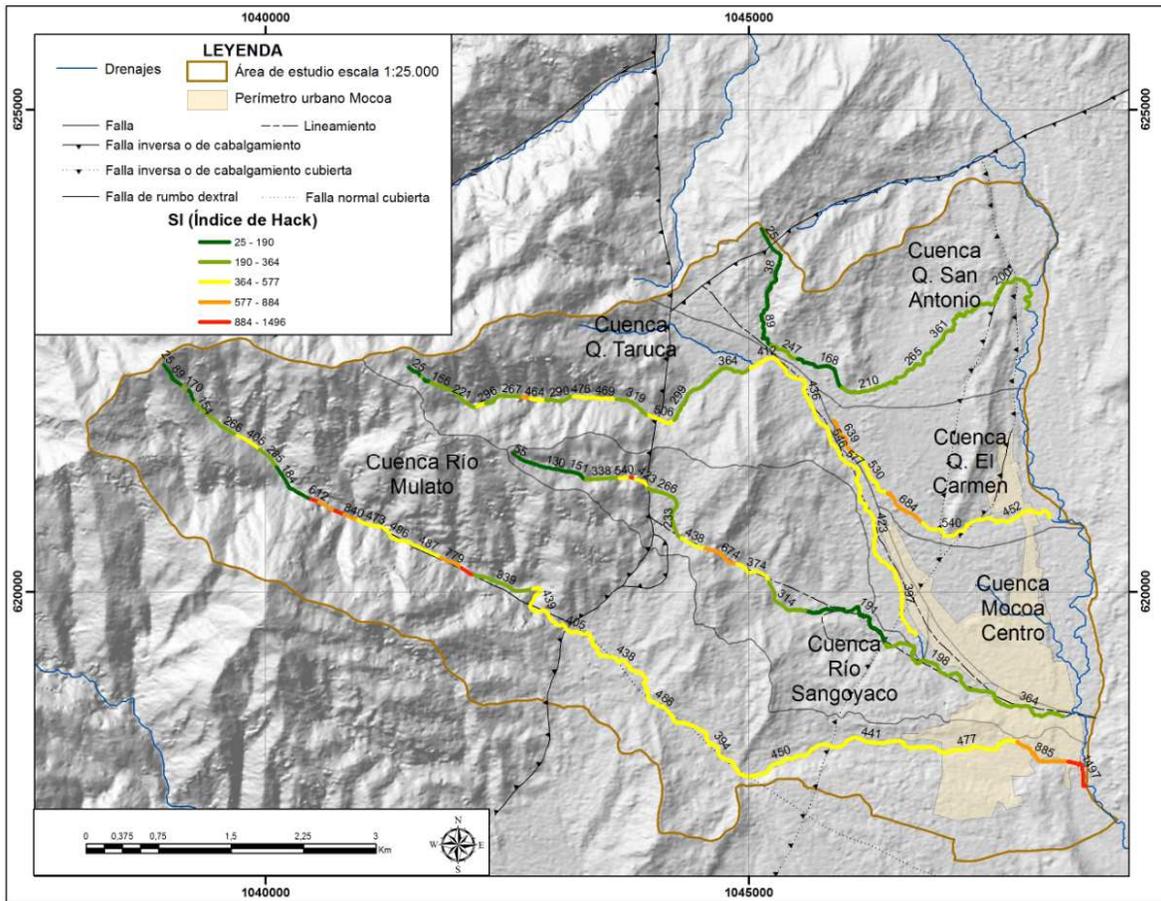


Figura 24. Índice de Hack (SL) para las cuencas de la zona de estudio.

El índice de Hack detecta y resalta los cambios de pendiente, mostrando la posición de los mismos, dando un valor numérico del cambio de gradiente. El análisis de los perfiles de las corrientes con el índice de Hack superpuesto, presenta las anomalías en el perfil que permiten identificar posibles eventos de tectónica reciente o en detectar cambios en la litología y/o procesos de pendiente (resistencia a la erosión, flujos de tierra, caídas de roca, deslizamientos).

Los resultados de este índice plantean la evaluación de cada uno de los valores obtenidos en los segmentos de los cauces, de los cuales se puede deducir que los valores más altos se presentan a lo largo del cauce del río Mulato en la sierra estructural (712, 812), asociados a los cambios de calidad del macizo rocoso, donde el primer valor representa al monzogranito de muy baja calidad (diacelado, cizallado) hacia el oriente hasta donde aflora la Falla Mocoa-La Tebaida. Entre estos dos valores se presenta un macizo de baja calidad un poco menos alterado el monzogranito, ya que se encuentra fuera de la acción de la falla. El cambio del valor SL de (812) a 184, se presenta también en el monzogranito de calidad intermedia hacia el occidente hasta la divisoria de la cuenca. En el río

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

Sangoyaco (674) en la Q. Taruca (506) y en la Q. El Carmen (684). Los valores que representan a la Falla Mocoa-La Tebaida con valores de (405) a (506). También se encuentran valores altos en el río Sangoyaco (674), que corresponde al cambio litológico entre los conglomerados del miembro superior de la formación Pepino y las lodolitas del miembro medio de la formación Pepino. El valor más alto se obtuvo en el perfil del río Mulato (885 y 1497), en el cambio de pendiente (escarpe) sobre el contacto de flujos de detritos y del contacto hacia el río Mocoa de la terraza y la planicie aluvial respectivamente.

3.1.11 Relación ancho del valle vs. -altura del valle (Vf).

El índice relación ancho del valle vs., altura del valle (Vf), se define como la relación del ancho del piso del valle y la altura promedio de las laderas de una corriente, medidas en una sección trasversal y muestra el distinto grado de encajamiento de un drenaje (Bull & McFadden, 1977; Bull, 1978; citado en Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015) y se calcula como:

$$Vf = \frac{2Vfw}{[(Eld - Esc) + (Erd - Esc)]} \quad (4)$$

Vf, es la relación del piso del valle y altura del valle; Eld y Erd, son las elevaciones del lado izquierdo y derecho del valle respectivamente, Esc es el promedio de la elevación del piso del valle; y Vfw es el ancho del piso del valle (Figura 25).

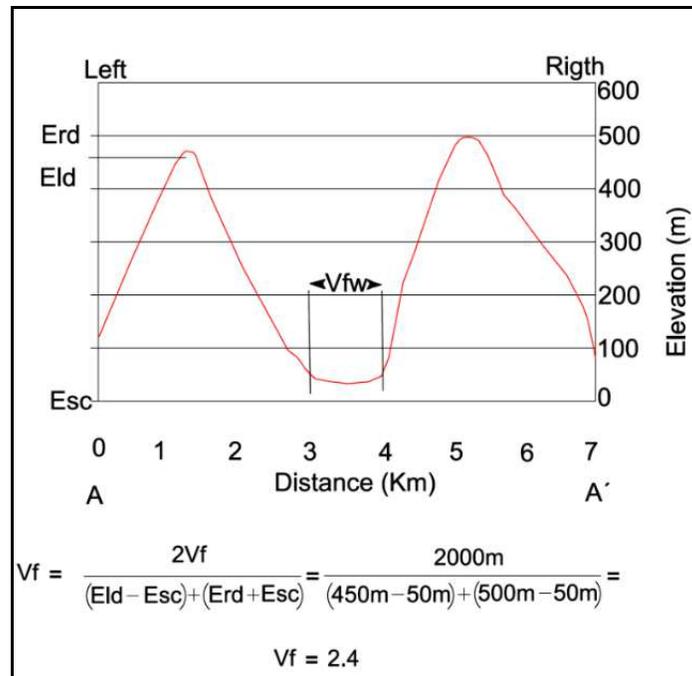


Figura 25. Relación ancho del piso del valle vs., altura del valle.
(Modificado de Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

Los parámetros Eld y Erd se asocian a las alturas que se encuentran inmediatamente al lado del valle. Cuando se calcula Vf, los parámetros se miden a una distancia establecida del frente de montaña para cada valle estudiado. Este índice diferencia entre cañones con pisos amplios, con altos valores de Vf y valles en forma de V, con bajos valores de Vf.. (Keller & Pinter, 2002, en Oviedo, 2015).

El grado de actividad del Índice ancho del fondo del valle y altura de la cuenca se clasifica en los siguientes rangos (Cuellar, 2015): **Activo:** < 1, Valores bajos de Vf → predominio de la incisión → el frente se levanta. En frentes montañosos que se levantan los ríos inciden y los valles presentan forma de “V”.

Poco activo: > 1, Valores altos de Vf → predominio de la degradación → expansión del fondo de valle y pérdida de altura de las crestas → frente sin actividad. En frentes montañosos que no se levantan los ríos suelen expandir las cuencas lateralmente y ensanchar los valles.

En la Figura 26, se presentan los valores del índice relación ancho del valle vs., altura del valle (Vf).

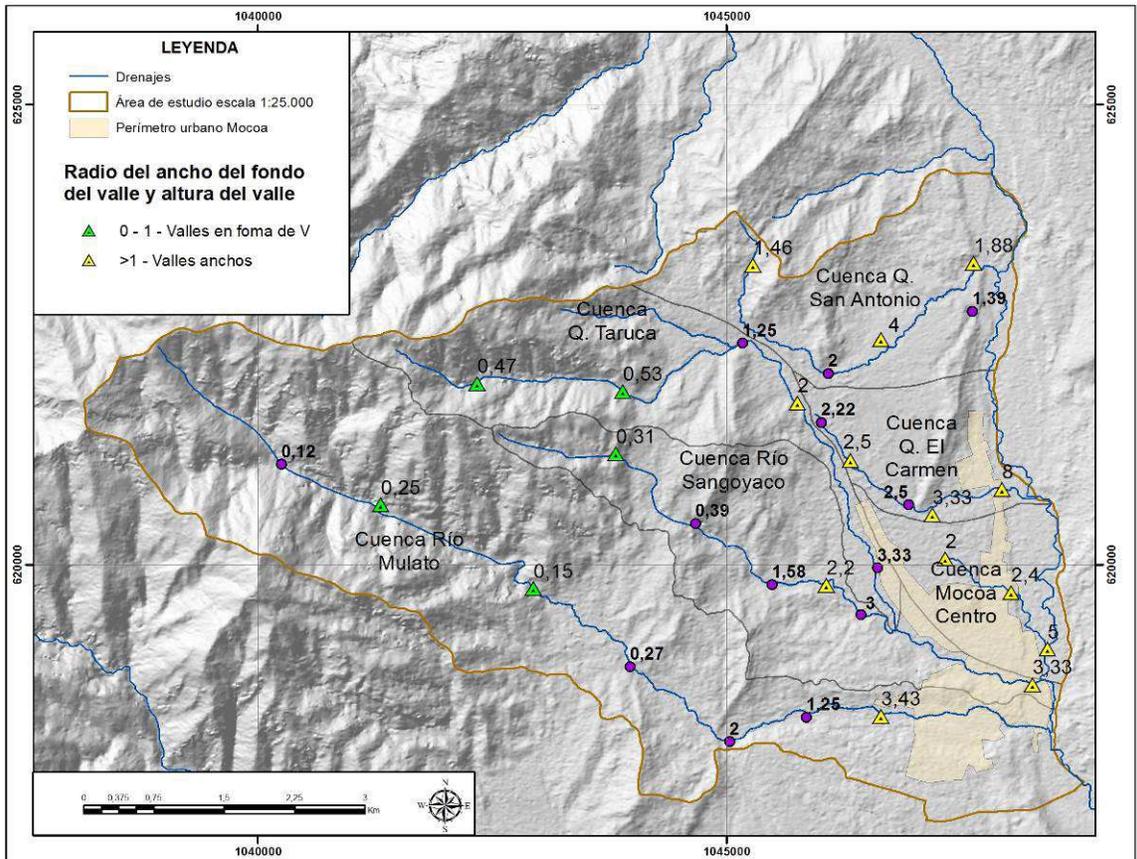


Figura 26. Valores de la relación entre ancho y altura del valle de los drenajes de la zona de estudio.

Valores bajos representan zonas encañonadas y valores altos zonas de valles amplios, los puntos morados representan sitios comparativos de valores de “Vf”.

Los resultados obtenidos de esta relación en las cuencas de estudio dan valores representativos, hacia la zona de la Sierra estructural donde se encuentran los valores más bajos, por ejemplo el valor de 0.25 del río Mulato es donde sus laderas se encuentran más encañonadas y es más alta la divisoria de su cuenca, hacia la población de Mocoa el valor para el mismo río es de 3.43, donde el río amplía su cauce. El valor donde la zona se amplía en la quebrada San Antonio, el “Vf” da un valor de 4 y en la quebrada El Carmen, después del cerro La Reserva, antes de su confluencia con el río Mocoa da el máximo valor de 8 de la zona de estudio, donde el valle es más amplio.

Un análisis comparativo en sitios a lo largo de todas las cuencas (puntos morados), muestra una relación ancho y largo del valle que explica las zonas donde se presentó socavación durante el evento del 31 de Marzo del 2017. De manera clara para cada una de las cuencas se presentan valores “Vf”: Para la Quebrada Taruca que van desde 0.47 en la parte alta de la cuenca, 0.53 en el frente montañoso relacionado con el trazo de la falla Mocoa- La Tebaida luego de la confluencia de la quebrada Taruquita con la quebrada Taruca, cercano a la confluencia de la quebrada San Antonio con esta última, el valor es de

1.25, en este punto se resalta la socavación durante el evento, debido a la influencia de la Formación Pepino Superior y donde las aguas se desbordan hacia la cuenca de San Antonio. Luego los valores de Vf siguen aumentando, lo que da cuenta de que el valle se amplía hasta llegar al río Mocoa.

Respecto a los ríos Sangoyaco y Mulato, la influencia de la Formación Pepino Superior e Inferior es notable y a su vez se presentan más encañonados, en el mismo nivel donde la Quebrada Taruca cambia bruscamente de dirección hacia el sureste, debido al alineamiento del mismo nombre asociado a la tectónica de la región (Ver Informe “Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de las subcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa-Putumayo, escala 1:25.000, SGC, 2017).

3.1.12 Relación de elongación vs. Formas de cuencas (Re).

Las formas planimétricas de las cuencas de drenaje son descritas por radios de elongación (Re), el índice adimensional de circularidad (Rc) es el diámetro de un círculo con la misma área de la cuenca y L es el largo en el mapa entre dos puntos distantes en la cuenca. La elongación de una cuenca se incrementa hasta valores por debajo de 1.0, lo que correspondería al valor para un círculo (Bull, 2009, en Oviedo, 2015).

$$Re = \frac{Rc}{L} \quad (5)$$

Una cuenca alargada tendrá valores Re alrededor de 0.5, por el contrario cuencas más circulares su Re serán aproximadas a valores de 1.0.

Según Bull (2009, en Oviedo, 2015), cuando las tasas de denudación son diferentes en redes de drenaje adyacentes, la divisoria de aguas migra cambiando las formas y áreas de las cuencas de drenaje. La erosión de origen tectónico generada por el desplazamiento a lo largo de un cinturón montañoso deformado causa que el nivel base migre a la red de drenaje y que eventualmente llegue a las cabeceras de los drenajes acelerando la degradación de las pendientes y la divisoria de aguas. Cuencas altamente elongadas caracterizan escarpes activos (Bull, 2009, en Oviedo, 2015), y llegan a ser más circulares a través de procesos de migración de la divisoria de aguas y captura de drenajes. (Figura 27).

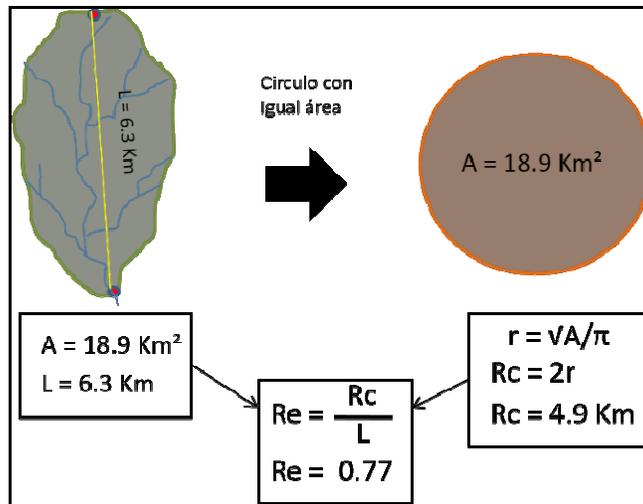


Figura 27. Procedimiento para calcular los radios de elongación Re sobre las cuencas presentes en una zona de actividad neo-tectónica (Bull, 2009, en Oviedo, 2015).

La Figura 28 presenta los valores de los radios de elongación y las formas de cuenca para las microcuencas de la zona de estudio.

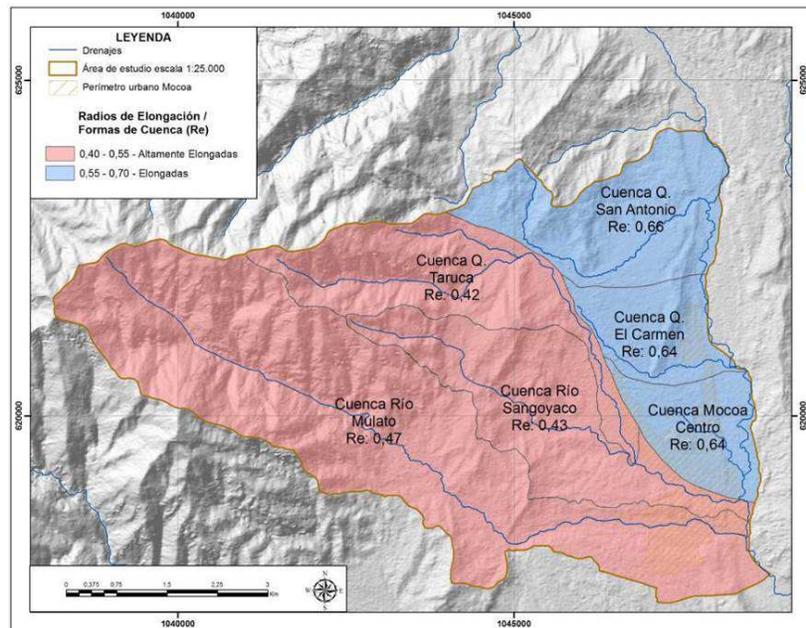


Figura 28. Relación de elongación y forma de las microcuencas de la zona de estudio.

En principio cuencas altamente elongadas caracterizan escarpes activos y llegan a ser más circulares a través de procesos de migración de la divisoria de agua y procesos de captura. Teniendo en cuenta dicha diferenciación en los radios de elongación de las cuencas de drenaje, se limitaron los rangos con los cuales se identificaron las zonas activas de las no-activas. Los valores máximos y mínimos usados para evaluar la tectónica son: Altamente elongadas (0.4-0.55), elongadas (0.55-0.7), Levemente elongadas (0.7-0.85) y no elongadas (0.85 a 1) (Oviedo, 2015).

Los valores de los radios de elongación y forma de la cuenca para las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y quebrada Taruca van de 0.42 a 0.47, representando cuencas altamente elongadas y los valores de las cuencas de las quebradas San Antonio, El Carmen y Mocoa Centro están en los rangos de 0.64 a 0.66, siendo cuencas elongadas. Las formas de las cuencas altamente elongadas y elongadas definen la zona de estudio como una zona activa tectónicamente. Esta actividad reciente se debe a una caída del nivel base que afectó los procesos de degradación de las laderas concentrando energía para incisar eficientemente y para dar cabida a la erosión remontante. Dichos procesos generan continuas migraciones de la divisoria de aguas, que como respuesta origina la forma elongada de las cuencas.

En la zona de estudio se presenta este proceso de erosión remontante, el cual ocasiona la expansión de la cuenca hidrográfica, relacionado con un progreso gradual hacia la cabecera, que genera la incisión fluvial en la parte alta del río Mulato y la quebrada Taruca. Dicho proceso está directamente relacionado con el proceso tectónico de la zona: la falla Mocoa-La Tebaida levantando y cabalgando el Monzogranito de Mocoa sobre las formaciones sedimentarias, además del alto grado de meteorización del mismo, facilitando la degradación de los cuerpos rocosos y de los suelos, dando lugar al transporte y depósitos de considerable volumen de material.

En la Tabla 2 se presenta la comparación de los valores de los índices morfométricos evaluados para las microcuencas de la zona de estudio, donde se analiza que los drenajes ríos Mulato y Sangoyaco y quebrada Taruca, vienen encañonados, dando el valor más bajo 0.15 el del río Mulato, el cual es el más encañonado. Estas mismas cuencas son elongadas, por lo tanto se deduce que presentan actividad tectónica relacionada a la Falla Mocoa-La Tebaida. El índice de Hack también muestra los cambios asociados al quiebre de pendiente en el frente montañoso, que a su vez coincide con el índice de sinuosidad que representa una zona activa tectónicamente.

Tabla 2. Valores de índices morfométricos evaluados para las microcuencas de estudio.

MICROCUENCAS ZONA DE ESTUDIO						
ÍNDICES	Río Mulato Parte Alta/Baja	Río Sangoyaco Parte Alta/Baja	Quebrado Taruca Parte Alta/Baja	Quebrada San Antonio	Quebrada El Carmen	Mocoa Centro
Sinuosidad del Frente Montañoso (Smf),	1.049 - 1.061 Frente Activo	1.021 Frente Activo	1.021 Frente Activo	N/A	N/A	N/A
Curva e Integral Hipsométrica (IH)	Cóncava 0.49 (Alta) Cóncava 0.44 (Baja) Madura	Cóncava 0.47 Cóncava 0.39 Madura	Cóncava 0.44 (Alta) Cóncava 0.56 (Baja) Madura	Cóncava 0.33 Senil-Transición a cuenca madura	Forma de "S" o plana. 0.4 Madura	Cóncava 0.29 Senil

MICROCUENCAS ZONA DE ESTUDIO						
ÍNDICES	Río Mulato Parte Alta/Baja	Río Sangoyaco Parte Alta/Baja	Quebrado Taruca Parte Alta/Baja	Quebrada San Antonio	Quebrada El Carmen	Mocoa Centro
Factor de Asimetría Normalizado (AF)	Simétrica (Alta) Suavemente asimétrica (Baja- basculada al norte)	Simétrica (Alta) Simétrica (Baja)	Moderadamente e asimétrica (Alta- basculada al sur) Moderadamente asimétrica (Baja- basculada al norte)	Moderadamente e asimétrica Basculada al sureste	Fuertemente e asimétrica Basculada al sur	Simétrica
Longitud de Corriente vs. Gradiente (índice de Hack)	Valor anómalo 612: Cambio calidad Macizo bajo a Moderado. Valor anómalo 779: Cambio calidad macizo muy bajo a bajo. Valor anómalo 405: Cambio Frente montañoso (Falla Mocoa- La Tebaida)	Valor anómalo 540: Cambio frente montañoso (Falla Mocoa-La Tebaida). Valor anómalo 674: Cambio de litología (Pepino Miembro superior y Miembro Medio).	Valor anómalo 506: Cambio frente montañoso (Falla Mocoa-La Tebaida).	Valor anómalo 247: Cambio de litología (Pepino Miembro superior y Miembro Medio).	Valor anómalo 639: Cambio asociado a cambio litológico y asociado lineamiento Q. Taruca.	NA
Relación ancho del Valle vs. Altura del Valle (Vf)	Valle en "V" 0.15-0.25 Encajonamiento . Valle ancho 3.43 (Mocoa)	Valle en "V" 0.33. Encajonamiento . Frente montañoso. Valle ancho 2.2 -3.33 (Mocoa)	Valle en "V" 0.53. Encajonamiento . Falla Mocoa-La Tebaida. Valle ancho 2 - 2.5	Valle ancho 1.46 - 4	Valle ancho 2.5 -3.33 y 8 confluencias con el río Mocoa.	Valle ancho 2 - 2.4 y 5 confluencia con el río Mocoa.
Relación elongación vs. Formas de Cuenca (Re)	Altamente elongada 0.47	Altamente elongada 0.43	Altamente elongada 0.42	Elongada 0.65	Elongada 0.64	Elongada 0.64

Nota: los valores de los índices no son "absolutos" y su interpretación depende de factores como el tamaño de la cuenca. También se deben evaluar en un contexto más regional. Por lo tanto su análisis está supeditado a la información estructural disponible y a la correlación con la información geológica y geomorfológica de la zona. NA: No Aplica. Ya que el (smf), es un índice lineal y no volumétrico y se evalúa en el frente montañoso. La escala de trabajo es 1:25.000.

Para relacionar estos índices con la tectónica de la zona de estudio, se presenta el bloque-diagrama (Figura 29), que representa el estilo tectónico y las relaciones estratigráficas de la zona de estudio, donde el sistema de fallas de cabalgamiento orientado N-S, NE-SW, concuerda muy bien con el tensor de esfuerzos vs deformación (campo de esfuerzos), dando una componente compresiva regional acorde con la tectónica regional de esta zona de piedemonte de la Cordillera Oriental.

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

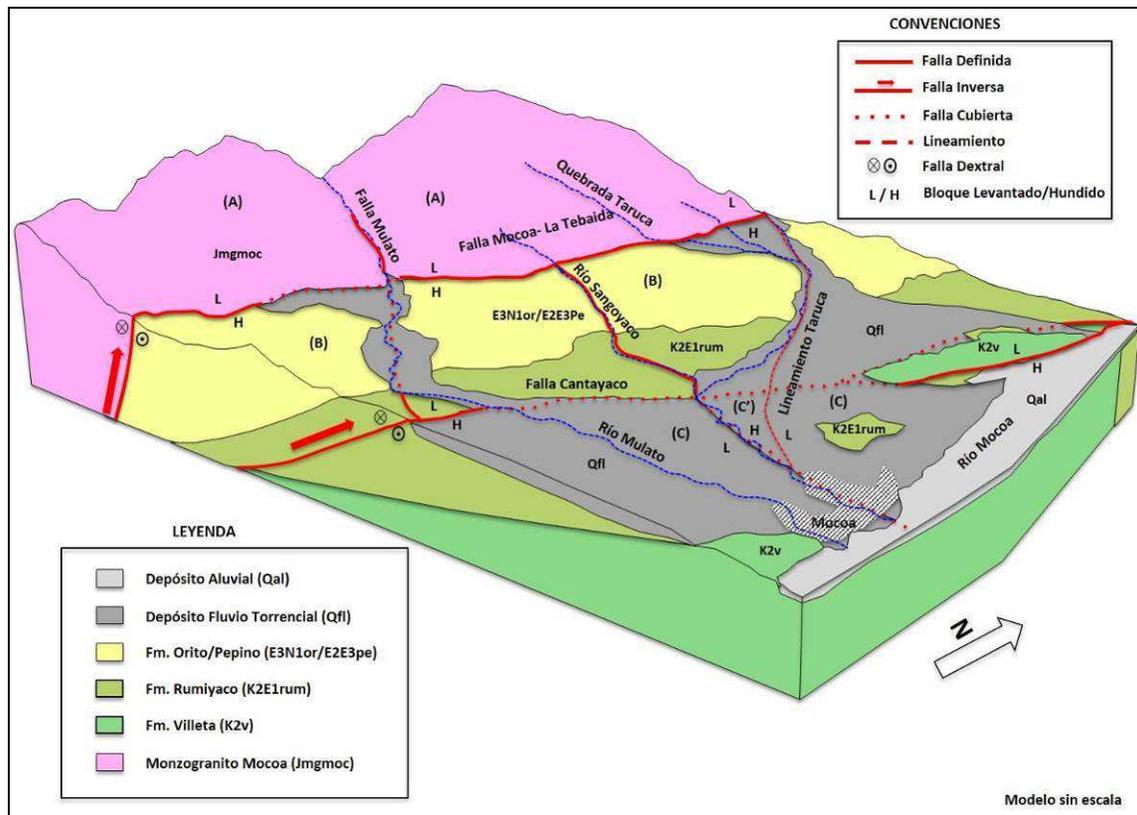


Figura 29. Estilo estructural sugerido para las cuencas de la región de estudio. Se resaltan en rojo las fallas inversas N-S, NE_SW, con componente dextral, limitando los bloques A-B y C y fallas normales NW-SE que limita los bloques C y C' (Fuente SGC, 2017).

La delimitación de bloques por trazos de falla de sistemas regionales y su posterior análisis estructural y geomorfológico, permite destacar la evolución del paisaje:

- El bloque (A) (Monzogranito de Mocoa) al occidente, está levantándose con respecto al Bloque B (Formación Orito y Pepino) al oriente, limitado por la Falla de Mocoa- La Tebaida.
- El bloque (B) en un nivel más bajo (formación Rumiayaco: al occidente), está levantándose con respecto al Bloque C, (formación Villeta en el cerro la Reserva).
- El bloque (C') está hundiéndose con respecto al bloque (C), entre la Falla de Sangoyaco y el lineamiento Taruca, que forma una cuña al llegar al municipio de Mocoa.
- Se interpreta también la edad relativa de estas fallas: La falla de Churumbelo es la más antigua de la zona, ya que termina contra la falla Mocoa-La Tebaida. Sigue la Falla Cantayaco, ya que termina contra la Falla de Churumbelo. Continúan los lineamientos de la quebrada Taruca y río Sangoyaco que terminan contra la falla Mocoa- La Tebaida y por último la falla del río Mulato que corta esta misma falla.

La cinemática del área de estudio se explica de la siguiente manera:

- Fallas inversas orientadas N-S y NE-SW (Fallas Mocoa-La Tebaida y Cantayaco), con levantamiento de bloques, en un sistema compresivo de dirección NW_SE, originando zonas de cizalla, con aporte de material en el frente montañoso. Estas fallas también presentan una componente dextral, por lo tanto el sistema llega a ser transpresivo.
- Fallas normales orientadas NW-SE (Fallas Mulato y Sangoyaco) y Lineamiento Taruca, transversales a las fallas inversas, en un sistema extensivo, originadas como respuesta a los fenómenos de compensación y levantamiento de la parte frontal de los bloques, generando subsidencia y/o hundimiento en la parte media, donde se depositan los abanicos fluviotorrenciales de la zona.

Por último se interpreta un perfil Sur –Norte (A-A' – Figura 30) que muestra la topografía donde se encuentran depositados los flujos fluviotorrenciales. Tanto al sur del río Mulato, como al norte de la quebrada Taruca se presenta el depósito de abanico fluviotorrencial más antiguo. Al sur del río Mulato se presenta en forma aterrazada con una altura desde el nivel base del río (685m) hasta 735 m aproximadamente (aún está por determinarse el espesor del depósito).

Luego hacia el norte en un cambio de pendiente se presenta la falla Cantayaco, la cual se encuentra cubierta por el depósito que continúa conformando una planicie más baja, ya que va disminuyendo el nivel base hacia 675 m, donde antes de llegar a la altura del río Cantayaco se observa claramente el lomo de falla asociado al lineamiento de Sangoyaco, el cual está conformado por arcillolitas de la formación Rumiyaco y que se ven afectadas por el lineamiento del mismo nombre. El nivel base de la quebrada Sangoyaco se encuentra a 672 m aproximadamente. Entre el río Sangoyaco y las Quebradas Taruca y San Antonio se presenta el depósito antiguo (más joven que el anterior, el cual presenta una pendiente más suave. En la quebrada Taruca a un nivel base de 765 m se cruza con el lineamiento del mismo nombre y de este punto hacia el norte aflora el depósito fluviotorrencial más antiguo, el cual continúa remontando.

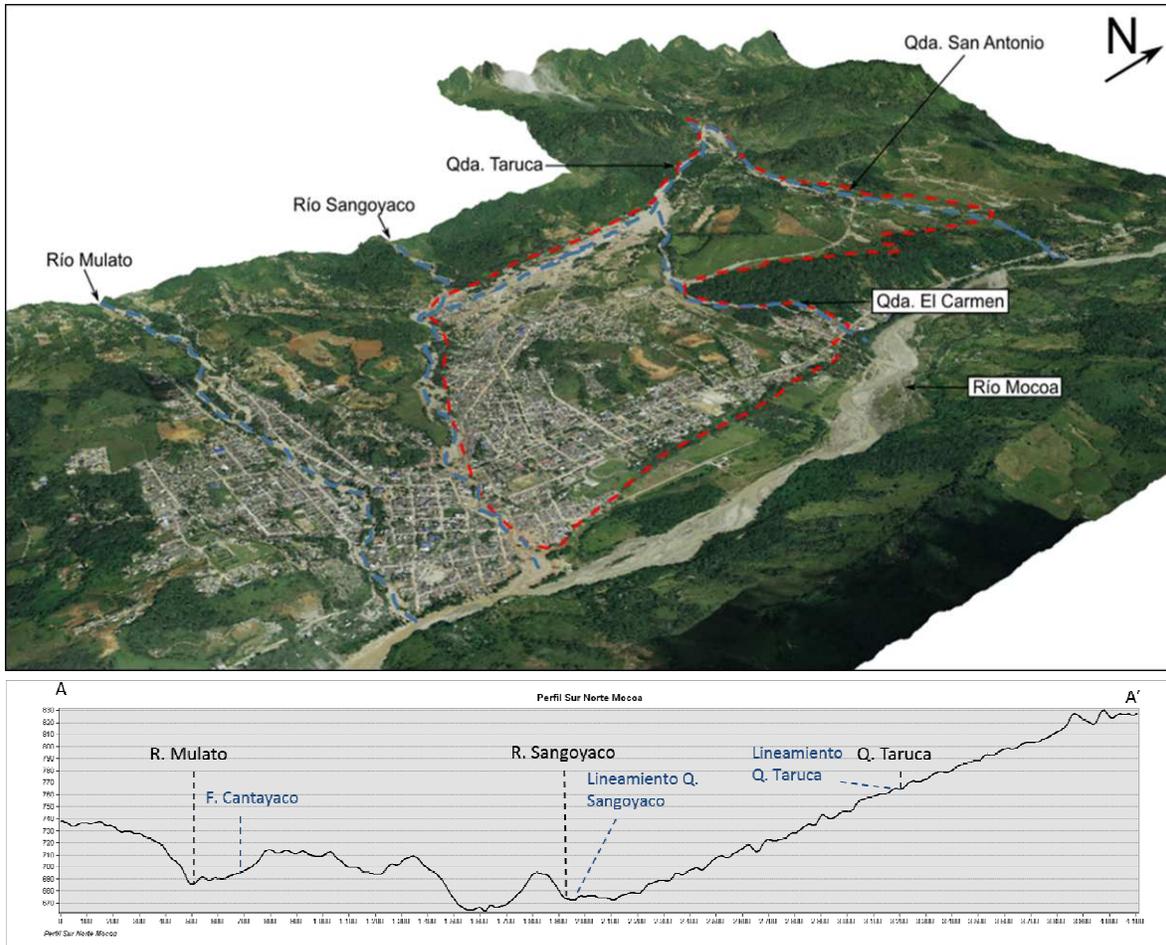


Figura 30. Extensión del abanico fluviotorrencial de la quebrada Taruca (línea punteada roja) y corte A-A' línea negra.

Fuente: GeoSpatial, CORPOAMAZONÍA.

Perfil A-A' corta los flujos y abanicos fluviotorrenciales. Escala 1H: 5V.

Las Tablas 3 y 4 se compilan los parámetros estudiados para cada una de las microcuencas.

Tabla 3. Parámetros para definir características de forma, drenaje y relieve.

Nombre	Amc altitud media (msnm)	AC (área de la cuenca en km ²)	Perímetro (km)	L Long Cauce (km)	Lt Longitud Corrientes	h max (m)	h min (m)	Delta H (m)	IH
Río Mulato	1395	18.92	29.48	12.68	63.57	224 1	549	1692	0.41
Q. San Antonio	875	5.67	11.81	5.58	27.14	111 1	639	472	0.33
Q. El Carmen	718.5	2.67	7.76	3.17	14.53	839	598	241	0.42
Río Sangoyaco	1121.5	6.61	17.99	7.54	26.69	168 2	561	1121	0.28

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

Nombre	Amc altitud media (msnm)	AC (área de la cuenca en km ²)	Perímetro (km)	L Long Cauce (km)	Lt Longitud Corrientes	h max (m)	h min (m)	Delta H (m)	IH
Q. Taruca	1356	6.11	16.63	8.25	21.93	208 8	624	1464	0.42
Mocoa Centro	605.5	2.78	7.73	1.83	16.26	644	567	77	0.29

Tabla 4. Parámetros para definir características de forma, drenaje y relieve.

Nombre	KC (Coef de Compacidad)	Re (Relación de elongación)	Dd (Densidad de drenaje)	Pcm % (Pendiente media del cuace)	Tc (Tiempo de concentración - horas)	Km (Coeficiente de masividad)	Pend media
Río Mulato	1.91	0.47	3.36	13.34	1.02	73.72	13.3 %
Q. San Antonio	1.40	0.66	4.78	8.45	0.65	154.19	8.4%
Q. El Carmen	1.34	0.64	5.44	7.60	0.44	268.80	7.6%
Río Sangoyaco	1.97	0.43	4.03	14.86	0.66	169.56	14.9 %
Q. Taruca	1.90	0.42	3.59	17.75	0.66	221.88	17.7 %
Mocoa Centro	1.31	0.64	5.84	4.22	0.36	217.62	4.2%

Coeficiente de compacidad o índice de Gravelius (KC).

Este índice integra la relación del perímetro de la microcuenca y el valor del área de la misma, bajo un arreglo matemático que integra el área del círculo, para las áreas en estudio presenta valores de entre 1.9 a 1.3, lo que indica que la tendencia de las microcuencas es de ovalada a rectangular elongada.

$$KC = \frac{P}{2\sqrt{\pi Ac}} \quad (6)$$

Relación de elongación (Re).

Es la relación de del diámetro de un círculo con igual área a la de la microcuenca y la longitud máxima de ella (longitud del cauce), los valores obtenidos van de 0.6 a 0.4 lo que indica que tienen menor grado de elongación correspondiente a valores intermedios para tener crecientes súbitas y riesgo de inundación.

$$Re = \frac{(1.128 \times \sqrt{Ac})}{L} \quad (7)$$

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

Pendiente (Pcm).

Es la relación entre el cambio de altitudinal del cauce y su longitud, para las microcuencas de la quebrada Taruca, río Sangoyaco y Mulato presentan los mayores valores de pendiente media en (%) 17.75%, 14.86% y 13.34% en su orden, estos valores se encuentran dentro de la clasificación del terreno por donde discurre el drenaje como de tipo accidentado muy cercano a ser fuertemente accidentado, para el caso de la quebrada Taruca en especial. Por su parte el resto de microcuencas tienen valores del 8.45% al 4.22% lo que indica terrenos con pendientes medianamente accidentado a suave.

$$Re = \frac{\sum \Delta h}{L} \times 100 \quad (8)$$

Tiempo de concentración (Tc).

Define el tiempo teórico que tarda una gota de lluvia en su recorrido desde la parte alta de la microcuenca hasta la desembocadura de la misma en horas, considerando que se haya logrado la saturación del suelo. Todas las microcuencas presentan valores menores e iguales a una hora, lo que acompañado a las altas pendientes permite considerar estas microcuencas en de régimen torrencial.

$$Tc = 0.95 \times \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0.385} \quad (9)$$

Coficiente de masividad (Km).

Establece la relación entre la elevación media de la microcuenca y el área de la misma, las microcuencas presentan valores altos que corresponden a microcuencas pequeñas con grandes desniveles topográficos.

$$Km = \frac{Amc}{AC} \quad (10)$$

3.2 Análisis geológico.

Para elaborar un modelo de la evolución tectónica/levantamiento-degradación/exhumación-sedimentación que permita dar una explicación de las particularidades de la ocurrencia, características y distribución de los depósitos fluviotorrenciales acaecidos en la zona, se debe tener en cuenta los procesos de levantamiento de la cordillera oriental y la progradación del frente de deformación hacia la amazonia. Estos procesos se desarrollan en pulsos de actividad y también están

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

relacionados con cambios climáticos durante el Cuaternario, los cuales causan una exhumación progresiva y acumulación de sedimentos en la cuenca buscando un estado de equilibrio.

La cuenca del área de estudio se localiza en el sector Macizo Colombiano, en la unión de las cordilleras Central y Oriental, en el borde oriental de la Cordillera oriental, en lo que se denomina piedemonte amazónico en esta parte sur de la cordillera y constituye la zona de transición que marca el límite oriental de la Cordillera Oriental y el comienzo de la Llanura amazónica.

3.2.1 Control tectónico y litológico.

La compleja evolución de la margen noroccidental de Suramérica, i.e. los Andes del Norte, ha llevado a una configuración estructural dominada por sistemas de fallas longitudinales NE-SW que controlan la deformación y la exhumación (e.g. Sistema de Fallas de Algeciras, Velandia et al., 2005) y un sistema transversal NW-SE paralelo a oblicuo a la dirección de transporte tectónico. Estos dos sistemas se ven reflejados en la zona de estudio por las fallas Mocoa-La Tebaida (FMT), Cantayaco, Churumbelo y Campucana de dirección NE-SW y la Falla del río Mulato así como el Lineamiento del río Sangoyaco de dirección NW-SE.

La FMT se constituye como el rasgo estructural más importante ya que controla la exhumación del Monzogranito de Mocoa contra las sedimentitas Paleógenas del Grupo Orito. La FMT muestra una cinemática inversa-destal. La intensa actividad de la falla ha creado una zona de deformación importante con cataclasis y fracturamiento del macizo rocoso hasta desarrollar estructuras blocosas a muy blocosas con intersección de hasta 4 familias de diaclasas que han facilitado así la percolación de aguas de escorrentía y la desestabilización de las laderas. De acuerdo al índice morfométrico de sinuosidad del frente montañoso (*Smf*), este es activo, con un promedio de *Smf*: 1.04, lo cual demuestra su importancia en el Cuaternario. Por otro lado, el sistema transversal asociado a la Falla del río Mulato y al Lineamiento del río Sangoyaco forma una cuña de un bloque hundido lo que ha permitido la acumulación del Abanico de la Taruca. Debido a evidencias geomorfológicas se estima que la Falla del río Mulato tiene un movimiento normal con vergencia al NE como producto del reacomodamiento de los esfuerzos principales.

El flujo de detritos que afectó al casco urbano de Mocoa durante la noche del 31 de marzo de 2017 tenía una composición predominante de material proveniente del Monzogranito de Mocoa y sus variedades composicionales y en menor proporción fragmentos de diques máficos y rocas sedimentarias (<10%). El material involucrado en el flujo era en un gran porcentaje de arena media-gruesa de cuarzo, feldespato y plagioclasa formada por la meteorización química y física del macizo rocoso, en este caso monzogranitos, granodioritas, cuarzomonzonitas, entre otros, mientras la fracción más fina que involucraba lodo-arena fina tenía su origen en los suelos transportados fluviotorrenciales y coluviales presentes en la parte alta de la cuenca. Debido a la acción de la FMT y otras estructuras, la roca del monzogranito se encuentra altamente meteorizada y fracturada,

con desarrollo de suelos superficialmente que alcanzan los 2 m de espesor, de consistencia blanda a firme y dureza baja, friable y con humedad baja. Se identificaron taludes con afloramientos altamente fracturados y meteorizados, donde se aprecian fragmentos de roca con meteorización esferoidal. La caracterización del macizo rocoso permite clasificar este material como de muy baja calidad, con un macizo deformado y fracturado, por lo que se considera como de baja resistencia, friable, con fracturamiento alto a muy alto (JV: 30 - >60 fr/m³) y un índice geológico de resistencia muy pobre ($GS_I = 10-30$).

3.3 Análisis geomorfológico.

El frente montañoso amazónico al occidente de Mocoa y a partir del cual se originó el flujo de detritos corresponde a la subunidad geomorfológica de **Sierra Facetada**, definida como una ladera estructural con superficie plana de forma triangular o trapezoidal, escarpada con la base hacia abajo, disectada por efecto de fallas (e.g. Falla Mocoa- La Tebaida), desarrollando facetas triangulares sucesivas como producto del alto grado de fracturamiento desarrollado en el Monzogranito de Mocoa. La parte alta de las cuencas de las quebradas Taruca, Taruquita y los ríos Mulato y Sangoyaco corresponden a **Sierras Estructurales** cuya expresión geomorfológica refleja prominencias topográficas montañosas formando cerros alargados de pendientes escarpadas que sobresalen de su entorno geográfico. Están compuestas por rocas ígneas intrusivas ácidas, levantadas por efectos compresivos. Se reconocen al occidente de Mocoa formando cerros alargados limitados por las fallas del río Mulato, Chontayaco y Campucana, por donde corren quebradas que han entallando profundamente el relieve. Sobre ambas subunidades geomorfológicas se observan cicatrices de antiguos movimientos en masa e intensos procesos erosivos.

3.3.1 Procesos de estabilización de laderas e incisión de los drenajes.

La evolución y estabilización de las laderas están controladas por procesos denudacionales y la incisión de los drenajes en la roca expuesta, siendo este último el que genera el relieve local, ajustando las tasas de erosión de las laderas (Ouimet et al. 2007). En las quebradas Taruca y Taruquita, así como en el río Mulato, se observan procesos de estabilización de laderas como respuesta a la rápida incisión influenciada por la exhumación del monzogranito de Mocoa. Los valores de V_f (Relación ancho del valle vs longitud del valle) son en promedio para estas cuencas de 0.50 y 0.20 respectivamente, indicando el predominio de la incisión en valles activos lo que a su vez se asocia con cuencas altamente elongadas (Re : 0,42 y 0,47, respectivamente), presentándose erosión remontante tanto en la quebrada Taruca como en el río Mulato (Ver, Figuras 25 y 26). Estos procesos de incisión son compensados a partir de procesos erosivos intensos que evolucionan en movimientos en masa de diferentes magnitudes (e.g. Burbank et al., 1996; Korup, 2006; Ouimet et al., 2007), principalmente deslizamientos traslacionales y flujos de detritos que se desarrollan en la cabecera del drenaje (*catchment*) de la Taruca y Taruquita. Dependiendo de las condiciones geomorfológicas, tectónicas y climáticas la

generación de deslizamientos con obstrucciones parciales o totales del cauce con duraciones de decenas a cientos de años pueden llevar a evitar la incisión de los drenajes en el lecho del cauce (Ouimet et al., 2007) y afectar los perfiles longitudinales llevando a la aparición de puntos de inflexión (*knickpoints*) que corresponden a sectores de agradación (Korup, 2006). Debido a factores típicos de las quebradas Taruca y Taruquita como un canal angosto, de alta pendiente, un caudal importante y periodos de invierno fuertes, la agradación de las quebradas es localizado y asociado a la intensidad y magnitud de los deslizamientos.(Figura 31)

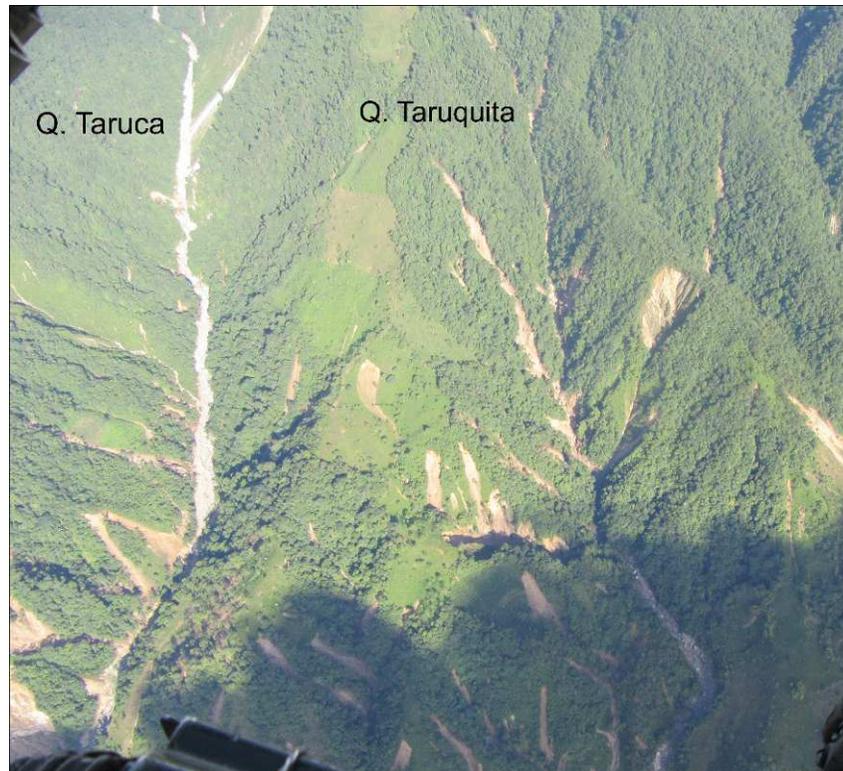


Figura 31. Vista aérea de las quebradas Taruca y Taruquita donde se observa la morfología de valle en "V", la zona de mayor densidad de deslizamientos y de agradación del canal.

Los valores de la integral hipsométrica muestran un perfil cóncavo-convexo con una mayor área de agradación que de erosión, lo cual se refleja en la acumulación de depósitos coluvio-aluviales en segmentos donde se observa la mayor frecuencia de movimientos en masa (Ver, Figuras 11 a 19). De igual manera, estos puntos de inflexión causados por la agradación del canal son observables a partir del índice de Hack, los cuales muestran valores de hasta 476 en las zonas donde se reactivaron la mayor cantidad de movimientos en masa en el evento del 31 de marzo de 2017. (Ver, Figura 23).

Dado que el proceso de agradación no es continuo a lo largo del cauce, las laderas no pueden alcanzar el umbral de estabilidad, detonando o reactivando constantemente deslizamientos desarrollados en suelos residuales poco espesos donde la roca está expuesta o muy cerca de superficie. Estas condiciones de inestabilidad de laderas dada

por la rápida incisión de los drenajes, se comportan de manera distinta para las cuencas de la quebrada Taruca (incluye quebrada Taruquita) y de los ríos Mulato y Sangoyaco.

Es así como, al analizar las pendientes medias de las laderas del río Mulato versus las laderas de las quebradas Taruca, Taruquita y Sangoyaco se observa una diferencia de $\sim 10^\circ$ (21° y 31° , respectivamente); la formación de suelo residual y depósitos coluviales como resultado del alto grado de fracturamiento del Monzogranito de Mocoa alcanzan un ángulo de fricción efectivo de $\sim 30^\circ$ que entra en inestabilidad una vez el cauce socava la base de la ladera o profundiza el canal. Burbank et al. (1996) reportan valores similares de estabilización para el Himalaya ($\sim 32^\circ$) con procesos denudacionales actuando como factor de ajuste. Las diferencias entre las pendientes medias, el número de deslizamientos detonados y las características de los abanicos del río Mulato y de la quebrada Taruca reflejan una evolución geomorfológica diferenciada probablemente asociada a un control estructural mayor y más rápido sobre el río Mulato asociado a la Falla del río Mulato, llevando a una estabilización más rápida de las laderas.

Un análisis de los perfiles longitudinales permite observar la influencia de los movimientos en masa en la evolución geomorfológica de las cuencas, evitando en algunos sectores puntuales la incisión del drenaje, observables principalmente en la quebrada Taruca y el río Mulato. Para la cuenca de la quebrada Taruca la máxima altura obtenida es de 2.131 m.s.n.m., mientras el drenaje nace a una altitud de 2.044 m.s.n.m. Entre su nacimiento y el sector de San Antonio pueden observarse movimientos en masa tipo deslizamientos traslacionales, flujos de detritos y caídas de roca que alimentan un canal de alta pendiente ($38\% - 20.7^\circ$). Ya entre San Antonio y el ápice del evento Mocoa la pendiente promedio es de 23.3% (13.1°) donde muestra una curvatura en dirección SE como resultado de la migración del cauce.

Dadas estas condiciones, los materiales originados por los movimientos en masa son transportados cauce abajo, produciendo acumulaciones de por lo menos 8 m de espesor. Después de su confluencia con la quebrada Taruquita, la quebrada Taruca continúa por una zona de menor gradiente ($8.2\% - 4.7^\circ$), formando un abanico fluvio-torrencial de por lo menos 5.2 Km de largo (hasta su desembocadura en el río Sangoyaco) y 3.5 Km de ancho, sobre el cual está parte del área urbana del municipio de Mocoa. Por otro lado, la quebrada Taruquita nace a una altitud de 1.702 m.s.n.m. donde presenta pendientes del cauce de hasta 45.5% (24.4°) con un cauce recto que transcurre en dirección W-E, manteniendo un ancho de entre 2 m y 8 m hasta el sector de San Antonio. La quebrada Taruquita también tiene un abanico de aproximadamente 1.0 km de longitud y 0.75 km de ancho, compuesto por niveles de sedimentos fluvio-coluviales. En el ápice del abanico de la Taruquita se tienen pendientes del 14% (7.9°) y ensanchamiento del canal (hasta 25 m). (Figura 28).

Los perfiles longitudinales de ambas quebradas muestran un patrón convexo-lineal con zonas de inflexión en los sectores con control estructural (FMT), litológico (Transición entre Monzogranito de intermedia y baja calidad) o por agradación del canal por

depósitos coluviales derivados de grandes deslizamientos (cf. Korup, 2006; Ouimet et al., 2007). La dinámica de ambas quebradas es por lo tanto dominada por eventos fluvio-torrenciales con arrastre de material y represamientos en puntos de estrechamiento del cauce así como de obstrucción por movimientos en masa activos.

Así mismo los perfiles del río Mulato y Sangoyaco difieren en parte de las características de las quebradas Taruca y Taruquita. Estos tienden a ser más rectos, de cauces más anchos y máximas pendientes de 25.2% (14°) y 27.6% (15°), respectivamente. Los flujos que están asociados a estos drenajes tienden a ser de mayor amplitud y menor altura, sin embargo se evidencian depósitos fluvio-torrenciales en el abanico del río Mulato de hasta 35 m de espesor en algunos sectores. (Figuras 32 y 33).

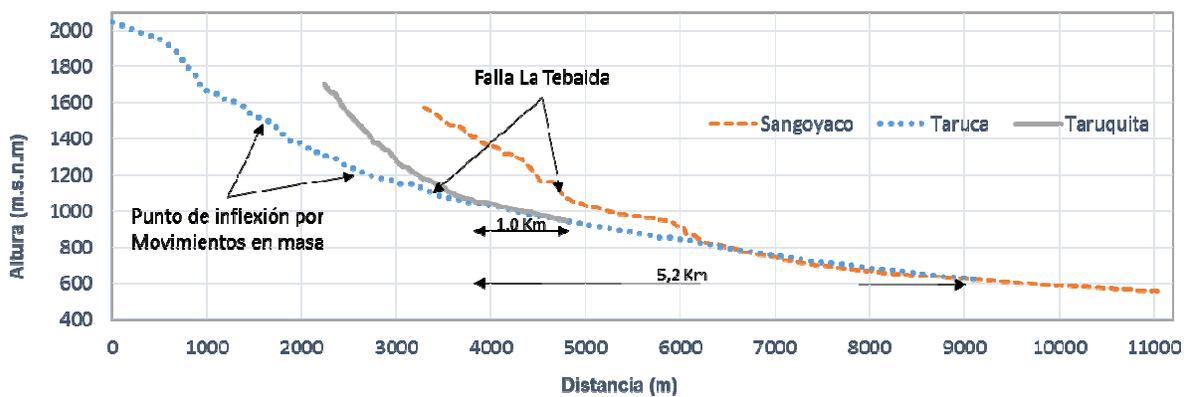


Figura 32. Sección longitudinal del cauce de las quebradas Taruca, Taruquita y río Sangoyaco

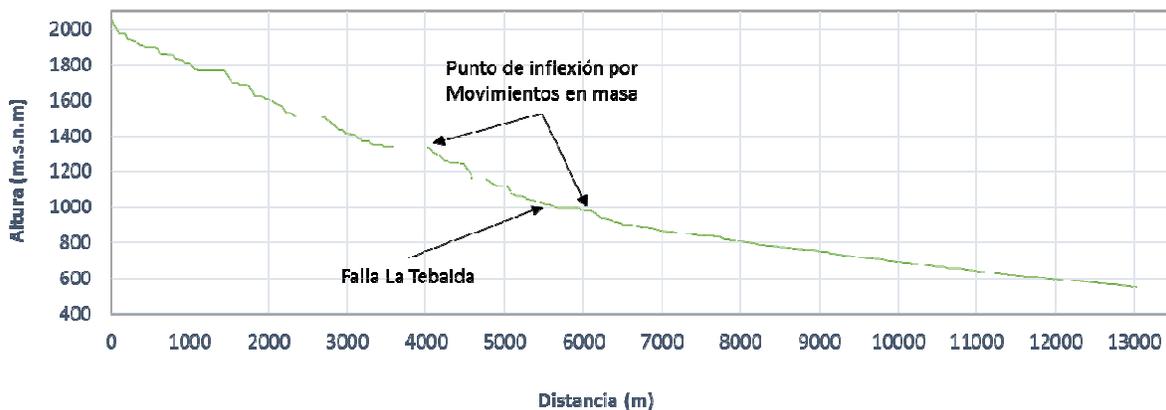


Figura 33. Sección longitudinal del cauce del río Mulato.

3.2.2 Mecanismos de amplificación del evento del 31 de marzo de 2017.

Desde el nacimiento de las quebradas La Taruca y Taruquita, hasta su confluencia en el sector de San Antonio, varios factores actuaron repetida y simultáneamente permitiendo la formación de un flujo de detritos y su posterior amplificación. Dadas las características de ambas quebradas, los procesos involucrados en la estabilización de las laderas como resultado de la incisión de los drenajes y la exhumación del monzogranito y su

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

configuración geomorfológica, ciertos aspectos son claves para entender la magnitud del evento Mocoa y los cambios energéticos que permitieron la amplificación del flujo.

Es así como la formación de represamientos repentinos en periodos de lluvias intensas y agradación del canal a lo largo de ambas quebradas en periodos de 10-30 años, en los que el material coluvial (deslizamientos antiguos) y fluvio-aluvial es depositado sobre el lecho de la quebrada dando lugar a un escenario propicio para la generación de flujos de detritos como el del 31 de marzo de 2017.

Un análisis multitemporal sobre imágenes Landsat 7 y 8 (15 m) y Sentinel 2A (10 m, 2016) muestra la evolución de las cuencas y como varios movimientos en masa han estado actuando al menos desde el 2002, aportando grandes cantidades de sedimento a los cauces (Figura 34). Uno de estos movimientos en masa localizados sobre la margen izquierda de la quebrada Taruca (flechas blancas) muestra la influencia en la agradación del canal, tal y como se observa en la Figura 34, presenta para el año 2005 actividad incipiente para luego en el año 2008 presentar mayor actividad, la cual le permite alcanzar un volumen de material estimado a partir de la imagen satelital, de al menos 257.000 m³, que además afecta el cauce en un ancho de 5 m. Según testimonios de habitantes del sector (4 de abril de 2017), el depósito ubicado sobre el cauce no generó represamiento alguno, no obstante dio lugar a que el agua se infiltrara en una longitud de aproximadamente 200 m, es claro que este tipo de depósitos dado su contenido de cantos, bloques (monzogranito) y bajo contenido de matriz permite la infiltración del agua transportada por la quebrada. Es importante mencionar que el depósito fue removilizado por el evento del 31 de marzo de 2017 y el movimiento en masa que lo origina permanece activo y corresponde a un flujo de detritos de aproximadamente 170 m de ancho.

Sobre la quebrada Taruquita se observan igualmente deslizamientos en suelo residual y roca. Uno de los más importantes afecta un afluente de ésta, permanece activo al menos desde el 2002 con un volumen (calculado a partir de la imagen satelital) cercano a los 70.000 m³ de material desplazado (Figura 34). El transporte y entrada de este volumen al cauce de la quebrada Taruquita ha llevado a la formación de depósitos fluvicoluviales colgados de hasta 6 m de espesor.

Sobre el río Sangoyaco y sus afluentes se identificaron al menos tres movimientos en masa activos desde el 2002, los cuales corresponden a flujos de suelo y detritos con depósitos en espesores entre 1-2 m, aportando así un volumen de ~ 63.000 m³. (Figura 34).

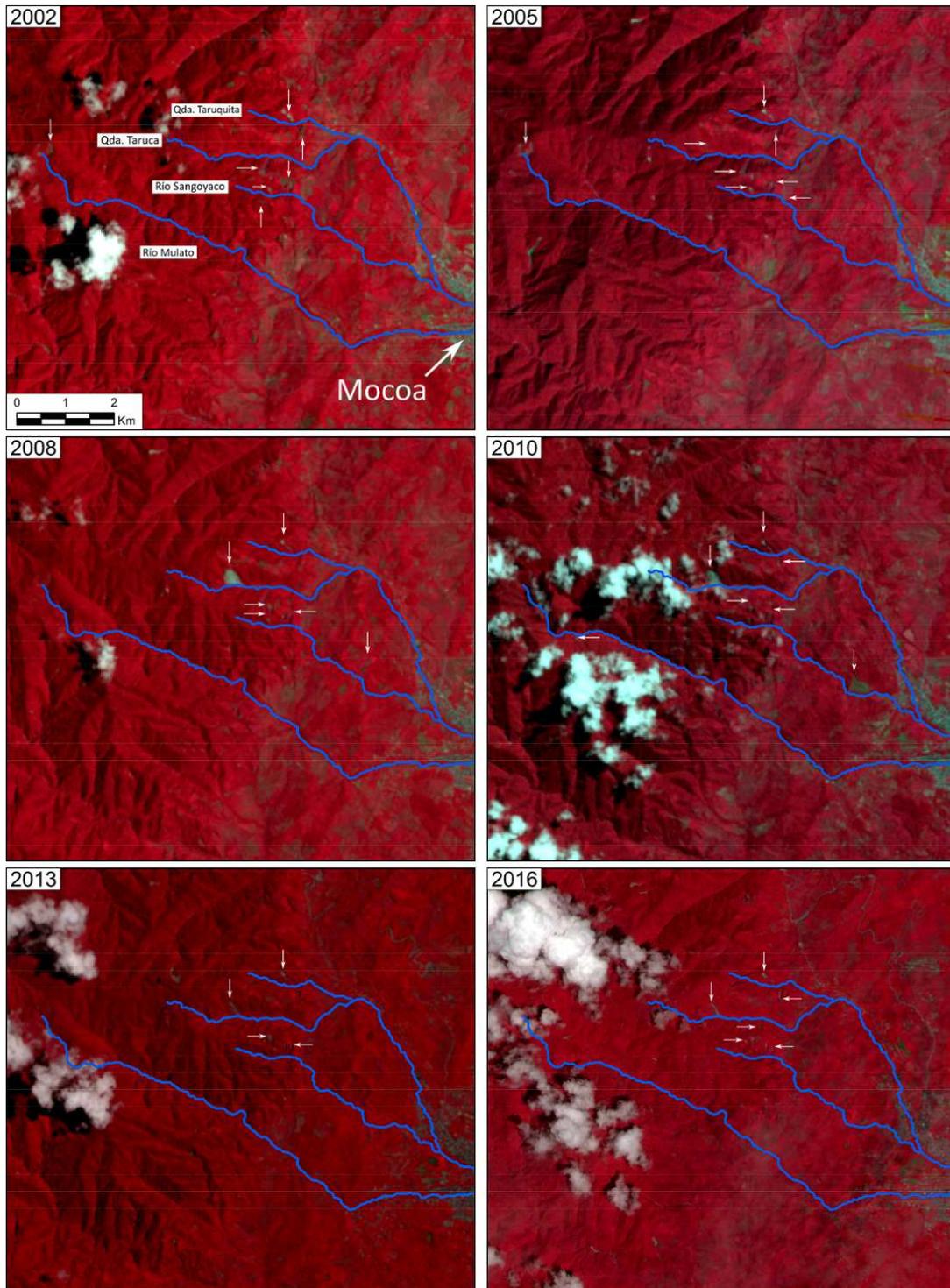


Figura 34. Análisis multitemporal a 15 años de los movimientos en masa detonados en las cuencas de estudio.

Las flechas indican movimientos en masa detonados en las márgenes de los cauces generando agradación de los mismos. Imágenes 2002-2010 (Landsat 7, R4-G3-B2), 2013 (Landsat 8, R5-G4-B3) y 2016 (Sentinel 2A, R8-G5-B3).

Como resultado de la dinámica de los movimientos en masa y formación de depósitos, fueron identificados al menos cinco represamientos (parciales y totales) durante el más reciente evento en La Taruquita y tres en La Taruca. En cada uno de estos represamientos, la formación de un embalse representa la acumulación de energía potencial la cual se transforma en energía cinética traslacional al momento de la ruptura, no sólo aumentando la velocidad del flujo, sino también la capacidad de éste para removilizar material particulado grueso del cauce (cf. Zhou et al., 2013; Shi et al., 2015). Debido a las condiciones de los canales se estima que los embalses en las quebradas Taruca y Taruquita no superaron los 25.000 m³, sin embargo la detonación en secuencia de estos movimientos es lo que permitió adquirir un volumen y velocidad considerable en poco tiempo (una hora) y corta distancia. (Figura 35).

La distancia entre la zona de descarga y el primer represamiento es crítica para entender las transiciones energéticas, i.e., entre más cerca se encuentre la presa de la zona de descarga, la energía cinética se ve disipada por la interacción del flujo con la base del represamiento (Zhou et al., 2013). Al momento de la ruptura del primer represamiento, el aumento en la concentración del material granular y la transición de la energía potencial en energía cinética, llevan a que el flujo adquiera la velocidad y capacidad para romper los represamientos cauce abajo, produciendo un efecto domino en el cual los incrementos de concentración de sólidos permite fácilmente el cambio de flujo de agua a flujo hiperconcentrado y de este a flujo de detritos. De acuerdo a las observaciones, la quebrada Taruquita generó al menos tres pulsos que aportaron grandes volúmenes de material sobre el cauce de la quebrada Taruca, material que posteriormente fue removilizado por el flujo principal a la altura de la confluencia de ambos cauces. Los represamientos y obstrucciones observados en la quebrada Taruquita indican que gran parte del material socavado perdió capacidad de transporte rápidamente debido a la baja pendiente y la presencia de obstrucciones, en algunos casos produciendo agradación del canal en la misma Taruquita. (Figura 35).

De acuerdo al espesor del depósito y la altura del flujo (obtenida en los elementos expuestos) se pueden estimar las variaciones de concentración de sólidos en el flujo teniendo en cuenta que un flujo de canal (canal de agua) tiene una concentración de menos de 10 %vol (o hasta 40%), un flujo hiperconcentrado entre 40-60 %vol hasta pasar finalmente a un flujo de detritos con >60% de sedimento (Costa y Schuster, 1988; Benvenuti y Martini, 2002; Pierson, 2005). Estos procesos de concentración y dilución corresponden a transformaciones de cuerpo, i.e., el desarrollo por variaciones de un flujo laminar a turbulento o viceversa sin pérdida de fluido intersticial, causado principalmente por adición de sedimento como producto de socavación de fondo y lateral en el lecho y las terrazas, así como ruptura de taludes (Fisher, 1983; Benvenuti y Martini, 2002). Este proceso es el que se desarrolla primero en ambas quebradas, debido a la concentración producto de la socavación tanto de fondo como lateral alcanzada después de la ruptura de los represamientos. Una vez el flujo alcanza la zona de deposición ocurren transformaciones de fluidización en las cuales el flujo parental sufre cambios reológicos longitudinales y transversales debido a pérdida de agua en la parte frontal del flujo,

llevando así a la fluidización del cuerpo y la cola del flujo (Fisher, 1983; Benvenuti y Martini, 2002). Estas transformaciones se observan por las variaciones laterales en el espesor y la textura de los depósitos.



Figura 35. Gradación del material del flujo de detritos sobre la margen izquierda de la quebrada Taruca horas después del evento del 31 de marzo de 2017.

Considerando la geomorfología de ambas cuencas es muy factible que se generen variaciones en la energía cinética, aumentando o disminuyendo la capacidad de erosión y entrada de material o la deposición del mismo (Cui et al., 2013). En aquellos sitios donde el drenaje se estrangula o donde existen represamientos parciales, se observa aceleración del flujo sin aumento o disminución de la descarga; por el contrario, en sitios donde hay curvas marcadas o amplificación del canal, el flujo tiende a desacelerar y se genera agradación en la parte interna (Cui et al., 2013).

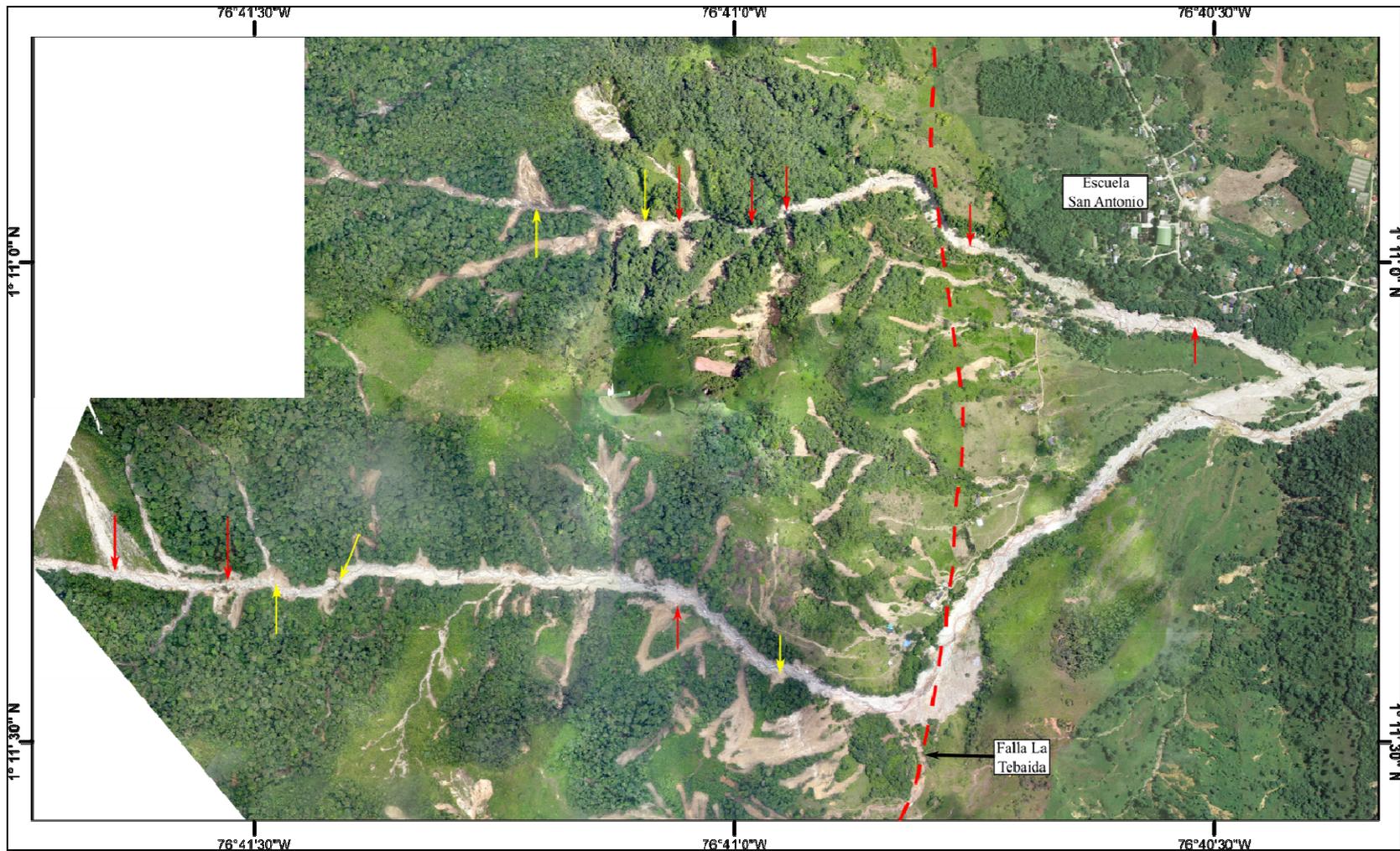


Figura 36. Ortofoto donde se observa la densidad de los movimientos en las quebradas Taruca (sur) y Taruquita (norte) en cercanías de la Falla Mocoa-La Tebaida (línea a trazos roja), así como la localización de las obstrucciones parciales o totales pre-evento (flechas rojas) y pos-evento (flechas amarillas).

3.4 Análisis hidrológico.

Con el objeto de conocer el comportamiento de la lluvia en el área de estudio se procedió a realizar el análisis de las series de tiempo de las estaciones del IDEAM con registros desde 1985 (Tabla 5) suministrados por el IDEAM, este análisis incluyó la estadística de los datos como: completitud, aleatoriedad, validez y curvas de doble masa. La serie homogénea de datos se consideró desde el año 1985 hasta el 2016 ya que para los anteriores años solo existen registros completos de las estaciones Campucana y Torre Tv San Francisco, lo cual impide realizar un análisis homogéneo en del área de estudio. La localización de las estaciones analizadas se presenta en la Figura 37.

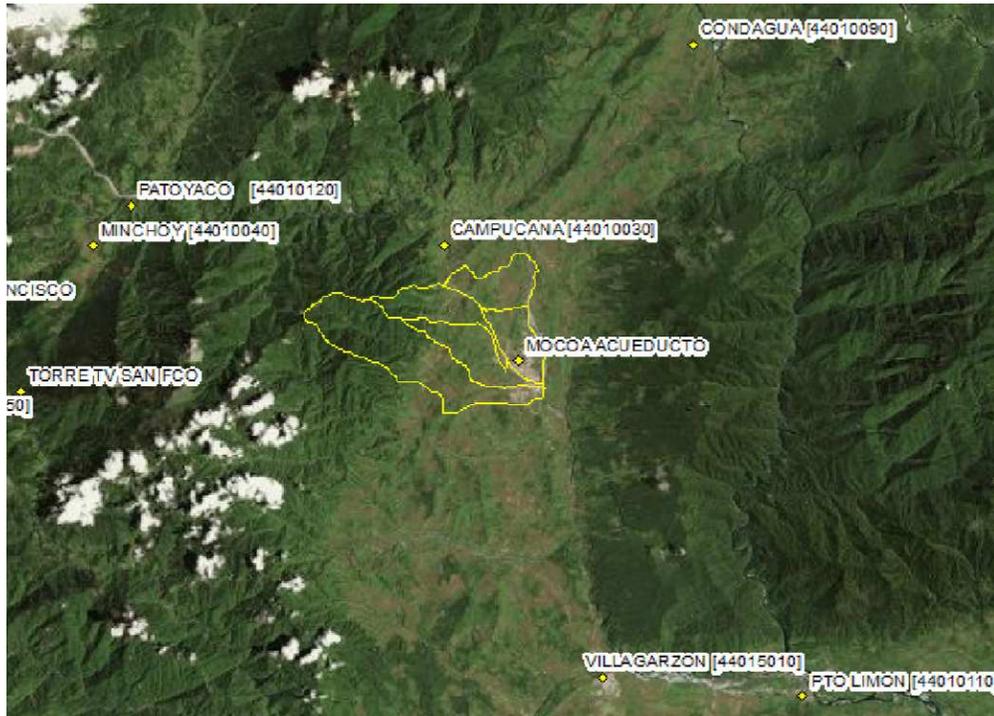


Figura 37. Localización de estaciones IDEAM en estudio.

Una vez terminada la revisión estadística se obtienen los valores de precipitación media multianual, isoyetas, máxima en 24 horas y periodos de retorno para distribución de Gumbel.

Tabla 5. Estaciones IDEAM analizadas.

ESTACION	CAT	COD	X	Y	Z
ACUEDUCTO	CO	44015040	619743	1047377	650
CAMPUCANA	PM	44010030	624737	1044148	1400
PTO LIMON	PM	44010110	605311	1059656	430
CONDAGUA	PM	44010090	633363	1054903	500
PATOYACO	PM	44010120	626415	1030646	1694
TORRE TV SAN FRANCISCO	PM	44010180	618424	1025862	3000

3.4.1 Precipitación media anual.

Los valores medios multianuales para las 6 estaciones analizadas presentan valores desde 3.272 mm/año para la estación Condagua localizada a 11.5 km al noreste del área de estudio y de 4.673 mm/año para la estación Torre TV San Francisco ubicada a 12.6 km al oeste del área de estudio. La estación Acueducto localizada dentro del área de estudio, al noroccidente del perímetro urbano de Mocoa, presenta un promedio de 3.813 mm/año tal y como se muestra en la Tabla 6 y Figura 38.

Los valores de mayor precipitación media anual se presentan en el año de 1.999 para la estación Pto Limón con 6.838 mm/año, seguido por Torre Tv San Francisco con 6.233 mm/año en 2.001, Campucana con 4.887 mm/año en 2.016, Patocayo con 4.673 mm/año en 2.015, Acueducto con 4.425 mm/año en 2.005 y por último Condagua con 3.971 mm/año en 2.005. Es importante mencionar que en la estación Patocayo el año 2.010 corresponde al año con más días de lluvia pero el menor valor medio de precipitación, similar a lo que ocurre con la estación de Condagua en 1.992, no obstante en la estación Pto Limón para el año 1.988 la precipitación media más baja coincide con el más bajo de días con lluvia. (Tabla 6). Lo descrito anteriormente indica un comportamiento variable e impredecible en las condiciones climáticas dentro del área de estudio, lo que se torna como una condición crítica para elaborar modelos hidroclimáticos de predicción para de eventos extremos.

Tabla 6. Valores anuales de precipitación media, mínima y máxima. (mm/año).

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PATUYACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
1985	3018.3	4062.1	2194.4			4491.5
1986	4123.0	4313.0	3104.1	3010.0		5193.5
1987	3971.0	4036.3	4542.7	3332.0		4916.0
1988	4233.9	4740.1	1875.3	3043.0		4753.9
1989	4086.1	4609.7	5195.8	3237.2		4817.2
1990	4364.7	4654.2	5167.6	3448.9		5729.9
1991	3582.9	4147.0	4896.7	3120.6		4447.9
1992	3206.3	3580.2	4550.9	2350.2		3993.3
1993	4054.3	4269.6	6051.6	3599.3		4685.4
1994	4276.3	4437.5	5738.0	3551.0		5104.1
1995	3240.1	3453.3	5286.2	2879.0		3130.3
1996	4010.6	3703.6	5286.2	3161.0		4142.1
1997	3805.4	3978.8	5993.7	3644.0		4612.7
1998	3204.5	3668.3	5745.1	3538.0		3835.3
1999	3718.5	4050.7	6838.5	3371.0	3836.1	4892.7
2000	3824.2	4077.7	5719.6	3569.0	3822.9	4880.1
2001	3399.7	4122.0	5591.1	3168.8	4374.3	6233.9

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PATUYACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
2002	3429.2	3502.7	6080.0	2948.7	3455.4	4743.3
2003	3627.3	3739.1	6104.1	3030.0	3468.6	4622.5
2004	3954.9	4240.8	5354.7	3737.0	3313.5	4642.4
2005	4425.8	3933.1	6453.3	3971.0	3763.9	4608.2
2006	3900.1	3598.8	6550.4	3661.8	3176.8	4204.3
2007	4420.7	4272.9	6037.3	3605.8	3444.8	4570.6
2008	3400.4	3164.0	5529.8	2988.0	3857.2	3774.4
2009	4147.6	3940.9	6349.4	3410.8	4005.1	4279.4
2010	3019.5	3436.3	5449.9	2651.0	2592.3	3243.9
2011	3441.3	3612.9	5204.9	3008.0	3565.7	4563.1
2012	3838.9	4228.8	5384.1	3423.0	4343.8	5231.2
2013	4191.2	4353.4	6410.4	3458.0	3516.5	4994.8
2014	4106.3	4177.5	6159.2	3129.8	4133.4	5290.0
2015	3751.7	4336.2	6236.0	3052.0	4673.1	5709.9
2016	4244.3	4887.0	5470.1	3338.0	4485.0	5221.9

MED	3813.1	4041.5	5392.2	3272.1	3768.2	4673.7
MAX	4425.8	4887.0	6838.5	3971.0	4673.1	6233.9
MIN	3018.3	3164.0	1875.3	2350.2	2592.3	3130.3

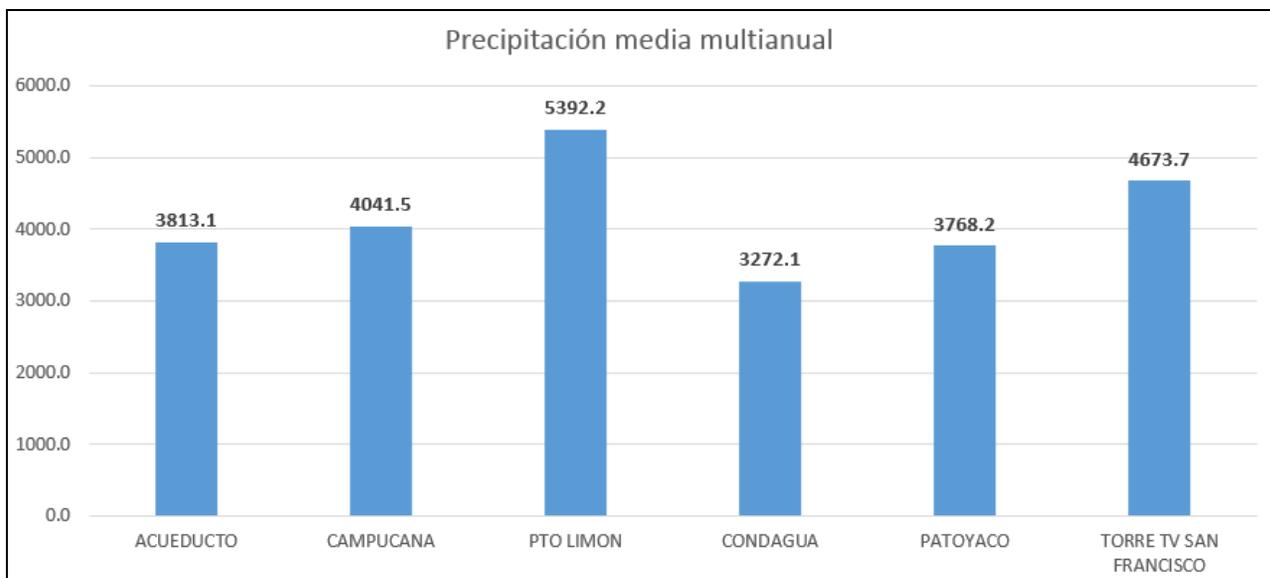


Figura 38. Histograma de precipitación media anual multianual.

3.4.2 Precipitación media mensual.

El comportamiento de la precipitación en el área de estudio es de tipo monomodal, es decir una sola temporada de lluvias que se extiende desde el mes de marzo hasta octubre, la precipitación más alta se da durante el mes de junio con valores medios de 531 mm/mes y mínimos de 241 mm/mes en enero. La época de transición se presenta en los meses de febrero a marzo cuando se intensifican las lluvias pasando de 250 mm/mes a 313 mm/mes (+63 mm) y de marzo a abril pasando de 313 mm/mes a 398 mm/mes (+85). (Tabla 7 y Figura 39).

Tabla 7. Precipitación media mensual.

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PATUYACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
ENERO	214.06	211.12	377.70	189.73	232.94	221.17
FEBRERO	223.39	222.16	371.28	204.38	233.91	239.20
MARZO	291.97	282.05	431.68	236.67	298.26	340.10
ABRIL	371.00	376.24	597.27	327.40	354.56	364.02
MAYO	442.61	508.98	597.05	369.29	403.40	510.35
JUNIO	482.89	553.78	563.58	374.33	493.92	720.86
JULIO	442.80	524.22	515.88	370.38	501.49	764.22
AGOSTO	341.95	367.90	380.97	270.61	334.78	518.32
SEPTIEMBRE	291.90	302.06	360.00	231.70	279.65	314.08
OCTUBRE	246.25	254.04	401.51	215.65	210.62	246.48
NOVIEMBRE	239.69	222.47	433.80	215.63	203.53	221.00
DICIEMBRE	224.32	216.50	458.25	210.71	229.62	217.81

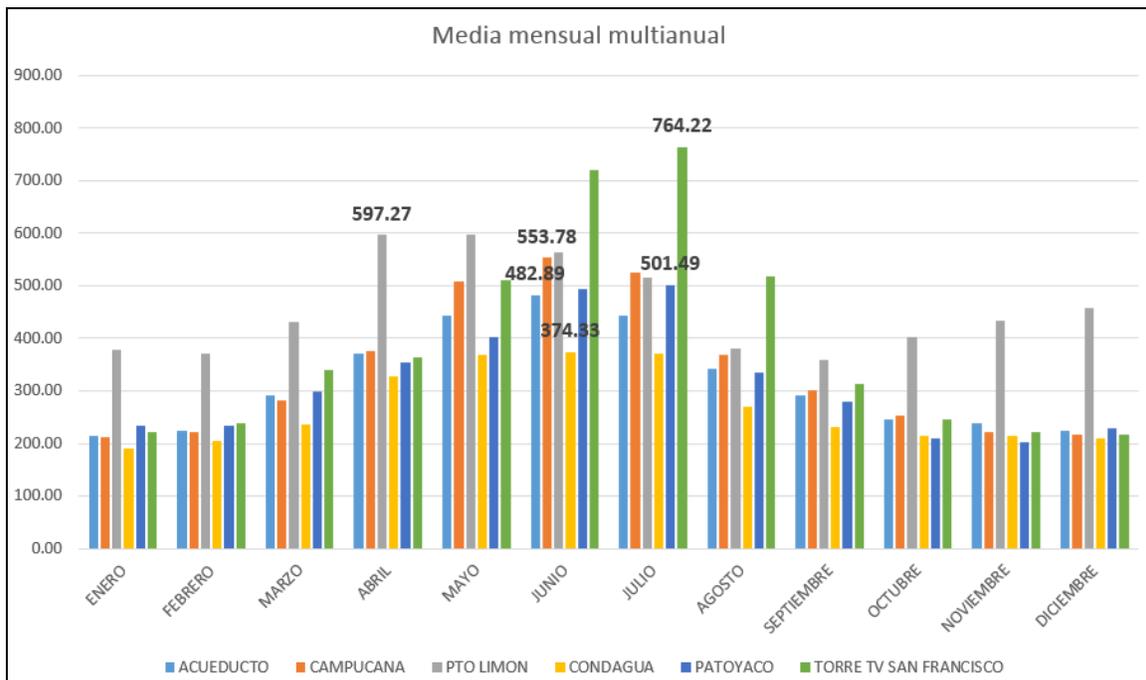


Figura 39. Histograma de precipitación media mensual multianual. (mm/mes).

La estación que registra mayor precipitación media mensual es Torre Tv San Francisco con un valor de 764 mm en el mes de julio, mientras que Pto Limón presenta 597 mm en promedio para los meses abril y mayo, por su parte Condagua, Campucana y Acueducto registran 374 mm, 553 mm y 485 mm en el mes de junio respectivamente.

3.4.3 Días con lluvia.

Por otra parte, la estación que presenta más día con lluvia en el año es Pto Limón con 266 días en 1985, seguida por Condagua con 231 para 1992, 154 días para Potoyaco en 2010, 145 para Acueducto en 2001, 142 para Campucana en 2010 y por ultimo 103 en Torre Tv San Francisco en 2010. Para la estaciones como Campucana, Patoyaco y Torre Tv San Francisco existe coincidencia entre los valores de días de lluvia y en el año 2010, sin embargo las demás 3 estaciones presentan valores dispersos entre 1985 y 2001. (Tabla 8).

Tabla 8. Días con lluvia.

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PATUYACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
1985	144.0	106.0	266.0	202.0		97.0
1986	80.0	92.0	223.0	147.0		56.0
1987	81.0	89.0	179.0	179.0		48.0
1988	74.0	61.0	75.0	193.0		65.0
1989	60.0	55.0	121.0	191.0		45.0
1990	67.0	64.0	163.0	180.0		45.0
1991	83.0	56.0	183.0	205.0		52.0
1992	81.0	73.0	176.0	231.0		58.0
1993	55.0	54.0	134.0	179.0		48.0
1994	80.0	65.0	112.0	103.0		44.0
1995	137.0	103.0	114.0	173.0		80.0
1996	102.0	101.0	83.0	163.0		56.0
1997	104.0	94.0	91.0	133.0		51.0
1998	111.0	94.0	102.0	169.0		58.0
1999	112.0	95.0	83.0	140.0	47.0	88.0
2000	117.0	83.0	83.0	138.0	74.0	66.0
2001	145.0	119.0	101.0	183.0	102.0	79.0
2002	91.0	102.0	100.0	138.0	85.0	56.0
2003	124.0	109.0	103.0	140.0	83.0	58.0
2004	109.0	122.0	104.0	143.0	98.0	65.0
2005	81.0	126.0	97.0	138.0	114.0	62.0
2006	74.0	92.0	89.0	114.0	103.0	52.0
2007	104.0	101.0	93.0	108.0	101.0	63.0
2008	94.0	128.0	91.0	98.0	111.0	82.0
2009	64.0	104.0	78.0	94.0	111.0	55.0

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PAToyACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
2010	104.0	142.0	111.0	129.0	154.0	103.0
2011	101.0	125.0	108.0	139.0	148.0	90.0
2012	86.0	118.0	79.0	117.0	129.0	69.0
2013	68.0	105.0	79.0	99.0	140.0	63.0
2014	70.0	96.0	94.0	182.0	118.0	55.0
2015	69.0	84.0	86.0	142.0	83.0	52.0
2016	91.0	100.0	118.0	152.0	111.0	70.0
MED	93	96	116	151	106	63
MAX	145.0	142.0	266.0	231.0	154.0	103.0
MIN	55.0	54.0	75.0	94.0	47.0	44.0

3.4.4 Precipitación máxima en 24 horas.

En cuanto a los valores máximos en 24 horas se tiene que la estación con mayor registro es Torre Tv San Francisco con 212 mm/24h, seguida por Patoyaco con 200 mm/24h, Pto Limón con 193 mm/24h, Acueducto con 168 mm/24h, Campucana con 158 mm/24h y Condagua con 122mm/24h. (Tabla 9).

Tabla 9. Precipitación máxima en 24 horas.

	ACUEDUCTO	CAMPUCANA	PTO LIMON	CONDAGUA	PAToyACO	TORRE TV SAN FRANCISCO
1985	168.3	129.5	90.5	53.0		127.6
1986	81.9	90.0	134.9	90.0		138.2
1987	113.3	108.5	114.3	55.0		97.3
1988	118.0	155.3	100.3	55.0		100.0
1989	117.0	158.5	144.5	55.0		151.1
1990	136.0	136.7	193.0	57.0		152.8
1991	91.3	111.8	189.2	77.0		100.2
1992	93.5	122.8	129.3	51.0		120.0
1993	107.5	120.2	182.6	105.0		86.2
1994	119.5	115.2	185.7	100.0		118.3
1995	84.0	82.8	134.6	81.0		108.3
1996	82.6	90.8	134.2	54.0		83.4
1997	120.5	126.0	118.2	83.0		90.6
1998	110.3	98.0	160.0	122.0		117.8
1999	81.6	76.0	133.3	92.0	80.5	76.8
2000	123.3	111.8	132.7	83.0	91.0	98.5
2001	94.9	116.0	132.7	87.0	200.9	212.0

2002	103.4	100.0	128.3	100.0	87.1	99.8
2003	94.7	130.0	149.3	55.0	99.0	87.6
2004	107.8	95.0	120.0	84.0	83.5	128.3
2005	124.7	129.6	148.2	87.0	89.0	72.4
2006	119.5	120.3	118.2	84.0	69.4	171.8
2007	168.0	111.7	137.2	75.0	86.5	90.2
2008	90.5	130.7	101.2	85.0	99.0	87.3
2009	86.5	124.7	126.2	80.0	90.2	72.7
2010	93.5	110.0	111.2	72.0	62.2	75.8
2011	100.0	121.4	139.1	101.0	111.0	107.8
2012	124.0	130.0	125.6	80.0	120.0	136.2
2013	118.0	113.0	132.2	85.0	114.0	99.6
2014	109.0	133.2	137.4	80.0	152.0	112.5
2015	84.0	113.1	146.0	70.0	78.3	119.8
2016	119.5	117.9	130.0	90.0	185.0	99.4

MAX **168.3** **158.5** **193.0** **122.0** **200.9** **212.0**

3.4.5 Isoyetas.

A partir de los valores máximos en 24 horas y con el uso de la herramienta en línea SMADA (<http://smadaonline.com/MenuSTATS.aspx>) se obtienen las distribuciones de probabilidad de la precipitación con el método de Gumbel, junto con los valores extremos para los periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200 y 500 años. Como ejemplo, en la Tabla 10 y Figura 40 se presenta la distribución de Gumbel para la estación Acueducto.

Tabla 10. Valores de distribución de Gumbel para valores extremos de precipitación máxima en 24 horas.

First Moment	108.956
Second Moment	474.366
Third Moment	10,164.35
Skew	0.9838
Distribution Method	Gumbel
Number of Points	32
Maximum	168.3
Minimum	81.6

Plot Position	Actual Data	Predicted Data
0.0303	81.6	77.8413
0.0606	81.9	81.6825
0.0909	82.6	84.3985
0.1212	84	86.6203

Plot Position	Actual Data	Predicted Data
0.1515	84	88.5634
0.1818	86.5	90.3298
0.2121	90.5	91.9775
0.2424	91.3	93.5431
0.2727	93.5	95.0517
0.303	93.5	96.5219
0.3333	94.7	97.9683
0.3636	94.9	99.4028
0.3939	100	100.8358
0.4242	103.4	102.277
0.4545	107.5	103.7353
0.4848	107.8	105.22
0.5152	109	106.7405
0.5455	110.3	108.3071
0.5758	113.3	109.9314
0.6061	117	111.6267
0.6364	118	113.4088
0.6667	118	115.2971
0.697	119.5	117.3158
0.7273	119.5	119.4966
0.7576	119.5	121.8815
0.7879	120.5	124.5292
0.8182	123.3	127.5252
0.8485	124	131.0014
0.8788	124.7	135.1783
0.9091	136	140.4688
0.9394	168	147.7991
0.9697	168.3	160.1233

	Return Period	Probability	Prediction
Return Periods	500	0.998	207.627
	200	0.995	191.6711
	100	0.99	179.577
	50	0.98	167.4386
	25	0.96	155.2099
	20	0.95	151.2402
	10	0.9	138.726
	5	0.8	125.6798
	2.33	0.5708	109.6621

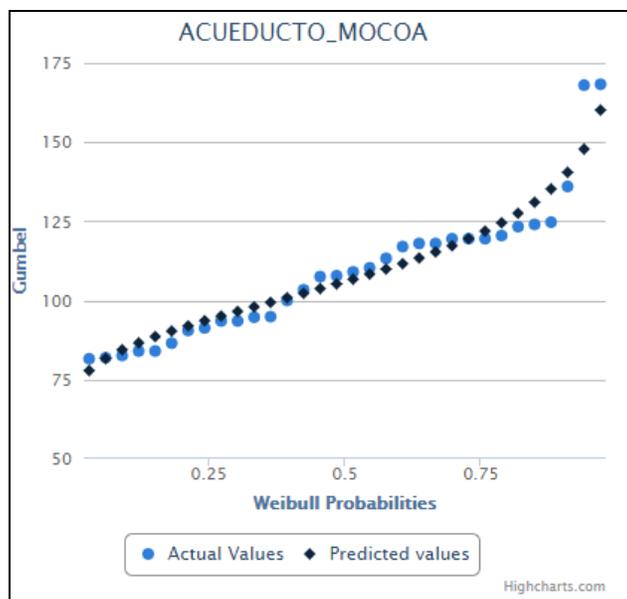


Figura 40. Curva de predicción.

Con los valores obtenidos se procede a construir las isoyetas de precipitación para valores medios anuales, máximos en 24 horas y periodos de retorno de 2.33, 25, 50 y 100 años. (Tablas 11 y 12)

Tabla 11. Valores de precipitación media y máxima en 24 horas para cada una de las 6 estaciones en estudio.

ESTACION	CAT	COD	X	Y	Z	PM	Pmax
ACUEDUCTO	CO	44015040	619743	1047377	650	3813.1	168.3
CAMPUCANA	PM	44010030	624737	1044148	1400	4041.5	158.5
PTO LIMON	PM	44010110	605311	1059656	430	5392.2	193.0
CONDAGUA	PM	44010090	633363	1054903	500	3194.3	122.0
PATUYACO	PM	44010120	626415	1030646	1694	3768.2	200.9
TORRE TV SAN FRANCISCO	PM	44010180	618424	1025862	3000	4673.7	212.0

Tabla 12. Valores de precipitación para periodos de retorno de 2.33, 5, 10, 20, 25, 50, 100, 200 y 500.

ESTACION	Periodo de Retorno								
	2.33	5	10	20	25	50	100	200	500
ACUEDUCTO	109.7	125.7	138.7	151.2	155.2	167.4	179.6	191.7	207.6
CAMPUCANA	117.2	130.7	141.8	152.4	155.7	166.1	176.3	186.6	200.1
PTO LIMON	137.0	155.1	169.9	184.0	188.5	202.3	216.0	229.6	247.6
CONDAGUA	79.6	92.5	103.1	113.2	116.4	126.3	136.1	145.9	158.8
PATUYACO	107.5	139.3	165.2	190.0	197.9	222.2	246.3	270.3	301.9
TORRE TV SAN FRANCISCO	111.6	134.2	152.5	170.2	175.8	193.0	210.1	227.1	249.6

En las Figuras 41 a 47 se muestran las isoyetas de precipitación media anual , máxima en 24 horas y los TR2.33, 5, 25, 50 y 100 años, en las que se puede observar un claro comportamiento de elevadas precipitaciones en la cuenca alta y media de las cuencas de los ríos Mulato y Sangoyaco y microcuenca de la quebrada Taruca. Se resalta que la isoyeta de TR2.33 presenta una influencia muy marcada sobre el nacimiento de la quebrada Taruca y río Sangoyaco, mientras que para el río Mulato se observa sobre la parte media (Figura 43).

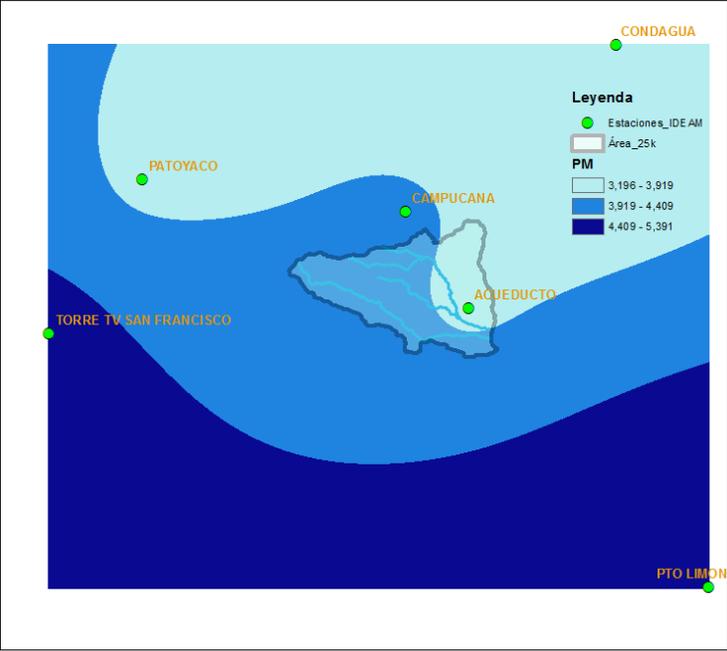


Figura 41. Isoyetas de precipitación media.

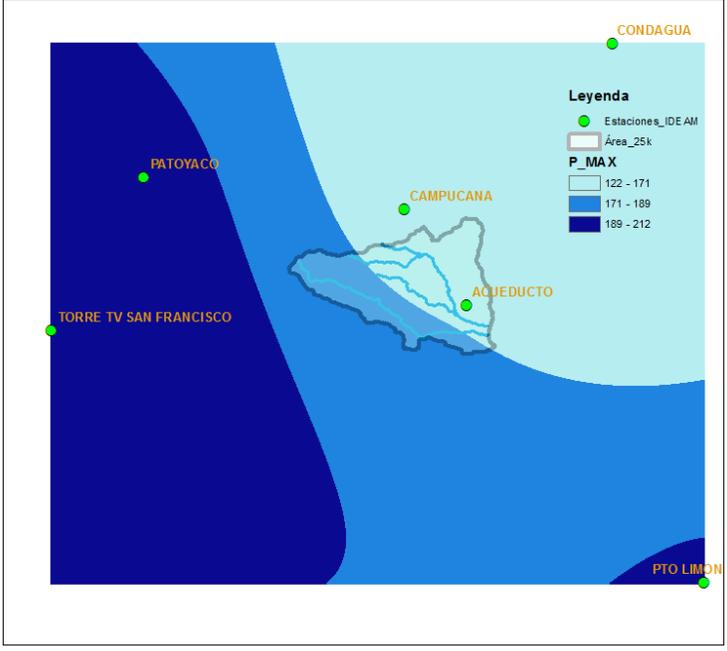


Figura 42. Isoyetas de precipitación máxima.

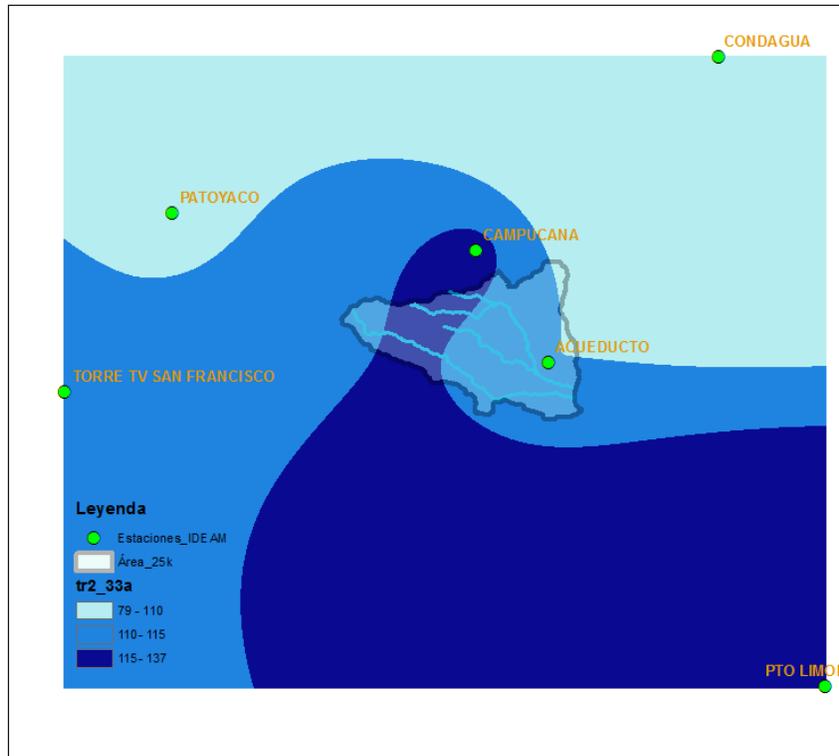


Figura 43. Isoyetas de precipitación para Tr2.33.

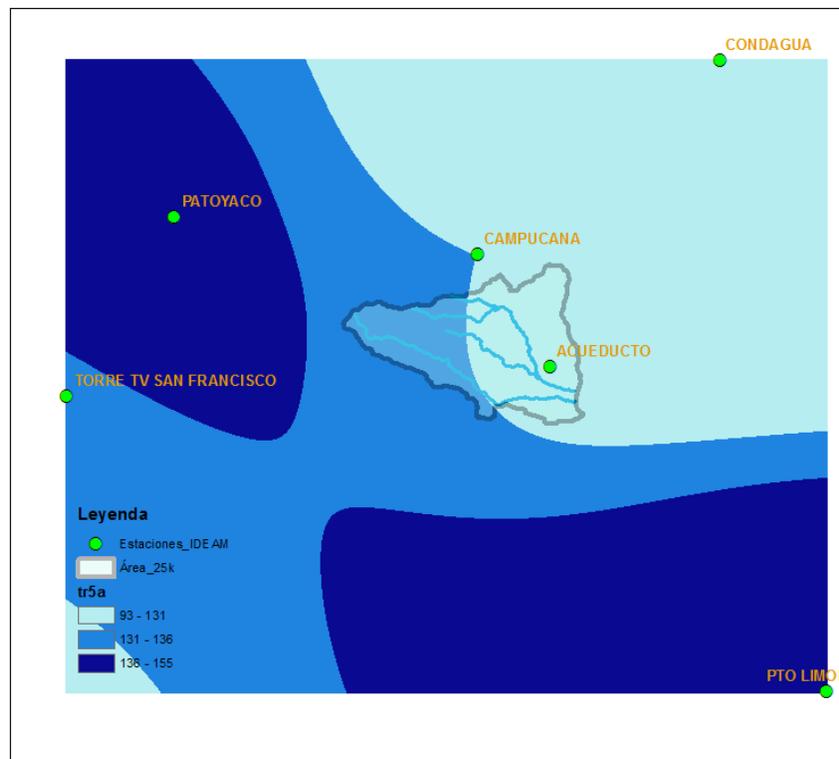


Figura 44. Isoyetas de precipitación para Tr5.

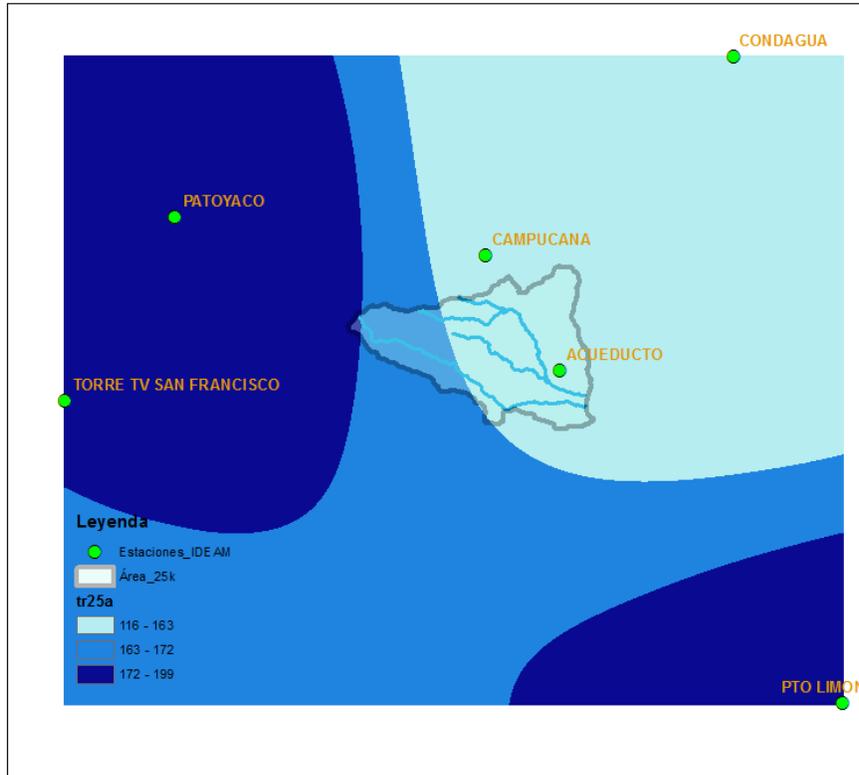


Figura 45. Isoyetas de precipitación para Tr25.

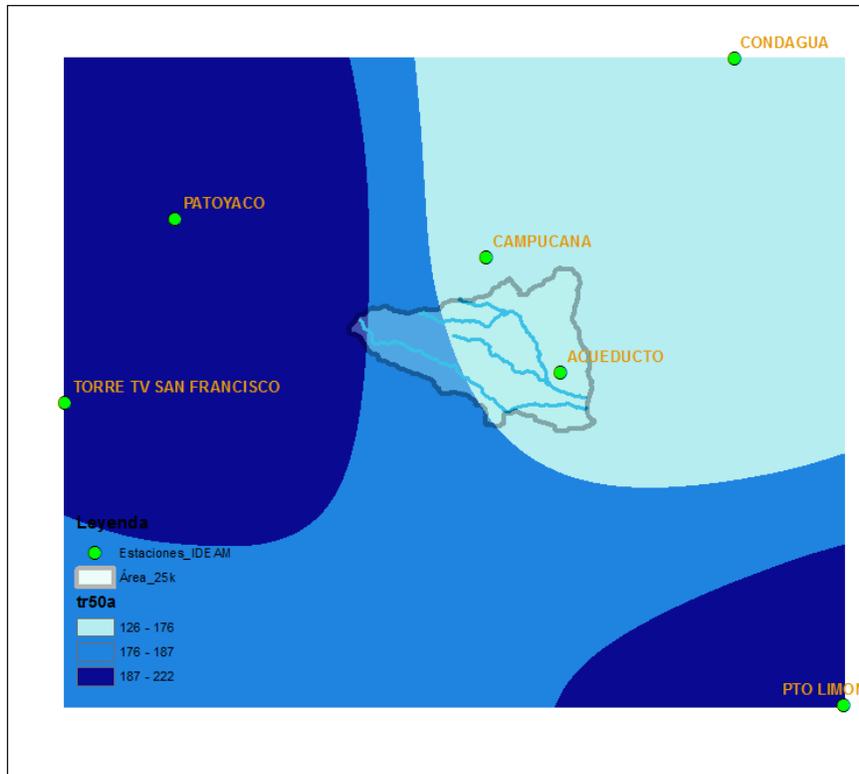


Figura 46. Isoyetas de precipitación para Tr50.

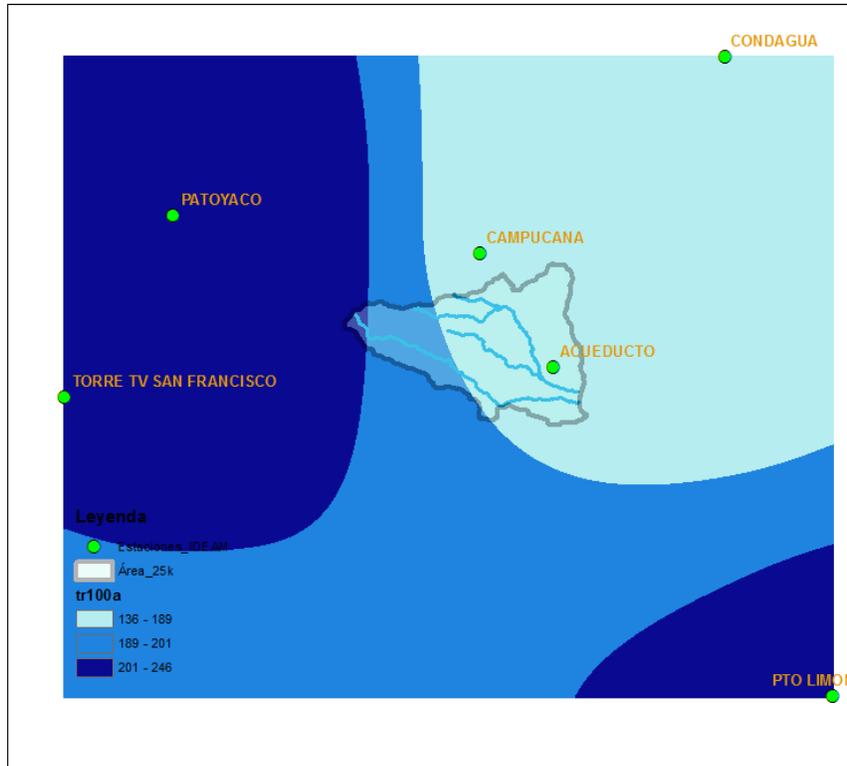


Figura 47. Isoyetas de precipitación para Tr100.

4 CALIBRACIÓN DEL EVENTO.

4.4 Condiciones de borde.

Después del evento del 31 de marzo de 2017 el SGC desplazó un grupo de profesionales en ingeniería y geología que registraron datos con los que se delimitó el alcance de los distintos flujos y sus condiciones dinámicas, con estos parámetros medidos en campo y los resultados en la aplicación de ecuaciones empíricas se propone en este numeral realizar una comparación con los resultados obtenidos a partir de modelación con la herramienta FLO2D esto con el objetivo de establecer un orden de magnitud e incertidumbre del modelo, dadas las condiciones particulares de la avenida torrencial en estudio.

Es de aclarar que las microcuencas y cuencas en estudio no están instrumentada, por lo que la calibración como tal del evento del 31 de marzo de 2017 se restringe únicamente a la comparación de las áreas obtenidas en campo con las modeladas con el FLO2D.

4.4.1 Parámetros del Modelo.

El insumo básico para la modelación es el modelo digital del terreno MDT el cual fue suministrado por el IGAC, cuya resolución es de 5 metros, originado por el sensor GeoSAR y del que se detallan sus especificaciones y ajustes en el numeral “2.4.2 Cartografía y sensores remotos”. Las mallas definidas para interpolación del modelo son de 10 m x 10 m para la calibración del evento y de 6 m x 6 m para la zonificación de amenaza por flujo de detritos, ambas sobre un área que integra las microcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y río Sangoyaco en un área de 2.410 hectáreas; la segunda área es integrada por la cuenca del río Mulato en un área de 1.894 hectáreas. Los hidrogramas de entrada fueron definidos a partir de los registros pluviométricos y pluviográficos del IDEAM para la estación Acueducto, concentraciones volumétricas de sólidos con variaciones desde el 30% hasta 45%.

4.4.2 Lluvia de diseño.

Es importante mencionar que la estación con mayor influencia dentro del área de estudio es la del Acueducto, además cuenta con información pluviográfica que en adelante será considerada como marco para la calibración del modelo. Esta información fue obtenida del sistema de información en línea del IDEAM hydras3 (Figura 48 y 49), de la cual se obtienen los valores de la precipitación antes y para el día del evento y que a su vez es comparada con la información pluviométrica para relacionarla y obtener un orden de magnitud.

Con los registros pluviométricos y pluviográficos se define el valor del hidrograma de entrada para las distintas iteraciones en el modelo y que funcionan de manera puntual (represamientos y/o ruptura de dique) en cada uno de los puntos detectados en campo y establecidos como áreas de represamiento. Así mismo fue aplicada como lluvia

distribuida sobre el área de estudio en modelación, con el objetivo de observar el comportamiento del flujo y las áreas afectadas.

Haciendo uso del software FLO2D se iteraron varios escenarios hasta obtener el que mejor ajuste proporcionaba respecto de las áreas de afectación, comparándolas con las dejadas por el evento del 31 de marzo de 2017. De esta manera se encontró que el número adecuado de hidrogramas para el modelo era de 9 con variaciones de concentración de sólidos desde el 30% hasta 45% tal y como se observa en la Tabla 13 y Figura 50.

Tabla 13. Hidrograma de diseño.

Tiempo (horas)	Precipitación (mm)	Concent/Vol (%)
0	0	0.3
0.667	0.4	0.3
0.833	1.5	0.3
1	0.7	0.3
1.167	0.1	0.3
1.3	0.3	0.3
1.5	0	0.3
2	1.3	0.35
2.1	6	0.35
2.3	0.8	0.35
2.5	0.3	0.35
2.6	0.1	0.35
2.833	2.8	0.35
3	9.2	0.35
3.1	9	0.35
3.3	12.1	0.35
3.5	10.8	0.35
3.67	12.3	0.35
3.8	9.3	0.35
4	9.3	0.35
4.1	1.4	0.45
4.3	5.5	0.45
4.5	3.9	0.45
4.6	1.1	0.45
4.8	0.7	0.45
5	0.5	0.45
5.1	0.7	0.45
5.3	0.8	0.45
5.5	0.5	0.45
5.6	1.9	0.45

Tiempo (horas)	Precipitación (mm)	Concent/Vol (%)
5.8	0.9	0.45
6	0.1	0.45
6.1	0.4	0.45
6.3	0	0.45
6.8	1.6	0.45
7	7.5	0.45
7.1	1	0.45
7.3	0.4	0.45
7.5	0.1	0.45
7.8	11.5	0.45
8	11.3	0.45
8.1	15.1	0.45
8.3	13.5	0.45
8.5	15.4	0.45
8.6	11.6	0.45
8.8	11.6	0.45
9	1.8	0.45
9.1	6.9	0.45
9.3	4.9	0.45
9.5	1.4	0.45
9.6	0.9	0.45
9.8	0.6	0.4
10	0.9	0.4
10.1	1	0.4
10.3	0.9	0.4
10.5	0.5	0.4
10.66	0.5	0.4
10.8	0.4	0.4
11	0.4	0.4
11.1	0.5	0.4

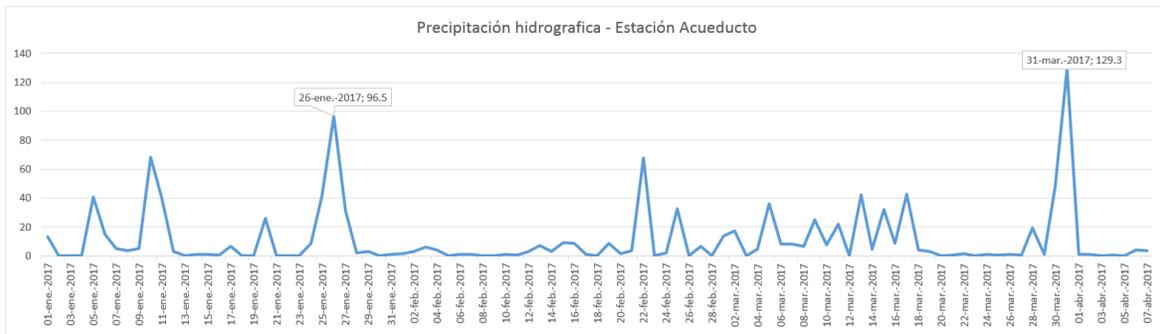


Figura 48. Hidrograma estación Acueducto (01 de enero de 2017 – 07 abril de 2017).



Figura 49. Intensidades de precipitación para el día 31 de marzo de 2017.

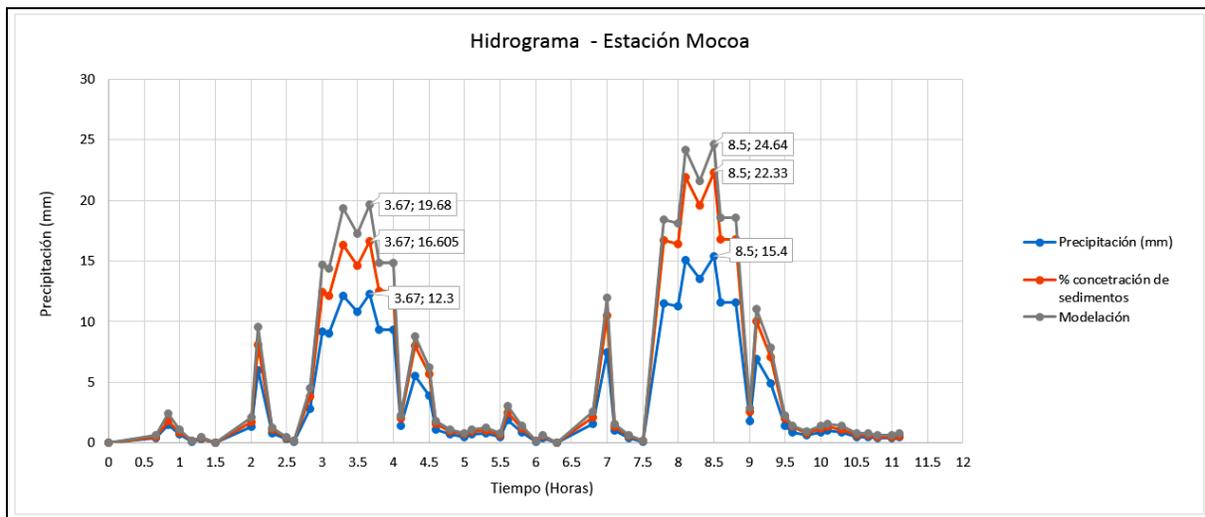


Figura 50. Hidrograma de diseño para el día 31 de marzo de 2017 y valores de intensidad.

4.4.3 Secciones de diseño.

Con el objetivo de conocer el caudal líquido y sólido transitado por el modelo se han establecido 13 secciones específicas así: dos sobre la quebrada Taruquita, seis en la quebrada Taruca, una en la quebrada San Antonio, una en el río Sangoyaco y dos en el río Mulato, tal y como se observa en las Figuras 51, 52 y 53 para 13 secciones, siete (7) en la quebrada Taruca, dos (2) en la quebrada Taruquita, una (1) en la quebrada San Antonio, una (1) el río Sangoyaco y una (1) el río Mulato. (Figuras 51, 52 y 53).

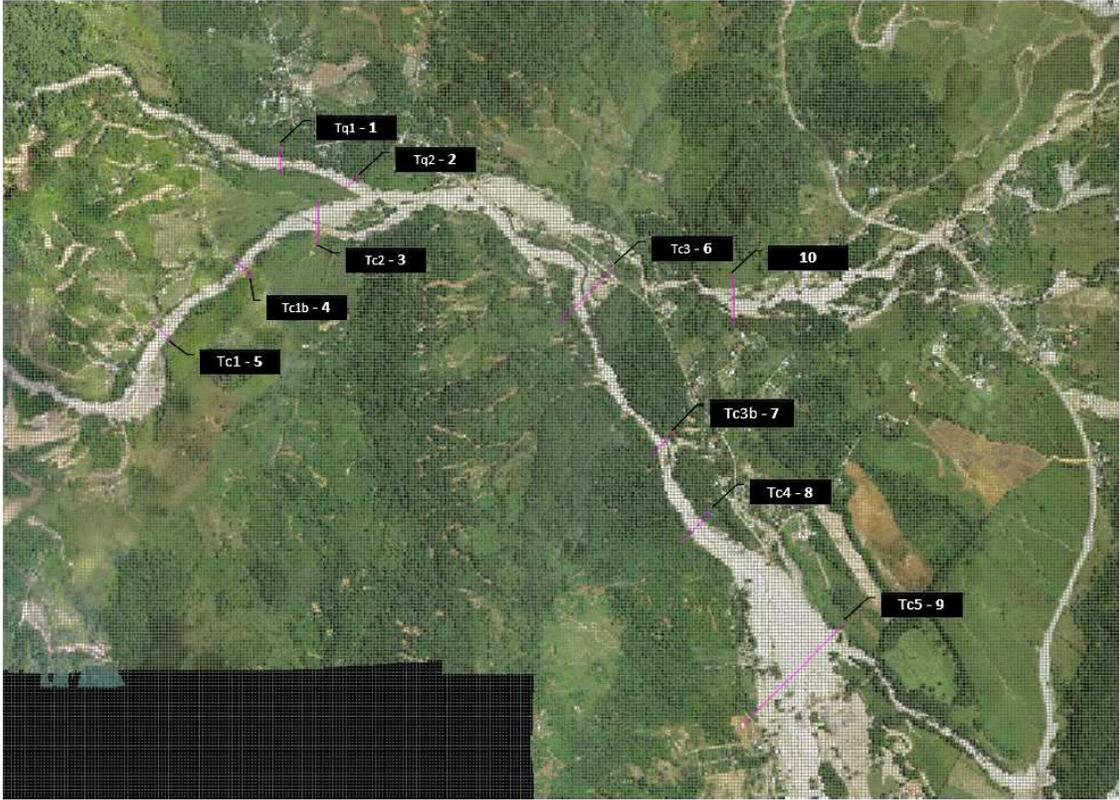


Figura 51. Localización de las secciones de análisis para la generación de hidrogramas en la quebrada Taruca, Taruquita y San Antonio.

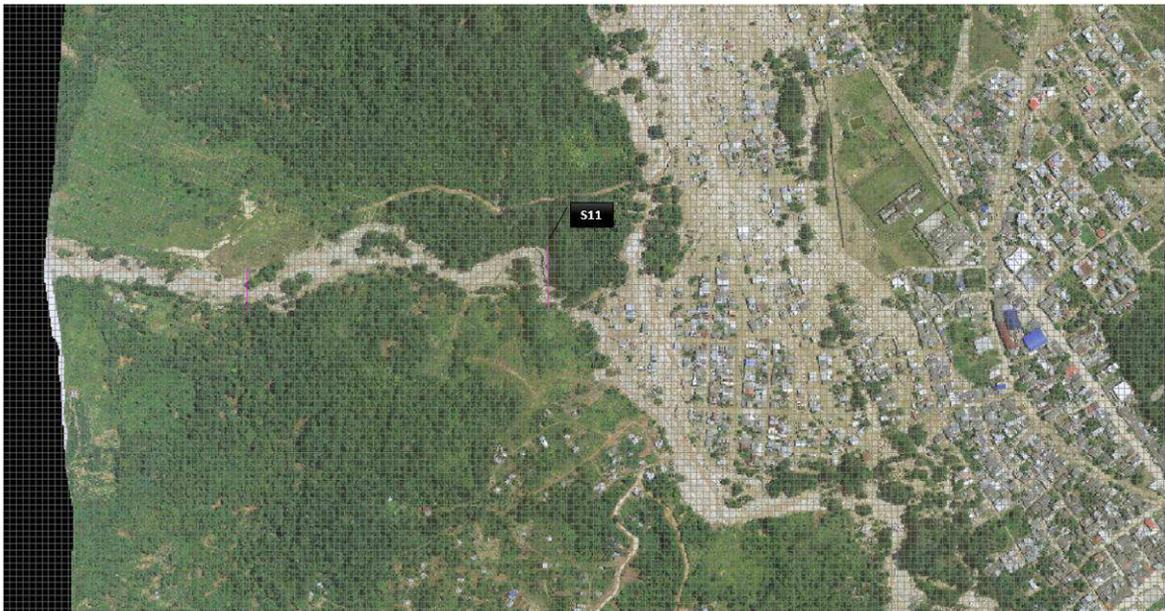


Figura 52. Localización de la sección sobre el río Sangoyaco.

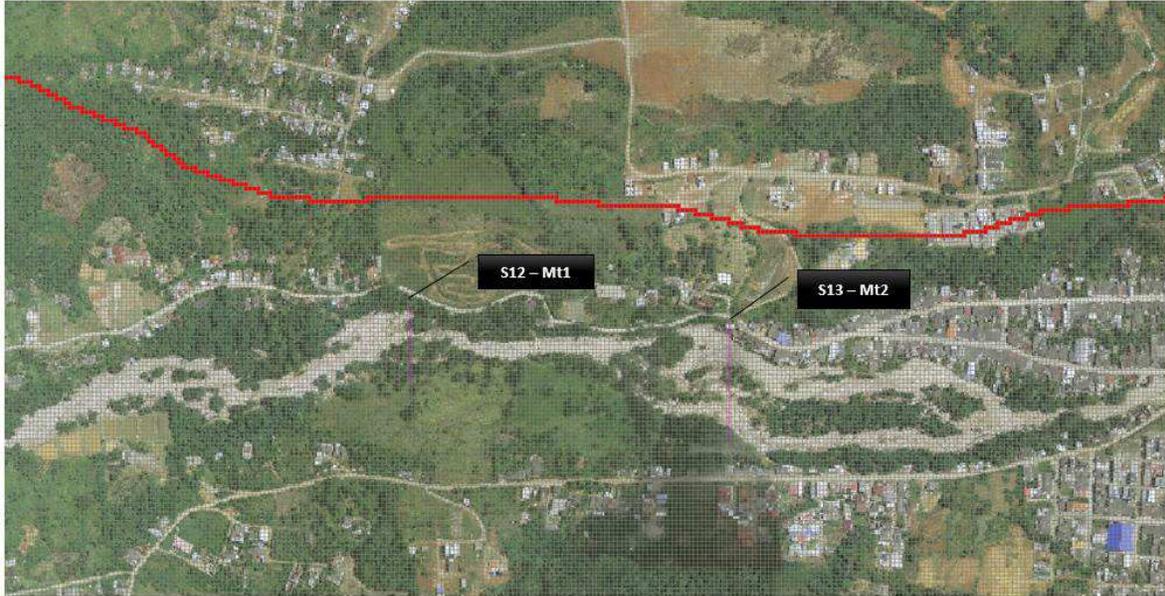


Figura 53. Localización de las secciones sobre el río Mulato.

4.4.4 Análisis de Laboratorio.

Se realizaron 31 ensayos granulométricos, 34 de gravedad específica, 31 hidrometrías y 34 de humedad específica a partir de muestras tomadas desde la parte alta de la cuenca de las quebradas Taruca y Taruquita hasta la zona del abanico donde desemboca al río Sangoyaco, sobre las quebradas San Antonio y El Carmen y a lo largo de los cauces de los ríos Sangoyaco y Mulato. Los ensayos de laboratorio fueron desarrollados por el laboratorio del SGC cuyos resultados se presentan en el Anexo A en archivos de tipo .gdb y .xls., la granulometría integrada de las muestras se presenta en la Figura 54 y la ubicación general de los muestreos en las Figuras 55 y 56.

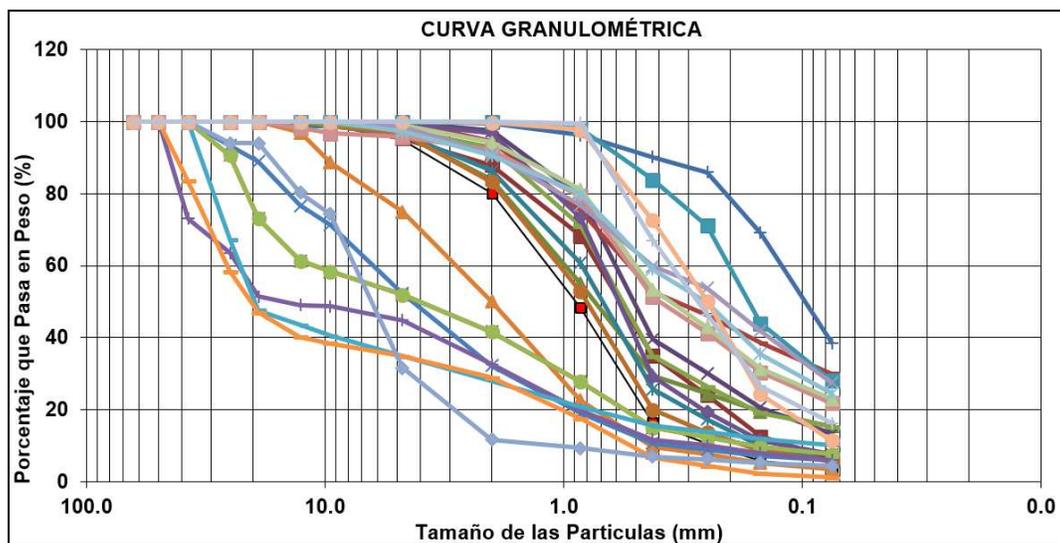


Figura 54. Granulometrías de los lechos de las quebradas Taruquita, Taruca, San Antonio y El Carmen y de los ríos Sangoyaco y Mulato.



Figura 55. Localización general de muestreos.

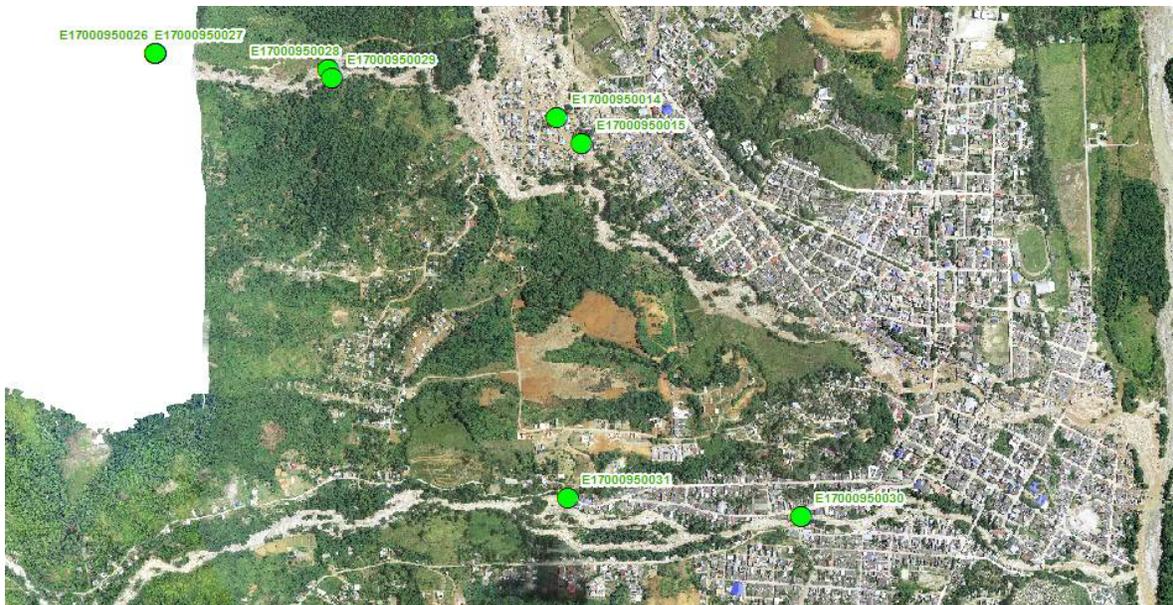


Figura 56. Localización general de muestreos.

4.5 Descripción del modelo matemático.

FLO2D Pro es una herramienta que integra un modelo bidimensional de diferencias finitas que simula flujo de fluidos no-newtonianos, como aludes torrenciales. El modelo está conformado por diferentes componentes entre los que se encuentra la representación matemática de los procesos físicos que gobiernan a los flujos hiperconcentrados de sedimentos como el flujo de lodos y escombros, permite además simular flujos en topografías complejas, así como el intercambio de fluido entre los canales y conos de deyección; modela también flujo de agua y una amplia gama de flujos hiperconcentrados como avenidas de lodo, flujos de lodo y flujos de detritos.

Utiliza un modelo reológico cuadrático para predecir los diferentes esfuerzos que se presentan en el movimiento del fluido, que incluye el análisis de los esfuerzos cortantes de Bingham, los esfuerzos dispersivos y turbulentos. El uso de este modelo cuadrático permite modelar no solamente el comportamiento de los flujos de lodo que están dominados por los esfuerzos viscosos, sino también, aquellos cuyos esfuerzos turbulentos sean importantes en la matriz de movimiento, el programa es capaz de delimitar las zonas de amenaza y establecer para ésta, categorías alta, media y baja, de acuerdo al periodo de retorno del detonante.

Este software simula el comportamiento del flujo, en un régimen de flujo no permanente y variado, lo que implica, que es capaz de reproducir el comportamiento de una onda de creciente tanto de agua, como de agua y sedimentos (flujos hiperconcentrados, de lodos y de detritos).

4.5.1 Ecuaciones que describen el movimiento del flujo.

Las ecuaciones que fundamentan el modelo matemático del software son la ecuación de continuidad del flujo y la ecuación de onda dinámica para la cantidad de movimiento, ecuaciones, que definen el movimiento como cuasi-bidimensional, puesto que la ecuación de momentum es resuelta empleando la velocidad promedio del flujo en los bordes de una celda de la malla de cálculo, la cual cuenta con ocho posibles direcciones del flujo: Norte, este, sur, oeste, noreste, sureste, suroeste y noroeste. Las ecuaciones son las siguientes:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h V_x}{\partial x} = i \quad (11)$$

Ecuación de la cantidad de movimiento o de momentum:

$$S_{fx} = S_{ox} - \frac{\partial h}{\partial x} - \frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x} - \frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t} \quad (12)$$

Donde:

V_x	Componente promedio de la velocidad en una celda; esta velocidad es esencialmente unidimensional y se calcula independiente de la dirección; es decir, el cálculo de la velocidad es esencialmente unidimensional.
S_{fx}	Pendiente de la línea de energía, o pendiente de fricción
S_{ox}	Pendiente del lecho
h	Profundidad del flujo
g	Aceleración de la gravedad
i	Intensidad de lluvia de exceso
t	Tiempo

La ecuación de cantidad de movimiento consta de varios términos:

S_{ox} , que corresponde a la pendiente del lecho, $\frac{\partial h}{\partial x}$ que es el término que involucra la presión en el flujo, $\frac{V_x}{g} \frac{\partial V_x}{\partial x}$ es la aceleración convectiva y $\frac{1}{g} \frac{\partial V_x}{\partial t}$ es la aceleración local.

S_{fx} es la pendiente de la línea de energía y depende de tres tipos de esfuerzos: un esfuerzo producido por la fricción entre el flujo y las paredes del canal, un esfuerzo inicial de cedencia y un esfuerzo producido por la viscosidad del flujo.

$$S_f = \frac{\tau_y}{\gamma_m h} + \frac{K \eta V}{8 \gamma_m h^2} + \frac{n^2 V^2}{h^{4/3}} \quad (13)$$

Donde τ_y es el esfuerzo cortante de cedencia, γ_m el peso específico de la mezcla de agua y sedimentos, η la viscosidad del flujo, K un parámetro de resistencia para flujo laminar, n el coeficiente de rugosidad de Manning, V la velocidad del flujo y h la profundidad o altura del flujo en cada celda.

Para este tipo de flujos, el peso específico de la mezcla, la viscosidad y el esfuerzo cortante de cedencia, dependen de la concentración de sólidos en proporción del volumen total (o simplemente concentración de sólidos c). De acuerdo con los resultados encontrados por O'Brien (1988); los dos últimos parámetros, se estiman en el modelo, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\eta = \alpha_1 e^{\beta_1 c} \quad (14)$$

$$\tau_y = \alpha_2 e^{\beta_2 c} \quad (15)$$

El peso específico de la mezcla es calculado de la siguiente forma:

$$\gamma_m = \gamma_l + c(\gamma_s - \gamma_l) \quad (16)$$

Siendo γ_l el peso específico del agua y γ_s el peso específico de las partículas sólidas.

La concentración de sólidos (c), se define como la relación existente entre el volumen de sedimentos y el volumen total (que resulta de la suma del volumen de sólidos, y el volumen líquido), es decir, si se tiene un caudal sólido dado (Q_s) y un caudal total (Q_T), la concentración de sólidos sería:

$$c = \frac{Q_s}{Q_T} \quad (17)$$

Y el caudal total, en función del caudal líquido (Q_l), será:

$$Q_T = Q_l + Q_s \quad (18)$$

O lo que es lo mismo:

$$Q_T = Q_l + c Q_T \quad (19)$$

Es decir, el caudal total en términos del caudal líquido es:

$$Q_T = Q_l \left(\frac{1}{1-c} \right) \quad (20)$$

Donde, el término $1/(1-c)$ se conoce como un factor de aumento del caudal líquido (BF).

4.5.2 Características reológicas del flujo.

Para estimar los esfuerzos cortantes y la viscosidad del flujo, O'Brien (1988), encontró que estos parámetros se relacionan con la concentración de sólidos, a partir de funciones exponenciales (Ecuaciones 9 y 10), que presentan una serie de coeficientes ($\alpha_1, \alpha_2, \beta_1$, y β_2). Los valores de estos coeficientes fueron estimados por O'Brien (1988), para diferentes sitios en Estados Unidos donde se han presentado flujos de lodos y que se compilan en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**14.

Tabla 14. Coeficientes para el cálculo de esfuerzos cortantes y viscosidad en el flujo.

SITIOS ESTUDIADOS	α_2 (dinas/cm ²) ¹	β_2	α_1 (Poises) ²	β_1
Datos de Campo				
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
Parámetros disponibles en la literatura				
Iida (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	-	-

4.5.3 Limitaciones del modelo FLO2D.

El programa considera una geometría de fondo fijo (es decir, la altura topográfica de cada celda es constante), de manera que no se puede considerar el efecto de socavación que se puede producir en estos fenómenos tanto en el cauce y márgenes como en las planicies de inundación. La precisión en los resultados, radica en la calidad de la información, especialmente en la topografía ajustada al DTM, dado que el software genera una malla de cálculo donde se interpolan las elevaciones, cuya geometría es fija y de forma cuadrada. Es importante considerar que la precisión depende del tamaño de la celda utilizada, es decir, mientras menor sea esta, más precisos son los resultados.

4.6 Condiciones dinámicas del evento del 31 de marzo de 2017.

A continuación se muestra y se hace referencia completa de los parámetros hidráulicos de velocidad y caudal, se obtuvieron con relaciones empíricas y semiempíricas, en el informe de “Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo” presentado por el SGC en julio de 2017.

¹ 1 dina/cm² = 0.10 N/m²

² 1 poise = 0.10 Kg/m/s

Para el cálculo de velocidades de flujo (U) se utilizaron tres metodologías diferentes con el objetivo de comparar y analizar cual se ajusta mejor al evento de Mocoa. La primera corresponde a la ecuación de Manning:

$$Q = \left(\frac{1}{n}\right) \times A \times R^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{J} \quad (21)$$

$$U = \frac{Q}{A} \quad (22)$$

Donde A es el área de la sección transversal evaluada, R_n es el radio hidráulico, J es el gradiente del canal y n es el coeficiente de rugosidad de Manning. Usando como referencia los trabajos realizados en flujos de detritos (debris flows) por Xu y Feng (1979) y Cui et al., (2013), y asumiendo un flujo viscoso limitado a un canal angosto, curvo, de alta pendiente, con grandes rocas, arena y gravas formando obstrucciones y una altura de flujo de 4 m, se utiliza un coeficiente de Manning igual a 0.1 (Tabla 15).

Tabla 15. Coeficiente de rugosidad con base en los valores de Xu y Feng (1979). Modificada de Cui et al. (2013).

Categoría	Características del flujo de detritos	Rango de pendientes	Valores de n para varias alturas de flujo (m)			
			0.5	1.0	2.0	4.0
	Canal-Valle					
Flujos de detritos no viscosos	Canal angosto y pendiente con saltos y contracciones; material de fondo son rocas 0,5 m a 2 m.	0.15-0.22	0.20	0.25	0.33	0.50
	Canal con curvas y saltos; material de fondo son rocas 0,3 m a 0,5 m.	0.08-0.15	0.10	0.125	0.167	0.25
	Canal ancho y recto; material de fondo son rocas de 0,3 m, arena y grava.	0.02-0.08	0.058	0.071	0.10	0.125
Flujos de detritos viscosos	Canal meandriforme, angosto y pendiente; material de fondo son grandes rocas, arena y gravas, formando obstrucciones y saltos.	0.12-0.16	0.056	0.067	0.083	0.10*
	Canal recto, material de fondo son rocas, arena y gravas.	0.08-0.12	0.036	0.042	0.05**	0.06
	Canal ancho y recto, material de fondo son rocas menores de 0,3 m, arena y grava.	0.04-0.08	0.029	0.036	0.042	0.05

*Valores de n utilizados para las quebradas Taruca y Taruquita. ** Valores de n usados para el río Mulato.

Con base en la ecuación de Manning y siguiendo observaciones en flujo de detritos (debris flows) en China, se desarrolló una fórmula semiempírica denominada Método de Wudu, por la quebrada donde fue aplicada inicialmente:

$$Q = \left(\frac{1}{n_c} \right) \times A \times H_c^{\frac{2}{3}} \times \sqrt{J} \quad (23)$$

Donde H_c es la profundidad del flujo de detritos y n_c es el coeficiente de rugosidad para un flujo de detritos (debris flow) viscoso. Yang (1985) a partir de observaciones en la quebrada Wudu propone el cálculo del coeficiente de rugosidad así:

$$\left(\frac{1}{n_c} \right) = 18.5 \times H^{-0.42} \quad (24)$$

El Método Wudu fue aplicado satisfactoriamente por Cui et al. (2013) en el flujo de detritos de Zhouqu y debido a las similitudes entre estos eventos con el presentado en Mocoa (flujos generados por represamientos, socavación de fondo y lateral con entrada de material, quebradas con deslizamientos que aportan material al cauce, entre otras) es utilizado en el presente estudio.

Finalmente, el Modelo Chezy fue aplicado para comparar los resultados obtenidos con las dos metodologías anteriores, tomando como referencia que este último modelo es recomendado por el Ministerio Chino de tierras y Recursos (China Ministry of Lands and Resources CMLR; Tang et al., 2011), entre otros autores (e.g. Lo., 2000; Cui et al., 2013):

$$Q = K_c \times A \times H_c^{\frac{2}{3}} \times J^{\frac{1}{5}} \quad (25)$$

Donde K_c es un factor asociado a la profundidad del flujo de detritos H_c (Tabla 16).

Tabla 16. Relación entre el coeficiente de velocidad K_c y la profundidad del flujo H_c .
Datos de Chen et al., 1983 y Du et al., 1987; Modificado de Cui et al., (2013).

H_c (m)	<2.5	2.75	3	3.5	4	4.5	5	>5.5
K_c	10	9.5	9.0	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0

Se calcularon los valores de velocidad (m/s) y caudal (m^3/s) para la algunas secciones de las quebradas Taruca, Taruquita y el río Mulato con base en las mediciones realizadas en campo para tal fin en secciones específicas, las cuales están localizadas en la Figura 57.

Tabla 17. Valores de caudal y velocidad calculados con las relaciones empíricas: Wudu, Chezy y FLO2D para las quebradas Taruca (Tc), Taruquita (Tq) y el río Mulato (Mt).

Método	Sección		FLO2D Q (m ³ /s)	Q (m ³ /s)	U (m/s)	Distancia (m)
Wudu	Tc1	5	55.66	2,920.7	17.4	680.0
	Tc1b	4		1,931.3	18.5	1,200.0
	Tc2	3	110	1,238.7	10.8	1,900.0
	Tc3	6		2,425.8	11.6	2,250.0
	Tc3b	7		1,652.1	11.0	2,750.0
	Tc4	8		1,312.3	9.4	2,990.0
	Tc5	9	362	913.9	9.2	3,500.0
	Tq1	1	165	473.7	5.9	2,100.0
	Tq2	2	222	355.6	6.1	2,400.0
	Mt1	12		236.4	5.6	10,600.0
	Mt2	13		700.1	5.5	11,000.0
Chezy	Tc1	5	108	1,976.4	11.8	680.0
	Tc1b	4		1,391.7	13.3	1,200.0
	Tc2	3		1,365.9	11.9	1,900.0
	Tc3	6	390	2,986.7	14.2	2,250.0
	Tc3b	7		2,093.1	14.0	2,750.0
	Tc4	8		1,274.2	9.2	2,990.0
	Tc5	9		909.5	9.1	3,500.0
	Tq1	1		588.6	7.4	2,100.0
	Tq2	2		416.6	7.2	2,400.0
	Mt1	12	137	388.1	9.2	10,600.0
	Mt2	13	217	1,099.8	8.6	11,000.0

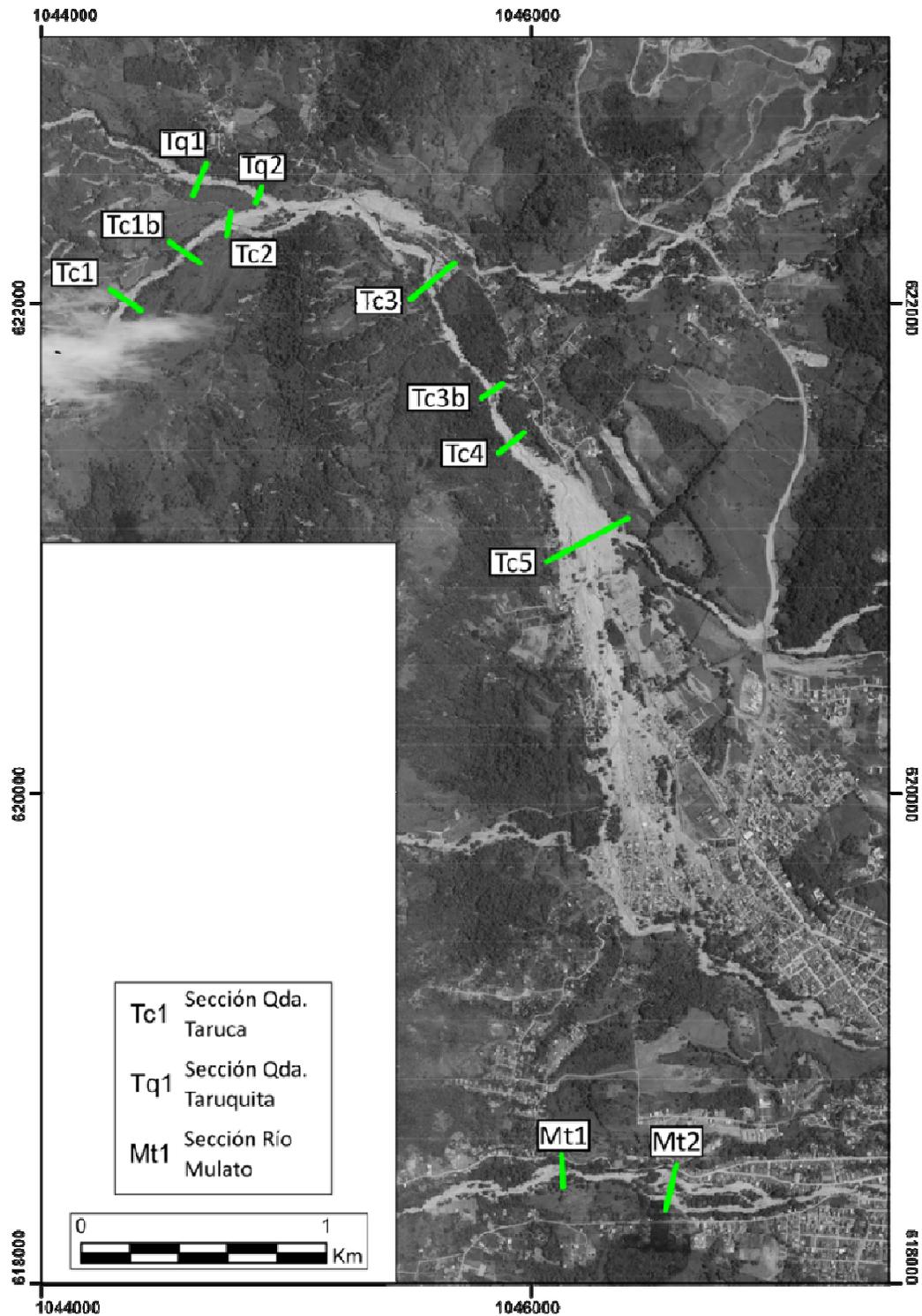


Figura 57. Localización de las secciones transversales analizadas para el cálculo de velocidades en las quebradas Taruca, Taruquita y el río Mulato.
 Fuente: Foto GeoSpatial - CORPOAMAZONÍA.



Figura 58. Sección Tq1-1, donde se el caudal transitado es de 165 m³/s.



Figura 59. Tq2-2, donde se el caudal transitado es de 222 m³/s.

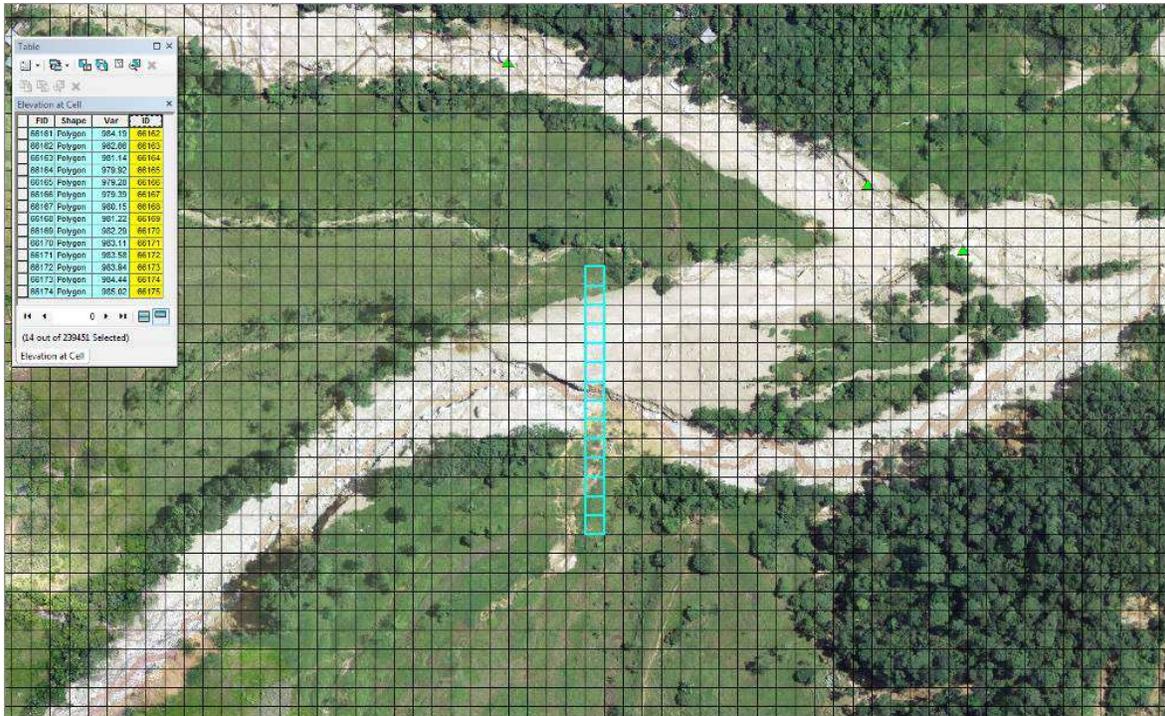


Figura 60. Tc2-3, donde se el caudal transitado es de 110 m³/s.



Figura 61. Tc1-5, donde se el caudal transitado es de 108 m³/s.



Figura 62. Tc3-6, donde se el caudal transitado es de 390 m³/s.

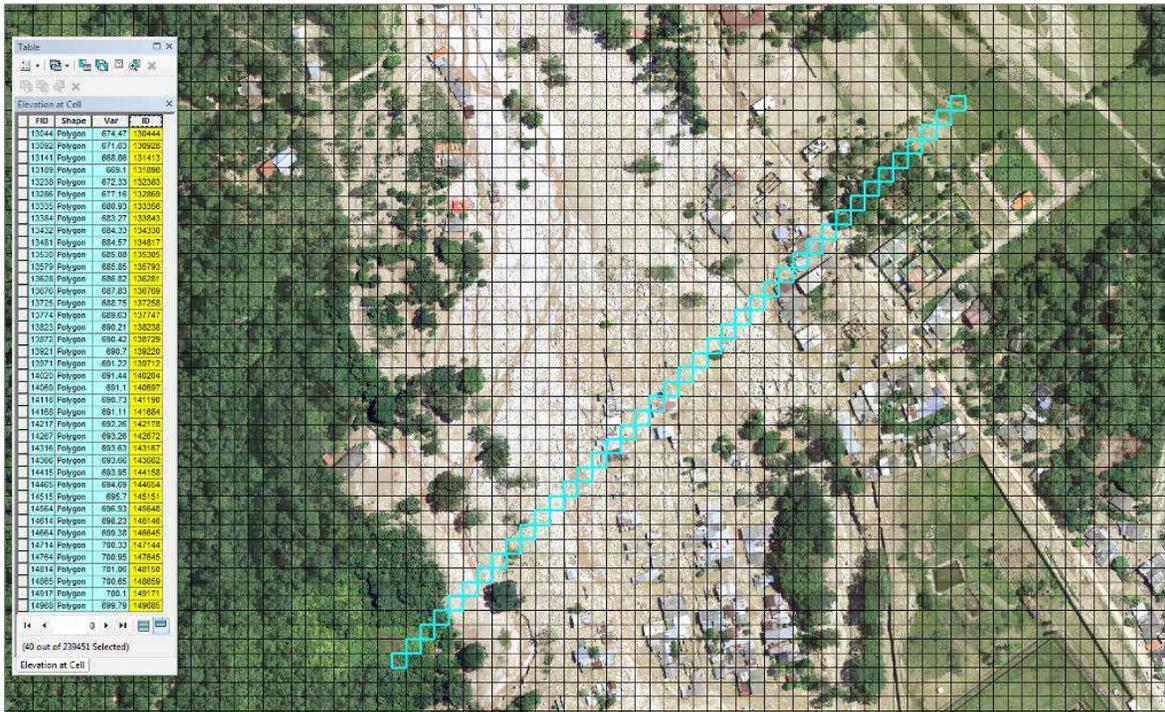


Figura 63. Tc5-9, donde se el caudal transitado es de 362 m³/s.

Amenaza por movimientos en masa tipo flujo escala 1:5.000.

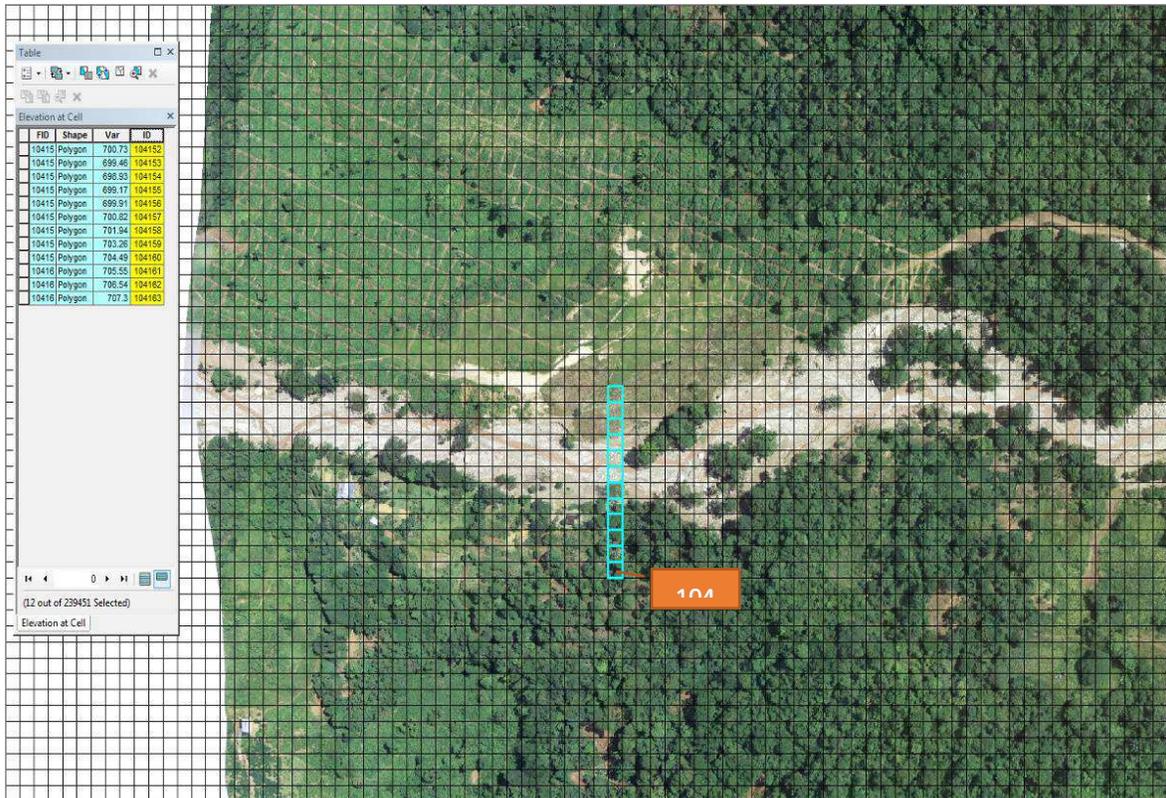


Figura 64. S11, donde se el caudal transitado es de $79 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 65. S12-S13, donde se el caudal transitado es de 137 y $217 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente.

4.7 Análisis de Resultados.

Los valores calculados mediante las ecuaciones empíricas sobre los depósitos dejados por el evento del 31 de marzo de 2017, se consideran como referencia para comparar los resultados de las modelaciones hidráulicas con el FLO2D en las mismas secciones

Una vez evaluados los resultados obtenidos en las diferentes secciones, se observa que los caudales y velocidades obtenidas con las ecuaciones empíricas, distan bastante del tránsito hidráulico que hace el software, aumentando considerablemente la incertidumbre del modelo, razón por la que entonces se define que la comparación de resultados debe enfocarse desde las área afectadas, es decir, tomar como base el shape de área de afectación obtenido en el documento de caracterización del evento y compararlo con los escenarios obtenidos a partir de tránsito de caudales simulado por el programa y el módulo Mapper[®].

El valor del área de afectación obtenida en la caracterización es de 2.398.645 m² y los valores obtenidos en las simulaciones van desde 1.486.400 donde el escenario aplicado es sin lluvia y con tránsito de 6 represamientos sin sedimentos, hasta 2.627.800 cuyo escenario corresponde a 9 represamientos con carga de sedimentos desde el 30% hasta 45% del volumen de sedimento. Este último escenario se acerca hasta un 91% del área afectada caracterizada por el SGC, de tal manera que es el escenario seleccionado para realizar la simulación final con el uso del MDT ajustado a partir de las secciones transversales realizadas por el SENA de Mocoa.

5 EVALUACIÓN DE AMENAZA POR MOVIMIENTOS EN MASA TIPO FLUJO DE LAS CUENCAS DE LAS QUEBRADAS TARUCA, TARUQUITA, SAN ANTONIO Y EL CARMEN Y LOS RÍOS MULATO Y SANGOYACO, MUNICIPIO DE MOCOA, ESCALA 1:5.000

Con el uso del modelo FLO2DPro® y su módulo Mapper®, se obtienen los mapas de amenaza por movimientos en masa tipo flujo que se presentan en este documento, donde se combinan factores como la velocidad, altura de flujo y energía, para obtener el mapa de zonificación bajo los criterios de una metodología revisada e incluida por el autor del software (J O'Brien), que se basa principalmente en el riesgo directo de personas expuestas a inundaciones e incluye un "factor de detritos" que puede tomar diferentes valores de acuerdo al tipo de evento que se analiza.

Una vez definidos los valores y parámetros de calibración del numeral anterior, se realizó el tránsito sobre las 11 secciones de diseño y el MDT ajustado a las condiciones de los cauces después de la reconformación mecánica, donde se obtienen valores de caudal que van desde 55 m³/s hasta 220 m³/s, con velocidades de 10 km/h a 62 km/h, profundidades 1,3 m a 11,7 m y momento de fuerza sobre el dique de 320.000 Kg-m. Por otra parte, el material movilizado de 2.123.583 m³ con un porcentaje de concentración de sólidos del 45% para la cuenca integrada de las quebradas Taruquita, Taruca, San Antonio, El Carmen y el río Mulato. Para la cuenca del río Mulato se tienen valores de 1.681.800 m³ con un porcentaje de concentración de sólidos del 45% y velocidades 10.8 km/h a 53 km/h. Figuras 66 y 67.

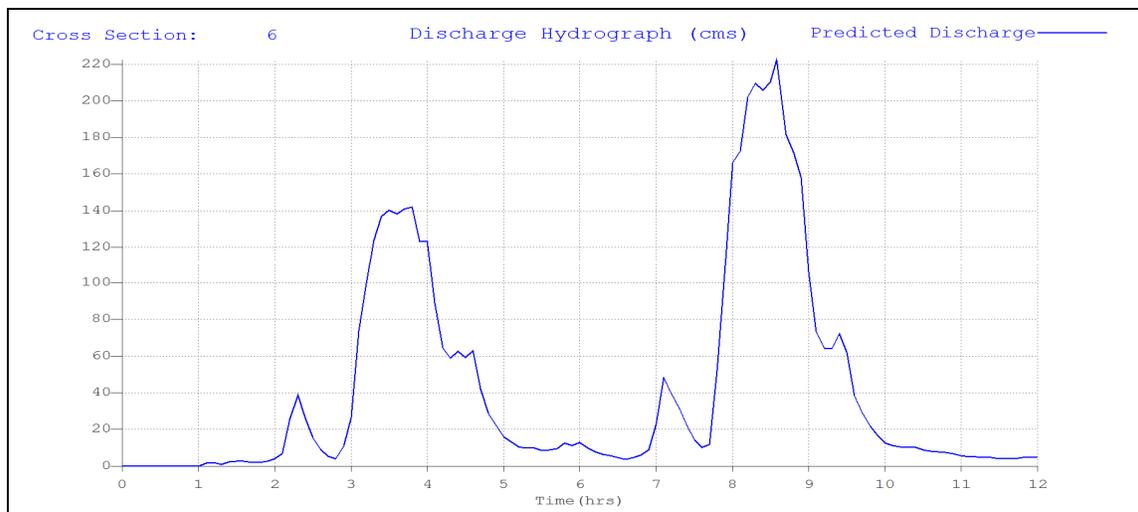


Figura 66. Hidrograma tipo obtenido por la modelación FLO2DPro®. (Cuenca integrada).

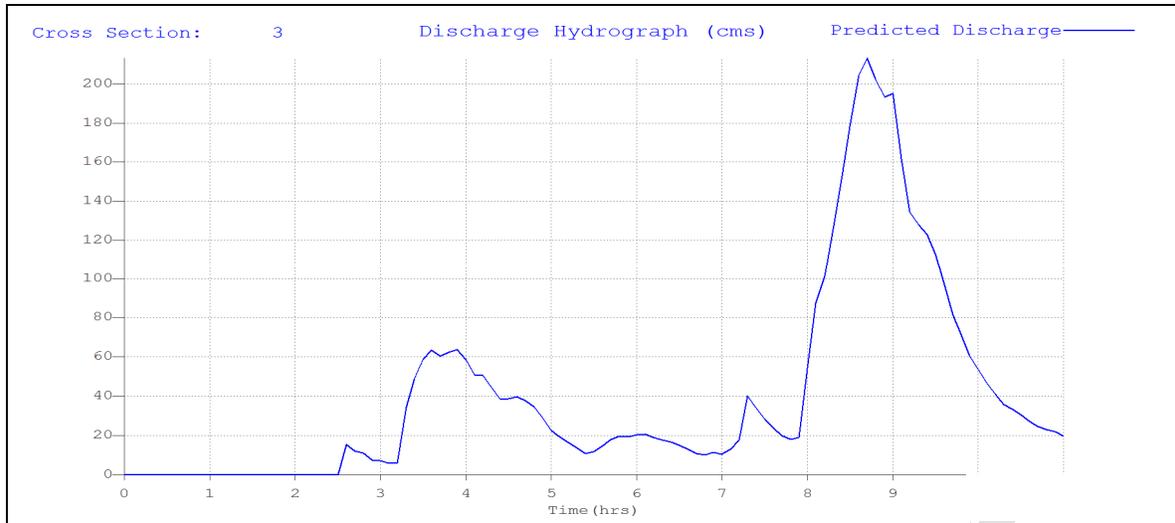


Figura 67. Hidrograma típico obtenido por la modelación FLO2DPro® (Cuenca Mulato).

A partir de los rangos establecidos (Tabla 18) y los valores obtenidos en la modelación hidrológica-hidráulica, se estructura la leyenda del mapa de amenaza como se observa en la Tabla 19 y Figura 68.

Tabla 18. Rangos de clasificación de amenaza para inundaciones por flujo de agua, lodo y detritos.

Flood intensity	Maximum depth h (m)		Product of max depth h times max velocity v (m ² /s)
High	h > 1.5 m	OR	v h > 1.5 m ² /s
Medium	0.5 m < h < 1.5 m	OR	0.5 m ² /s < v h < 1.5 m ² /s
Low	0.1 m < h < 0.5 m	AND	0.1 m ² /s < v h < 0.5 m ² /s

Table 4.4 Definition of mud or debris flow intensity.

Flood intensity	Maximum depth h (m)		Product of max depth h times max velocity v (m ² /s)
High	h > 1.0 m	OR	v h > 1.0 m ² /s
Medium	0.2 m < h < 1.0 m	AND	0.2 m ² /s < v h < 1.0 m ² /s
Low	0.2 m < h < 1.0 m		v h < 0.2 m ² /s

Fuente. OFEE et al. 1997, Fiebigler 1997.

Es importante mencionar que, basados en los parámetros obtenidos en la modelación y considerando las altas incertidumbres que se tienen, se define integrar la modelación hidrológica-hidráulica con el mapa geomorfológico detallado, de manera que se obtiene un mapa integrado que contiene los rangos de velocidad, caudal, alturas y energía transitado por el modelo computacional.

Tabla 19. Leyenda Mapa de Amenaza por flujo de detritos

TIPO DE AMENAZA	DESCRIPCION	RECOMENDACIONES
ALTA	<p>Corresponde a zonas cubiertas con depósitos recientes de avenidas torrenciales de las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato, donde se pueden presentar inundaciones por flujos de detritos y lodo por lo menos una vez cada 25 años, con alturas hasta de 11,7 m y velocidades entre los 10 y 62 km/h de materiales finos, areno-gravosos y bloques con diámetros de hasta 12 m. Esta categoría de amenaza ocupa el 16% del área total de estudio 1.330 Ha. Con influencia en los barrios: 17 de Julio, Bolívar, El Carmen, El Centro, El Progreso, Huasipanga, José Homero, José María Hernández, Kennedy, La Esmeralda, La Floresta, La Independencia, Las Acacias, Las Américas, Las Orquídeas, Los Pinos, Los Prados, Miraflores, Modelo, Naranjito, Pablo VI, San Agustín, San Fernando y Villa del Norte.</p> <p>En este nivel de amenaza, se incluyen las áreas afectadas por el evento del 31 de marzo de 2017.</p> <p>Por las características del flujo, puede causar pérdidas humanas, arrastrar fácilmente personas y objetos pesados y generar destrucción total o parcial de viviendas e infraestructura.</p>	<p>Teniendo en cuenta el poder destructivo de los eventos que pueden presentarse, se recomienda que en estas zonas no se permita la ocupación o urbanización de estas áreas ni la ubicación de infraestructura de servicios públicos. Se recomienda la implementación de medidas encaminadas a la recuperación ambiental de estas áreas, por considerarse de amortiguación frente a eventos futuros donde se presenten avenidas torrenciales.</p> <p>Es necesario implementar sistemas de alerta temprana, enfocados a evitar la pérdida de vidas humanas por la ocurrencia de nuevos eventos de flujos de detritos en las diferentes; e instrumentar las cuencas de las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato, de manera que se tenga certeza del comportamiento hidrológico del área.</p>
MEDIA	<p>Corresponde a zonas en las cuales se encuentran depósitos de avenidas torrenciales de las quebradas Taruca y Taruquita y los ríos Sangoyaco y Mulato con periodos de retorno mayores a 100 años. Se pueden presentar inundaciones por flujo de detritos y lodo con alturas entre 0,2 m. y 1,0 m., con velocidades hasta de 10 km/h. de materiales finos, areno-gravosos y bloques con diámetros de hasta 3 m. Esta categoría de amenaza ocupa el 20% del área total de estudio 1.330 Ha. Con influencia en los barrios: 17 de Julio, 5 de Septiembre, Bolívar, El Carmen, El Centro, El Dorado, El Progreso, Huasipanga, José Homero, José María Hernández, La Esmeralda, La Floresta, La Independencia, La Unión, Las Acacias, Las Américas, Las Orquídeas, Los Pinos, Los Prados, Miraflores, Modelo, Naranjito, Nuevo Horizonte, Obrero I Etapa, Obrero II Etapa, Olímpico, Pablo VI, Primero de Enero, Quinta Paredes, Rumipamba, San Agustín, San Fernando, Urb.</p>	<p>Realizar estudios detallados que permitan el diseño de obras de mitigación para proteger la vida de las personas, infraestructura y viviendas, que tengan en cuenta las características de los flujos de detritos que pueden presentarse.</p>

TIPO DE AMENAZA	DESCRIPCION	RECOMENDACIONES
	<p>Altos de La Colina, Urb. Caimaron, Villa Colombia, Villa Daniela y Villa del Norte</p> <p>Por las características del flujo, pueden causar daño a niños, adultos mayores y personas discapacitadas, generar afectación mayor a viviendas e infraestructura y arrastrar objetos como motocicletas, muebles y electrodomésticos. Igualmente, debido a la energía del flujo y el tamaño de los bloques que puede arrastrar, se pueden presentar pérdida de vidas humanas y destrucción de parcial o daños graves a viviendas</p>	
BAJA	<p>Corresponde a zonas en las que pueden presentarse inundaciones por flujo de lodo con alturas menores a 0,2 m velocidades hasta 3,6 km/h. de material fino y areno-gravoso. Además corresponde a zonas asociadas a los depósitos antiguos y muy antiguos, de carácter fluvio-torrencial de las quebradas San Antonio, El Carmen y de los ríos Mulato y Sangoyaco.</p> <p>Por las características del flujo, las personas pueden movilizarse dentro de él y generar afectación menor a viviendas y objetos como muebles y electrodomésticos.</p>	

Teniendo en cuenta que en la zonificación presentada en este informe es complementaria a la zonificación de amenaza por movimientos en masa en laderas y que la evaluación de dicho fenómeno se realizó también a escala 1:5.000 por el SGC, con el fin de tener una visión integrada de las limitaciones del área urbana, periurbana y de expansión del municipio de Mocoa, se generó el mapa integrado denominado “Mapa integrado de Amenaza por Movimientos en Masa y avenidas torrenciales del área Urbana, Periurbana y de Expansión del Municipio de Mocoa, escala 1:5.000 que se ilustra en la Figura 69.

6 CONCLUSIONES.

La localización geográfica del municipio de Mocoa, capital del departamento del Putumayo, sobre el piedemonte oriental de la Cordillera Oriental y a su vez sobre el abanico aluvial de la cuenca de los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco y quebrada Taruca, permite tener un escenario que históricamente ha afectado la población por efecto de las avenidas fluviotorrenciales y deslizamientos, esto enmarcado en la evolución geológica y la interacción de diferentes factores como la geología, la geomorfología y las condiciones climáticas, entre otros.

La obtención de los parámetros e índices morfo-métricos es de gran importancia para comprender e interpretar el comportamiento morfo-dinámico e hidrológico de las subcuencas hidrográficas involucradas (ríos Mulato y Sangoyaco, quebradas, Taruquita, Taruca, San Antonio, El Carmen), en el evento catastrófico del 31 de marzo de 2017, pertenecientes a la cuenca del río Mocoa, ya que la información permitió analizar los elementos geométricos básicos del sistema, que ante la presencia de externalidades (clima, acción antrópica) interactúan para originar o activar procesos geomorfológicos de sus vertientes y correlacionarlas con las estructuras de la región.

La cuenca del río Mocoa dentro del contexto geológico en la zona de estudio, presenta en su sector occidental, un conjunto de afluentes subparalelos (ríos Mulato y Sangoyaco, quebradas Taruca y Taruquita) fuertemente encajonados, generando subcuencas estrechas, que cruzan más o menos perpendicularmente el frente montañoso, donde se produce el quiebre de pendiente importante al llegar al sector de Villa Nueva al sur y San Antonio al norte.

Partiendo de los elementos tectónicos y geomorfológicos presentados, se propone la hipótesis de la existencia de un sistema de falla activo, con una orientación principal NS en la zona de estudio, denominado Falla Mocoa-La Tebaida, como el rasgo principal donde se generan los abanicos fluviotorrenciales más antiguos y los flujos fluviotorrenciales actuales y que es el causante del levantamiento y cabalgamiento del Monzogranito de Mocoa de edad Jurásica, sobre las rocas sedimentarias del Paleógeno-Neógeno.

La cuenca está afectada estructuralmente, con fallas regionales que afectan su curso, generando quiebres de pendientes que evidencian esta alteración. Además, presenta una alta capacidad de erosión y por tanto una alta capacidad de aporte y deposición de sedimentos hacia las zonas más bajas, conformando el abanico fluviotorrencial. La actividad tectónica marca un rejuvenecimiento, que condiciona a que los frentes de falla contribuyan al aumento de los procesos erosivos con generación de aporte de material que, junto con otros factores influyentes, como clima, altas pendientes, ha y seguirán generando estas avenidas fluvio-torrenciales.

Se sugiere la existencia de un paleo depósito propio de las quebradas Taruquita, Taruca y

de los ríos Sangoyaco y Mulato, de edad relativa Pleistoceno-Holoceno que actualmente es fragmentada en dos bloques por el hundimiento de la cuenca a lo largo de la falla Mocoa-La Tebaida que pasa al oeste de la ciudad de Mocoa en dirección NE-SW.

Existe una zona de alta deformación de estos depósitos con un levantamiento aproximado de 30 m. sobre su ápice. Además, estos bloques se pueden subdividir en dos sectores más por el hundimiento de la cuenca de la Quebrada Taruca y del río Sangoyaco a lo largo de los lineamientos del mismo nombre respectivamente.

Se propone la existencia de un sistema de fallas activo con una orientación principal NE-SW, en un campo de esfuerzo principal transpresivo con dirección SE-NW (inverso-rumbo dextral) como el rasgo que origina los abanicos fluviotorrenciales y fallas transversales normales, con componente de rumbo con un esfuerzo extensivo secundario SW-NE, que está generando el espacio donde se depositan estos abanicos y flujos fluviotorrenciales.

El paisaje fisiográfico de las cuencas estudiadas y pertenecientes a la Cuenca del río Mocoa localizada en el piedemonte de la Cordillera Oriental, se caracteriza por presentar en su parte occidental profundos valles en "V". La cuenca exhibe un estilo estructural asociado a fallas de cabalgamiento: Mocoa-La Tebaida, Cantayaco de dirección NNE-SSW y Churumbelo de dirección SWW-NEE. Estas fallas registran estructuras con cinemáticas dextrales: lomos de presión y pliegues de arrastre. En respuesta a estos procesos se presentan levantamientos y hundimientos de bloques, al igual que fenómenos de compensación que originan en los macizos rocosos sistemas extensionales asociados a fallas de tipo normal con una orientación promedio NNW: lineamiento de la Q. Taruca y fallas de los ríos Sangoyaco y Mulato.

La delimitación de bloques por trazos de falla de sistemas regionales y su posterior análisis estructural y geomorfológico, permite destacar la evolución del paisaje, mostrando la secuencia de edad relativa de estas fallas: La falla de Churumbelo es la más antigua de la zona, ya que termina contra la falla Mocoa-La Tebaida. Sigue la Falla Cantayaco, ya que termina contra la Falla de Churumbelo. Continúan los lineamientos de las quebradas Taruca y Sangoyaco que terminan contra la falla Mocoa- La Tebaida y por último la falla del río Mulato que corta esta misma falla.

Este escenario geológico-estructural sumado a la alta pluviosidad que reina en la región facilita los procesos de meteorización y erosión y detona movimientos en masa. Por lo que el material proveniente de estos fenómenos gravitacionales se deposita a lo largo de los drenajes. El proceso continúa con la removilización de dichos materiales alterados y dispuestos en los lechos que, por aumento de los caudales por efecto de la lluvia, los deposita en forma de abanico en la parte donde el relieve se suaviza y encuentra una pendiente más baja. Sobre estos depósitos se encuentra actualmente la mayor parte urbana del municipio de Mocoa.

Desde el punto de vista hidrológico-hidráulico, las incertidumbres son muy altas ya que como se mencionó las condiciones geológico-estructurales controlan en gran medida la magnitud y recurrencia de las avenidas torrenciales que se puedan presentar en el territorio, por otra parte, el no tener cuencas instrumentadas hace que no se conozca con certeza el comportamiento del factor agua y como entra a controlar el modelo. Por otra parte, es claro que la herramienta computacional FLO2DPro® al no integrar un módulo geomorfológico no permite modelar la socavación lateral y de fondo que es la principal característica del evento del 31 de marzo de 2017, igualmente este tipo eventos y su tránsito caótico hacen que cualquier sistema se quede corto a la hora de modelar avenidas torrenciales como esta.

Así las cosas, se propone en este documento, dadas las incertidumbres, integrar al modelamiento hidrológico-hidráulico la geomorfología de detalle, donde se extraen valores de área de afectación y se combinan con las velocidades, caudales, alturas y energía transitadas con la herramienta computacional obteniendo el mapa final de amenaza, donde se obtienen valores de caudal que van desde 55 m³/s hasta 220 m³/s, con velocidades de 10 km/h a 90 km/h, profundidades 1,3 m a 11,7 m y momento de fuerza sobre el dique de 320.000 Kg-m. Por otra parte, el material movilizado de 2.123.583 m³ con un porcentaje de concentración de sólidos del 45% para la cuenca integrada de las quebradas Taruquita, Taruca, San Antonio, El Carmen y el río Mulato. Para la cuenca del río Mulato se tienen valores de 1.681.800 m³ con un porcentaje de concentración de sólidos del 45% y velocidades 10.8 km/h a 53 km/h.

7 BIBLIOGRAFÍA

- ARISTIZABAL, L. 2016. Morfometría de los abanicos aluviales del río Chiriano-San José del oriente, río Guatapurí-Valledupar y río Jeréz- Dibulla y su relación con la tectónica: tres ambientes tectónicos en la zona norte de Colombia. Escuela de ciencias. Departamento de Ciencias de la tierra. Universidad EAFIT.
- BENVENUTI, M., MARTINI, I.P., 2002. Analysis of terrestrial hyperconcentrated flows and their deposits. *Spec. Publs int. Ass. Sediment*, 32, 167-193.
- BLAIR, T.C., MCPHERSON, J.G., 2009. Processes and Forms of Alluvial Fans, En: A.J., Parsons, A.D., Abrahams (eds.) 2009. *Geomorphology of Desert Environments*, Springer, 2nd edition, Netherlands, 413-467.
- CARVAJAL, R & SANZ de GALDEANO, C. 2008. Aplicación de índices geomorfológicos al estudio de la cuenca del río Adra (Almería). *Revista C & G*, 22 (1-2). P. 32.
- CHEN, G.X., WANG, J.K., WANG, L.H., 1983. Mitigations of Debris flows. China Railway Publishing House, Beijing, pp. 65-77.
- CHOW, V. T. (1994). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá: McGRAW-HILL.
- COUSSOT, P., MEUNIER, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. *Earth-Science Reviews*, 40(3-4), 209-227.
- CRUDEN, D.M., VARNES, D.J., 1996. *Landslide Types and Processes*. Special Report Transportation Research Board, National Academy of Sciences, 24, 36-75.
- CUELLAR, M & LÓPEZ, J. 2015. Índice de actividad tectónica relativa (IATR): Análisis morfométrico en el altiplano de Popayán. *Researchgate.net. publication/281842564*.
- CUELLAR, M; LÓPEZ, J; CARRILLO, E; IBAÑEZ, D; SANDOVAL, J; OSORIO, J. 2014. Control de la actividad tectónica sobre los procesos de erosión remontante: el caso de la cuenca del río Combeima, Cordillera Central, Colombia. *Boletín de Geología*. Vol. 36, No. 1. ISSN: 0120-0283.
- CUI, P., ZHOU, G.D., ZHU, X.H., ZHANG, J.Q., 2013. Scale amplification of natural debris flows caused by cascading landslide dam failures. *Geomorphology*, 182, 173-189.
- DENSMORE, A., ALLEN, P., SIMPSON, G., 2007. Development and response of a coupled catchment fan system under changing tectonic and climatic forcing, *J. Geophys. Res.*, 112, 16 pp.

- DU, R.H., KANG, Z.C., CHEN, X.Q., ZHU, P.Y., 1987. A Comprehensive Investigation and Control Planning for Debris flow in the Xiaojiang River Basin of Yunnan Province, Chongqing, China. Scientific and Technical Documentation Press, Chongqing.
- FISHER, R.V., 1983. Flow transformation in sediment gravity flows. *Geology*, 11, 273–274.
- GUZMÁN, C.M., BARRERA, J.A., 2014. Metodología para la microzonificación de riesgos frente a amenazas naturales: Caso de estudio de deslizamientos e inundaciones municipio de Mocoa – Putumayo. Tesis de grado. Universidad Católica de Colombia. Bogotá. D.C.
- HARVEY, A., MATHER, A., STOKES, M., 2005. Alluvial fans: geomorphology, sedimentology, dynamics-introduction. A review of alluvial-fan research, En: Harvey, A.M., Mather, A.E. & Stokes, M. (eds.) 2005. Alluvial Fans: Geomorphology, Sedimentology, Dynamics. Geological Society, London, Special Publications, 251, 1-7.
- HUNGR, O., LEROUEIL, S., PICARRELLI, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11 (2), 167-1994.
- JAKOB, M., 2005. A size classification for debris flows. *Engineering Geology*, 79, 151-161.
- JOJOA, O.A., 2003. Análisis de amenazas y vulnerabilidad geológica en la cuenca de la quebrada Taruca y Sangoyaco para el área rural, sub-urbana y urbana de la población de Mocoa, Departamento del Putumayo, CORPOAMAZONÍA, Mocoa, 82 pp.
- LO, D.O.K., 2000. Review of natural terrain landslide debris-resisting barrier design. GEO Report No. 104, Geotechnical Engineering Office, Civil Engineering Department, The Government of Hong Kong Special Administrative Region.
- NÚÑEZ, A., 2003. Reconocimiento geológico regional de las planchas 411 La Cruz, 412 San Juan de Villalobos, 430 Mocoa, 431 Piamonte, 448 Monopamba, 449 Orito y 465 Churuyaco. Memoria explicativa, Escala 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá, 259 pp.
- OUIMET, W.B., WHIPPLE, K.X., ROYDEN, L.H., SUN, Z., CHEN, Z., 2007. The influence of large landslides on river incision in a transient landscape: Eastern margin of the Tibetan Plateau (Sichuan, China). *Bulletin of the Geological Society of America*, 119(11-12), 1462-1476.
- PEÑA, JUAN DIEGO, 2016. Contrato de consultoría 1110 de 2015 “Ejecución del proyecto denominado apoyo a la mitigación de riesgos mediante la realización de estudios de amenaza de inundación con referencia a una máxima avenida de las quebradas

Taruca y Conejo en el municipio de Mocoa, departamento del Putumayo". Mocoa – Putumayo.

- PMA-GCA, 2007. Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Publicación Geológica Multinacional, 4(432), 1. Servicio Nacional de Geología y Minería, CD-ROM.
- PIERSON, T.C., 2005. Hyperconcentrated flow-transitional process between water flow and debris flow, En: M., Jakob, O. Hungr (eds.), Debris-flow Hazards and related phenomena, Springer, Berlín, 159-202.
- QUIGLEY, M.C., SANDIFORD, M., CUPPER, M.L., 2007. Distinguishing tectonic from climatic controls on range-front sedimentation. Basin Research, 19, 491-505.
- ROBERTSON, K., CASTIBLANCO, M.A., 2011. Amenazas fluviales en el piedemonte amazónico. Revista Colombiana de Geografía, 20 (2), 125-137.
- SGC, 2014. Mapa Geomorfológico Aplicado a Movimientos en Masa Plancha 430 Mocoa, Escala 1:100.000, Bogotá.
- SHI, Z.M., GUAN, S.G., PENG, M., ZHANG, L.M., ZHU, Y., CAI, Q.P., 2015. Cascading breaching of the Tangjiashan landslide dam and two smaller downstream landslide dams. Engineering Geology, 193 (2), 445-458.
- TANG, C., RENGERS, N., VAN ASCH, T.W.J., YANG, Y.H., WANG, G.F., 2011. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris-flow event in Zhouqu city, Gansu Province, northwestern China. Natural Hazards and Earth System Science 11(11), 2903-2912.
- XU, M.D., FENG, Q.H., 1979. Roughness of debris flows. Proceeding of the first conference of Chinese research of debris flows, 51-52.
- YANG, Z, N., 1985. Preliminary study on the flowing velocity of viscous debris flows due to intense rainfall. Research of debris flows, Proceeding of the Lanzhou Institute of Glaciology and Cryopedology, Chinese Academy of Sciences. No. 4. Science Press, Beijing.
- ZHOU, G.D., CUI, P., CHEN, H.Y., ZHU, X.H., TANG, J.B., SUN, Q.C., 2013. Experimental study on cascading landslide dam failures by upstream flows. Landslides 10 (5), 633–643.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, 2017. Zonificación de susceptibilidad y amenaza por movimientos en masa de las subcuencas de las quebradas Taruca, Taruquita, San Antonio, El Carmen y los ríos Mulato y Sangoyaco del municipio de Mocoa-Putumayo. Escala 1:25.000. Versión 1.0.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, 2017. Caracterización del movimiento en masa tipo flujo del 31 de marzo de 2017 en Mocoa – Putumayo.

SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO, UNAL. (2015). Guía Metodológica para estudios detallados de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa, escala detallada. Imprenta Nacional de Colombia.