

MODELACION Y SIMULACION DEL ARRASTRE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN LA CUENCA MEDIA DEL RIO CANEY, MEDIANTE HEC RAS, MUNICIPIO DE
RESTREPO- META

TANIA SMITH PINZON MANCERA
1121920373

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2019

MODELACION Y SIMULACION DEL ARRASTRE Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS
EN LA CUENCA MEDIA DEL RIO CANEY, MEDIANTE HEC RAS, MUNICIPIO DE
RESTREPO- META

TANIA SMITH PINZON MANCERA
1121920373

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniero
Ambiental.

DIRECTOR
MARIA ESTHER RIVERA
PhD. Hidrología & Lic. Matemáticas y Física

CODIRECTOR
JESUS RAMON DELGADO RODRIGUEZ
Geólogo MsC. Geotecnia.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2019

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A Dios

Por darme esta oportunidad, por ser mi fiel compañía.

A mi madre

Evangelina, por su amor incondicional, por creer en mí, por ser mi apoyo, mi refugio, mi tesoro máspreciado, por existir.

A mi familia

Por acompañarme durante todo este proceso, a Nataly, a Yharold por su compañía y apoyo incondicional.

A la vida

Por permitirme demostrar que todo es posible si se aplica la chispa adecuada. Por dejarme entender que las cosas importantes son las que están detrás de la piel.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, por ser guía y sustento en mi vida.

A mi madre, por existir, por ser mi motor y por todo el sacrificio.

A mi familia, por ser un eslabón importante en mi vida.

A mis tutores PhD. María Esther Rivera y Msc. Jesús Ramón Delgado, por su gran paciencia, su apoyo incondicional, su guía oportuna y sobre todo por compartir sus conocimientos conmigo. Mil y mil gracias por haberme permitido realizar este trabajo bajo su orientación.

A Mauricio Lamus, quien me brindó su apoyo y colaboración a lo largo de este proyecto.

A todos y cada uno de los docentes del programa de Ingeniería Ambiental que hicieron parte de mi formación profesional.

A la Universidad de Pamplona por ser el puente para hacer realidad este sueño, al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad y cada una de las dependencias que de diferentes formas hicieron parte del logro de esta meta.

A la Administración Municipal de Restrepo y a la Secretaría de Medio Ambiente por la oportunidad y por el apoyo que me brindaron para poder desarrollar este proyecto.

A todas las personas que hicieron parte de este proceso, a los que me apoyaron y a los que no tanto, a los que más que amigos se convirtieron en mis hermanos de otra madre, a todas y cada una de las personas que aportaron su granito de arena para hacer de mí la persona que hoy soy.

Infinitas gracias.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	17
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	18
2 JUSTIFICACIÓN	19
3 OBJETIVOS	20
3.1 OBJETIVO GENERAL	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4 ALCANCES Y LIMITACIONES	21
4.1 ALCANCES	21
4.2 LIMITACIONES	21
5 MARCO REFERENCIAL	22
5.1 MARCO CONTEXTUAL	22
5.2 ANTECEDENTES	23
5.3 MARCO TEÓRICO	28
6 METODOLOGÍA	51
6.1 VISITAS DE CAMPO A LO LARGO DEL RÍO Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES	51
6.2 PUNTOS DE INSTALACIÓN DE LIMNÍMETROS Y AFORO DE CAUDAL ..	52
6.3 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES TRANSVERSALES	54
6.4 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOMÉTRICA LA ZONA DE ESTUDIO	55
6.5 USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL	56
6.6 ANÁLISIS CLIMATOLOGICO Y METEREOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO	56
6.7 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS SEDIMENTOS.	58
6.8 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRASPORTE DE SEDIMENTO EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0.	62
7 RESULTADOS	64
7.1 RECONOCIMIENTO DE CAMPO	64
7.2 PUNTOS DE MUESTREO DE LA LÁMINA DE AGUA Y AFORO DE CAUDAL 67	67
7.3 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES TRANSVERSALES	70
7.4 GEOMORFOMÉTRIA LA ZONA DE ESTUDIO.	73

7.5	USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL.....	77
7.6	ANÁLISIS HIDROLÓGICO.....	78
7.7	GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS	82
7.8	GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO	88
7.9	MODELACIÓN HIDRÁULICA EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0	90
	CONCLUSIONES	99
	RECOMENDACIONES.....	101
	BIBLIOGRAFÍA	102

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Ancho de la cuenca.	31
Ecuación 2. Coeficiente de compacidad.	31
Ecuación 3. Razón de elongación.	31
Ecuación 4. Índice de alargamiento.	31
Ecuación 5. Pendiente de la cuenca.	32
Ecuación 6. Coeficiente de masividad.	32
Ecuación 7. Índice hipsométrico.	32
Ecuación 8. Relación de bifurcación.	33
Ecuación 9. Tiempo de concentración.	33
Ecuación 10. Formula universal de perdida del suelo.	40
Ecuación 11. Método logarítmico de caudales	44
Ecuación 12. Caudales estimados	44
Ecuación 13. Caudal sólido.	46
Ecuación 14. Flujo de sedimentos.	46
Ecuación 15. Parámetro de transporte	46
Ecuación 16. Numero de movilidad de sedimento	46
Ecuación 17. Velocidad de corte	46
Ecuación 18. Diámetro adimensional de la partícula.	46
Ecuación 19. Esfuerzo cortante.	47
Ecuación 20. Descarga del sedimento.	47
Ecuación 21. Caudal solido.	47
Ecuación 22. Relación de rugosidad de Nikaradse	47

Ecuación 23. Transporte total.	48
Ecuación 24. Transporte total por unidad de ancho.	48
Ecuación 25. Transporte de carga de la cama.	48
Ecuación 26. Capa inferior del transporte.	48
Ecuación 27. Capa media del transporte.	48
Ecuación 28. Capa superior del transporte.	48
Ecuación 29. Descarga de sedimento.	49
Ecuación 30. Concentración.	49
Ecuación 31. Esfuerzo cortante referencial.	50
Ecuación 32. Calculo de caudal.	69
Ecuación 33. Resultado calculo de caudal.	69

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1. a) Infraestructuras afectadas por socavación, b) árboles caídos y c) minas extractoras de material de río presentes en la zona de estudio.	51
Fotografía 2. Medición de nivel de agua. a). limnómetro 1. b). limnómetro 2	52
Fotografía 3. Levantamiento de secciones transversales de la zona de estudio.....	55
Fotografía 4. Trampas de sedimentos en cauce instaladas.	58
Fotografía 5. Recolección de sedimentos en ladera.....	59
Fotografía 6. Recolección y cuarteo de sedimentos.....	59
Fotografía 7. Secado de muestras de sedimentos recolectados.....	59
Fotografía 8. Cuarteo de muestras de sedimentos en laboratorio.	60
Fotografía 9. Juego de tamices y tamizadora utilizados en laboratorio.	61
Fotografía 10. Pesaje de muestra retenida en cada tamiz.	61
Fotografía 11. Equipo de limite liquido con muestra de suelo dividida.	61
Fotografía 12. Muestras para ensayo de limite liquido en proceso de secado.	62
Fotografía 13. Estructuras hidráulicas ubicadas en el cauce. a). Bocatoma Restrepo. b). Bocatoma Cumaral. c). Bocatoma rural quebrada Marayal	64
Fotografía 14. a) y b). Deslizamientos activos sobre la quebrada Marayal. c) y d). Deslizamientos activos sobre el caño Hondo.	65
Fotografía 15. Cauce principal del río Caney durante crecida, transportando caudales de escorrentía.	66
Fotografía 16. Cauce principal del río Caney días después de una crecida, evidenciando rápida evacuación de caudales de escorrentía.....	66
Fotografía 17. Aforo de caudal con el método de flotadores.....	69

Fotografía 18. Sitio de toma de muestra 1 L.....	83
Fotografía 19. Sitio de toma de muestra 2 L.....	83
Fotografía 20. Sitio de toma de muestra 3 L.....	83
Fotografía 21. Sitio de toma de muestra 4 L.....	84
Fotografía 22. Sitio de toma de muestra 5 L.....	84
Fotografía 23. Sitio de toma de muestra 6 L.....	84
Fotografía 24. Sitio de toma de muestra 1 C	85
Fotografía 25. Sitio de toma de muestra 2 C	85
Fotografía 26. Sitio de toma de muestra 3 C	85
Fotografía 27. Sitio de toma de muestra 4 C	86
Fotografía 28. Sitio de toma de muestra 5 C	86
Fotografía 29. Sitio de toma de muestra 6 C	86
Fotografía 30. Sitio de toma de muestra 1 D	87
Fotografía 31. Sitio de toma de muestra 2 D	87
Fotografía 32. Sitio de toma de muestra 3 D	87
Fotografía 33. Sitio de toma de muestra 4 D	88
Fotografía 34. Sitio de toma de muestra 5 D	88

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfico 1. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes	75
Gráfico 2. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia para la estación Buena Vista.....	79
Gráfico 3. Coeficiente pluviométrico municipio de Restrepo, Meta.	80
Gráfico 4. Hietogramas para diferentes periodos de retorno para el río Caney.....	81
<i>Gráfico 5. granulometría muestra 1 – ladera</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 6. granulometría muestra 2 – ladera</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 7. granulometría muestra 3 – ladera</i>	<i>83</i>
<i>Gráfico 8. granulometría muestra 4 – ladera</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 9. granulometría muestra 5 – ladera</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 10. granulometría muestra 6 – ladera</i>	<i>84</i>
<i>Gráfico 11. granulometría muestra 1 – cauce</i>	<i>85</i>
<i>Gráfico 12. granulometría muestra 2 – cauce</i>	<i>85</i>
<i>Gráfico 13. granulometría muestra 3– cauce</i>	<i>85</i>
Gráfico 14. granulometría muestra 4 – cauce	86
<i>Gráfico 15. granulometría muestra 5 – cauce</i>	<i>86</i>
<i>Gráfico 16. granulometría muestra 6 – cauce</i>	<i>86</i>
<i>Gráfico 17. granulometría muestra 1 – deslizamientos</i>	<i>87</i>
Gráfico 18. granulometría muestra 2 – deslizamientos	87
Gráfico 19. granulometría muestra 3 – deslizamientos	87
Gráfico 20. granulometría muestra 4 – deslizamientos	88
Gráfico 21. granulometría muestra 5 – deslizamientos	88

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del Río Caney, Restrepo -Meta.	23
Imagen 2. Esquema de una cuenca.	29
Imagen 3. Tipos de ríos según el gasto y la carga de sedimento;	30
Imagen 4. Clasificación de sedimentos.....	35
Imagen 5. Tipos de remoción en masa, a- caídas, b- volcamientos, c- reptación, d- flujos de masa, e- deslizamientos.....	36
Imagen 6. Interfaz de HEC-RAS.	42
Imagen 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas.	57
Imagen 8. Ubicación geográfica de las bocatomas encontradas en el río Caney.	65
Imagen 9. Puntos de muestreo de aforos, ubicación de trampas de la zona de estudio.	67
Imagen 10. Tramo de estudio con las secciones transversales	70
Imagen 11. Perfil transversal de la zona de estudio.....	71
Imagen 12. Orden de cauces de la microcuenca del Río Caney, Restrepo -Meta.	76
Imagen 13. Perfil transversal de microcuenca del río Caney.....	76
Imagen 14. Clasificación del uso del suelo del municipio de Restrepo, Meta	77
Imagen 15. Geología de la plancha 247 - Departamentos de Cundinamarca y Meta.	89
Imagen 16. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=10.....	91
Imagen 17. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=25.....	91
Imagen 18. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=50.....	92
Imagen 19. Variación en la acumulación de sedimentos en diferentes secciones transversales. .	93

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca	30
Tabla 2. Valores de rugosidad (n) recomendados para modelación hidráulica	42
Tabla 3. Datos requeridos para las ecuaciones de transporte.....	45
Tabla 4. Ubicación geográfica de las reglas limnimétricas instaladas.....	52
Tabla 5. Valores de FC recomendados para el cálculo de caudales, método flotadores	54
Tabla 6. Relación de estaciones climatológicas.....	57
Tabla 7. Datos para calculo de caudal	69
Tabla 8. Caudales aproximados medidos en campo	70
Tabla 9. Parámetros morfológicos de la microcuenca Caney.....	73
Tabla 10. Clasificación de los sedimentos analizados en laboratorio.....	82
Tabla 11. Zonas de Socavación y Sedimentación.....	95

RESUMEN

El municipio de Restrepo es vulnerable a crecientes torrenciales a causa del cambio en el uso de la tierra y la presencia de fallas geológicas. En consecuencia, se han presentado continuos deslizamientos, constituyendo factores de riesgo para determinadas zonas, incluyendo el casco urbano. Dentro de las principales cuencas afectadas se encuentra la del Río Caney. En esta zona, se ha observado un aumento en la frecuencia y magnitud de los desbordamientos, una constante acumulación de sedimentos y una inestabilidad en la dinámica del cauce, incrementando la vulnerabilidad por avenidas o crecientes torrenciales y arrastre de sedimentos afectando a habitantes y obras hidráulicas. Por lo tanto, el objetivo de la presente investigación es modelar y simular el transporte de sedimentos del río Caney, mediante el software gratuito HEC-RAS v. 5.0.5. Para ello, se recopiló información de las estaciones hidrometeorológicas Buenavista, Puente Carretera y Palmarito suministradas por el IDEAM. Asimismo, el Modelo Digital de Elevación suministrado por la USGS para determinar características físicas- morfométricas de la zona de estudio. También, se obtuvieron las curvas IDF por el método Precipitación Máxima Probable y distribución de Gumbel, Hietogramas. Después, se llevó a cabo el reconocimiento de la zona de estudio, ubicando 4 puntos de muestreo de sedimento en ladera y en el cauce. Luego, se levantaron perfiles transversales del cauce e instalaron de dos reglas limnimétricas y dos puntos adicionales para aforo de caudal; adicionalmente, se determinó la granulometría de 17 muestras de sedimentos. Finalmente, todos los datos obtenidos se ingresaron el HEC-RAS para modelar el proceso de arrastre y transporte de sedimento de la cuenca media del río Caney. Como resultado se determinó que la microcuenca es geológicamente vieja, sedimentaria con potencial erosivo; respecto a la granulometría de los sedimentos transportados en cauce son en su mayoría arenas mal gradadas, mientras que los sedimentos hallados en ladera además de arenas mal gradadas también hay

presencia de gravas gruesas y bloques. Respecto a la modelación se realizó utilizando en método de Yang, la modelación se realizó para un lapso de 15 días correspondientes del 15 al 30 de septiembre del 2018, utilizando tiempos de retorno para $Tr = 10$, $Tr = 25$, $Tr = 50$, arrojando la tendencia de la cuenca a ser colmatada de sedimentos provenientes de las partes altas, también se observan puntos de erosión y socavación.

INTRODUCCIÓN

El agua como esencia de la vida juega un papel muy importante para el hombre. Por tal razón, surge la necesidad de entender la dinámica y comportamiento de las fuentes hídricas. Hay que tener en cuenta que las corrientes de agua tienen un comportamiento complejo que depende de factores como la geología, el clima, la vegetación y otros factores influyen en forma determinantes.

El transporte de sedimentos producido por el agua que circula a través de ríos y canales es un factor importante en la planeación, el diseño y el funcionamiento de los proyectos de gestión de agua (OMM, 1994). En la actualidad se ha hecho cada vez más frecuente el uso de modelación para comprender el comportamiento de los distintos fenómenos de que se presentan en la realidad, es importante comprender tales fenómenos con el fin de predecir y anticipar medidas preventivas y correctivas evitando así consecuencias mayores.

La microcuenca del río Caney, está ubicada en la parte oriental del municipio de Restrepo, Meta. Esta cuenca presenta procesos de erosión y constantes deslizamientos en la parte alta y en sus principales afluentes, lo anterior por la presencia de fallas geológicas en la zona además de la creciente deforestación, esto y sumando las constantes precipitaciones que se presentan en la zona generan condiciones propicias para el arrastre de sedimentos. En el presente trabajo se realiza la modelación de arrastre de sedimentos empleando el modelo de Yang, mediante el software HEC – RAS v 5.0.5. Para el cumplimiento de este objetivo fue necesario reunir diversos datos sobre climatología, geología, entre otros. Para lo que fue necesario un monitoreo constante y el procesamiento de datos de diversas índoles.

1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Según la zonificación agroecológica ICA–IGAC, Restrepo se encuentra ubicado en la zona de planicie aluvial de Piedemonte, con un relieve ligeramente ondulado de pendientes hasta de 12% y tierras aluviales de relieve plano con pendientes hasta del 3% y de una superficie de 434 km². Por otra parte, en el municipio se presentan fallas geológicas como Servitá, Caney, Mirador-Restrepo y Cuatro Casas con evidencias de actividad geotectónica, esto debido a la cercanía con la Cordillera Oriental. Asimismo, se resalta que en la zona de estudio se presentan numerosos e importantes deslizamientos, pérdida de suelo, crecientes súbitas, arrastre, transporte de sedimentos y sedimentación, por último, se evidencia que hay desvíos y divagación del cauce.

Los principales factores que contribuyen al arrastre y transporte de sedimentos en el río Caney son la deforestación en las partes altas, así como los altos niveles de precipitación, creando condiciones propicias para la ocurrencia de procesos erosivos y remoción en masa como deslizamientos en las zonas inestables. En consecuencia, se ha observado un aumento en la frecuencia y magnitud de los desbordamientos en época de lluvias, una constante acumulación de sedimentos provenientes de las partes más altas y una inestabilidad en la dinámica del cauce, dichos factores, a su vez, favorecen los procesos de socavación y erosión de las riberas del cauce aguas abajo que debido al aumento de la carga del río eleva su caudal, evidenciándose la pérdida de vías de acceso en algunas veredas a causa de crecientes súbitas, existiendo un peligro para la población que habita en viviendas construidas en sitios muy cercanos al cauce, deteriorando la ronda de protección del recurso hídrico, lo que conlleva un aumento de amenazas en el área rural del municipio. Por lo tanto, surge la pregunta de investigación: ¿permite la modelación hidráulica entender el comportamiento del transporte sedimentos del río Caney?

2 JUSTIFICACIÓN

De acuerdo con Silva (2003), los procesos de erosión, desbordamientos y cambios de curso del río son procesos que continuamente se presentan en las cuencas hidrográficas, debido a las intensidades de lluvia, al manejo inadecuado de cobertura vegetal y uso del suelo e igualmente porque el río o quebrada tiende a recuperar su cauce de origen.

Debido a la ausencia de datos e información sobre la cuenca del río Caney se dificulta el adecuado desarrollo de obras hidráulicas de conservación, preservación, mitigación y control, por lo que la presente investigación busca brindar información que sirva como referente en el diseño e implementación de planes, políticas o programas estratégicos de desarrollo en la gestión del recurso hídrico y del riesgo, brindando de esta manera un enfoque sostenible mediante el adecuado aprovechamiento de los recursos y el uso racional de los mismos, así como de la gestión del riesgo, teniendo en cuenta que dicho afluente es fuente de abastecimiento del acueducto del casco urbano y rural de los municipios de Restrepo y Cumaral. En este sentido, la importancia de estudios de este tipo radica en la comprensión del comportamiento de este fenómeno. Por lo anterior, con el aporte de esta investigación a instituciones gubernamentales y demás organizaciones que puedan tomar acciones pertinentes se verá beneficiada la población del municipio que habita cerca de las laderas en un inminente riesgo.

3 OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GENERAL

- ✓ Modelar y simular el arrastre y transporte de sedimentos en la cuenca media del río Caney mediante HEC RAS, municipio de Restrepo- Meta.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Caracterizar morfométricamente la zona de estudio.
- ✓ Analizar la zona de estudio desde la climatología y meteorología.
- ✓ Caracterizar los sedimentos transportados en los tramos seleccionados del cauce.
- ✓ Realizar la modelación hidráulica e hidrológica del transporte de sedimento por medio del software HEC-RAS v 5.0.

4 ALCANCES Y LIMITACIONES

4.1 ALCANCES

Dadas las características del proyecto “Modelación y Simulación del Arrastre y Transporte de Sedimentos en la Cuenca Media del Río Caney Mediante HEC-RAS, Municipio de Restrepo-Meta”, el alcance fue modelar y simular el arrastre y transporte de sedimentos del tramo medio del cauce del río Caney, cabe mencionar se eligió el tramo medio como muestra significativa debido al difícil acceso a la parte alta de la cuenca, la carencia de equipos y recurso humano. Esto con el fin de analizar la manera como los sedimentos presentes en el cauce son transportados teniendo en cuenta las características físicas y geomorfológicas de la microcuenca.

4.2 LIMITACIONES

Entre las limitaciones del proyecto se encuentra la falta de equipos y herramientas básicas, por ejemplo, un molinete para el aforo de caudal. En vista de esto, se realizó la gestión para ver la posibilidad de disponibilidad de un molinete en la Corporación para el Desarrollo Sostenible del Área de Manejo Especial La Macarena (CORMACARENA) y en la secretaria del medio ambiente del municipio, obteniendo una respuesta negativa en ambos casos, por tal razón, el aforo de caudales se llevó a cabo con el método de flotadores ya que el método de trazadores fue complejo de implementar debido a la cantidad de caudal manejado.

Otra limitación que se presentó durante el desarrollo de esta investigación fue el funcionamiento de las minas de extracción de material de arrastre a lo largo del cauce del río en la zona de estudio, hay aproximadamente 4 concesiones de estas en la parte media del mismo, ya que con el desarrollo de sus actividades dificultaban la elección de sitios adecuados para la instalación de trampas de sedimentos tanto en ladera como dentro del cauce.

5 MARCO REFERENCIAL

5.1 MARCO CONTEXTUAL

La microcuenca del río Caney se encuentra ubicada en Restrepo, un Municipio del departamento del Meta, de la República de Colombia. De acuerdo con el Plan de Desarrollo Municipal (2012), Restrepo se encuentra ubicado a 4° 16" Latitud Norte y 73° 34" 25" de Latitud Oeste del Meridiano de Greenwich.

El río Caney está situado en la parte oriental del territorio municipal, nace en la parte alta de la Vereda Marayal en el piedemonte de la cordillera oriental, recorre las veredas Caney Alto, Caney Bajo, Medios, Sardinata, San Jorge y Vega Grande (ver imagen 1), finalmente, este desemboca en la cuenca del río Upín; cabe resaltar que esta cuenca es fuente de abastecimiento de los acueductos urbanos de los municipios de Restrepo y Cumaral y parte de la zona rural de Restrepo.

Los suelos a la altura de la zona de estudio están clasificados como suelo de uso suburbano tipo 3, donde prevalecen usos como Forestal, turismo, mejoramiento paisajista, agropecuario de bajo impacto (Plan de desarrollo 2012).

Entre las vías de acceso a la zona de estudio se encuentran la carretera nacional que comunica los municipios de Restrepo y Cumaral, por el oeste la carretera que comunica las veredas Los Medios y San Jorge. Por el este se encuentra la carretera que comunica a las veredas San Nicolas, Caney medio y Vega grande.

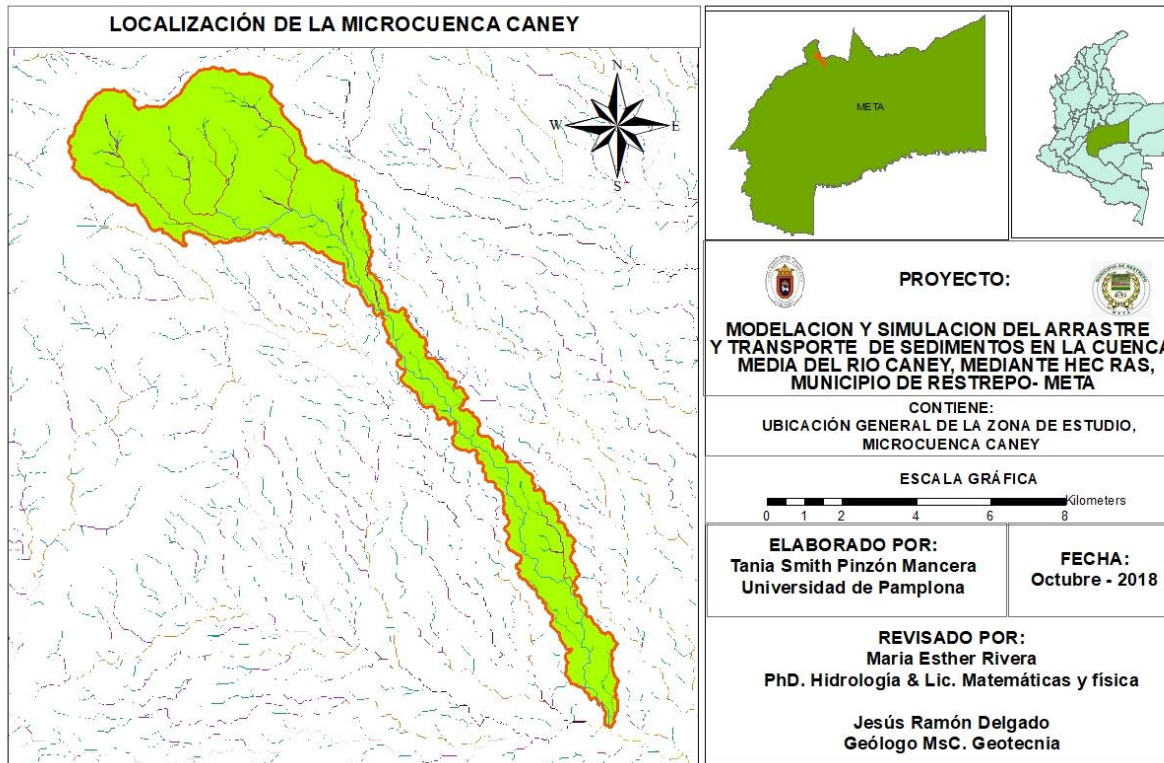


Imagen 1. Ubicación geográfica de la microcuenca del Río Caney, Restrepo -Meta.

Fuente: USGS, editado por Pinzón, (2018).

5.2 ANTECEDENTES

Hoy día existen muchos trabajos e investigaciones desarrolladas en el estudio y modelación del transporte de sedimentos, a nivel internacional se destacan algunos trabajos, como:

Bonilla (2014), en su investigación titulada "DETERMINACIÓN DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN SUSPENSIÓN DE FONDO Y TOTAL EN EL PUENTE GRANDE DEL RÍO DE COATA- PUNO" realiza un análisis de las características hidrométricas e hidráulicas del cauce, así como las características de los sedimentos. A partir de estos datos aplica las diferentes

fórmulas para la estimación del transporte de sedimentos de fondo como Fórmula de Mayer-Peter y Muller, Fórmula de Duboys, Fórmula de Einstein Brown, Fórmula de Einstein, entre otras. Por otra parte, en “ESTUDIO PARA ESTABLECIMIENTO DE TASAS DE ARRASTRE DE FONDO PARA EL PROYECTO DE GENERACIÓN HIDROELÉCTRICA HIDRO SAN BARTOLO MEDIANTE MODELO FÍSICO DE LECHO MÓVIL” realizada por Beltrán y Ordoñez (2012), se hace un análisis de ecuaciones para transporte de carga de lecho tales como Meyer-Peter, Nielsen Simplificada y Van Rijnse, la ecuación de Nielsen simplificada se ajustó adecuadamente, mientras que la formulación de Van Rijn resultó subestimada, y las tasas obtenidas con la formulación de Meyer-Peter resultaron sobreestimadas.

En la investigación TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DE FONDO EN EL RIO SALADO (SANTA FE, ARGENTINA) Szupiany, Trento y Álvarez (2005) calcularon el transporte de sedimentos de fondo (gsf) a partir de mediciones de campo (método indirecto) y aplicando distintas fórmulas para establecer, cuál de ellas presenta un mejor ajuste. Se realizaron dos relevamientos hidrográficos espaciados. Con esa información se determinó la carga de sedimentos de fondo por el método indirecto. Las variables hidrodinámicas empleadas en las fórmulas de transporte resultaron de la aplicación del modelo HEC-RAS, calibrado y validado en base a mediciones hidrométricas. De igual manera, Guzmán y Watson (2016) en la investigación “MODELACIÓN HIDRODINÁMICA Y DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO LA ESTRELLA, LIMÓN”, busco entender el comportamiento del río La Estrella, mediante un modelado hidrodinámico y de transporte de sedimentos. Inicialmente se hizo reconocimiento de la zona de estudio y análisis de datos hidrológicos. Posteriormente, se procedió a la modelación hidráulica utilizando el software HEC-RAS 4.1, bajo el régimen de flujo no variado; finalmente, se hizo la simulación de transporte de sedimentos utilizando el programa IBER 2.4.1, que permite

realizar transporte en suspensión y de fondo para flujo no uniforme, esto teniendo como bases datos de concentración de sólidos en suspensión de una estación cercana.

Según el ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL CICLO DE LOS SEDIMENTOS DE LA CUENCA EN EL RÍO ÉSERA (España) mediante un modelo hidrológico distribuido trabajo realizado por Francésa & Bussi, (2014), la cual emplea el modelo distribuido del ciclo hidrológico y de sedimentos TETIS. El submodelo de sedimentos se realizó mediante el empleo de los volúmenes de sedimentos depositados en el embalse medidos a partir de batimetrías históricas.

De acuerdo con Iroume (2003), en su investigación TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN UNA CUENCA DE MONTAÑA EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES DE LA NOVENA REGIÓN DE CHILE, se desarrollaron relaciones entre concentración de sedimentos en suspensión y caudales y entre transporte de fondo y caudales, que permitieron cuantificar en toneladas la carga total de sedimentos de la cuenca estudiada. Se sugiere que los principales cambios geomorfológicos en la red de drenaje están asociados a fenómenos de crecidas torrenciales con gran transporte de fondo o con corrientes con alta concentración de sedimentos. En este sentido Pérez & Perillo (2002), en el estudio TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL ARROYO NAPOSTÁ GRANDE, BAHÍA BLANCA, PROVINCIA DE BUENOS AIRES, realizan un análisis hidráulico y de sedimentos del arroyo Napostá Grande. Obtuvieron muestras del sedimento transportado como carga de fondo por medio de trampas. Paralelamente, se calculó el transporte como carga de fondo por medio de cuatro diferentes ecuaciones y se comparó con los valores medidos, determinándose cuál de las ecuaciones predijo mejor el valor del transporte. De las muestras de sedimento en suspensión se realizaron las curvas granulométricas y se calculó la velocidad de caída ponderada de esos sedimentos.

En Colombia también se han realizado relevantes investigaciones con respecto al tema de interés, a continuación, se citan algunas:

Acosta (2017), en su estudio APLICACIÓN DEL MODELO SOIL WATER ASSESSMENT TOOL (SWAT) PARA ESTIMAR LA PRODUCCIÓN Y TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LA QUEBRADA LA MARÍA, SAN JOSE DEL GUAVIARE, aplicó el modelo SWAT para estimar la producción, transporte y depositación de sedimentos. Por otro lado, se realizó la recolección y caracterización de sedimentos mediante la instalación de trampas Bunte el lecho del cauce, de nivel y caudal: Además se hizo un análisis hidrológico. Por su parte Villamizar R (2017), para su investigación ANALISIS DE AMENAZA POR CRECIENTES SUBITAS DE LA MICROCUENCA LA VIUDA, MUNICIPIO DE CHITAGÁ, NORTE DE SANTANDER, recopiló información de la cuenca, halló las características morfométricas, curvas IDF, Hietogramas, Hidrogramas, identificando los puntos de muestreo de sedimentos, aforo y nivel para posterior muestreo. con los datos compilados realizó la modelación hidrológica a través de los softwares ArcGis 10.2.2, y Hec-Ras 5.0.3.

Asimismo, Solano (2017), en su trabajo ANALISIS DE LOS PROCESOS EROSIVOS EN LAS VERTIENTES DE LA MICROCUENCA HATO VIEJO MUNICIPIO DE CHITAGÁ, observó la dinámica espacial de los cambios del uso del suelo y los procesos erosivos, mediante el análisis de los factores determinantes como: el potencial erosivo de las gotas de lluvia, los componentes topográficos, textura del suelo, uso/cobertura y prácticas de conservación, además se evaluó la susceptibilidad y amenaza por erosión en las vertientes de la quebrada a partir de dos factores detonantes como la precipitación y la sismología.

Por otra parte, Montoya & Montoya (2005), en el estudio TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN LAS CORRIENTES DEL DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA, mediante la

distribución espacial y temporal determinan la cantidad de sedimentos en suspensión. Además, se deducen fenómenos involucrados en los procesos de generación, transporte y sedimentación. Se estudia la relación con la geomorfología, las condiciones hidrológicas, climatológicas y la geología.

Adicionalmente, Suarez (2017), en ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN EL RÍO LA PLATA, MUTISCUA, NORTE DE SANTANDER – ZONA DE INFLUENCIA DE LA CABECERA MUNICIPAL, utilizó la recopilación de información de la cuenca mediante el levantamiento del perfil topográfico del cauce, características morfométricas, curvas IDF, Hietogramas, Hidrogramas, identificación de los puntos de muestreo de sedimento, calidad de agua, aforo y nivel para posterior muestreo. Con los datos recopilados se efectúa la modelación en Hec-Ras V 5.0 y ArcGis 10.2.

Según Montoya &González (2010), en su trabajo titulado PROPUESTA METODOLÓGICA PARA EL ANÁLISIS MORFOSEDIMENTOLÓGICO EN CUENCAS ALTAMENTE URBANIZADAS. CASO DE ESTUDIO QUEBRADA DOÑA MARÍA (COLOMBIA), la realización del análisis en planta de la cuenca, análisis de los perfiles altimétricos de las corrientes, levantamiento de información en campo (aforos líquidos, sólidos y observaciones generales de la morfología de la cuenca) y estimación de la carga y capacidad de carga de sedimentos, constituyen las diferentes etapas de la metodología planteada.

A nivel local, en el municipio se han llevado algunas investigaciones como la adelantada por INGEOMINAS (1992), en la investigación MEMORIA TECNICA DEL MAPA DE ZONIFICACION DE AMENAZAS NATURALES POR INUNDACIONES Y AVALANCHAS TORRENCIALES (RESTREPO-META), hacen una caracterización dinámica, identificación de amenazas naturales potenciales y las posibilidades de explayamiento e inundaciones de los ríos

junto con los aspectos geológicos y morfológicos del terreno. La síntesis se presenta en forma de un mapa puede orientar los futuros planes urbanos de la ciudad de Restrepo. Además, Alvarado & Barrera (2015), en el estudio EVALUACION GEOMORFOLOGICA, MULTITEMPORAL, HIDROLOGICA Y GEOTECNICA PARA EL AREA COMPRENDIDA EN LAS COORDENADAS N: 963019,58 E: 1059435, N: 963234, E: 1059435, N: 962712, E: 1059929, N: 962651, E: 1059651 MUNICIPIO DE RESTREPO META, mediante un análisis geomorfológico, Hidrológico, caracterización geotécnica de los materiales se evaluaron las diferentes variables que han actuado en el modelamiento del Rio y la hidráulica fluvial. Mediante la interpretación del análisis multitemporal se pudo establecer los cambios realizados por el rio tales, como curvaturas, posibles zonas de socavamientos laterales y las afectaciones que sufre las infraestructuras cerca de la zona de estudio. Se pudo hacer una estimación de material de arrastre en las zonas de deposición del abanico aluvial.

5.3 MARCO TEÓRICO

Según Monsalve G. (1995) una hoya hidrográfica es un área definida topográficamente, drenada por un curso de agua, tal que todo el caudal afluyente es descargado a través de una salida simple. Las características de esta dependen de la morfología (forma, relieve, red de drenaje, etc.), los tipos de suelos, la capa vegetal, la geología, las prácticas agrícolas, etc. Para Vásquez A. (1997), una cuenca es un sistema dinámico donde el agua y los sedimentos drenan hacia un punto común (ver imagen 2).

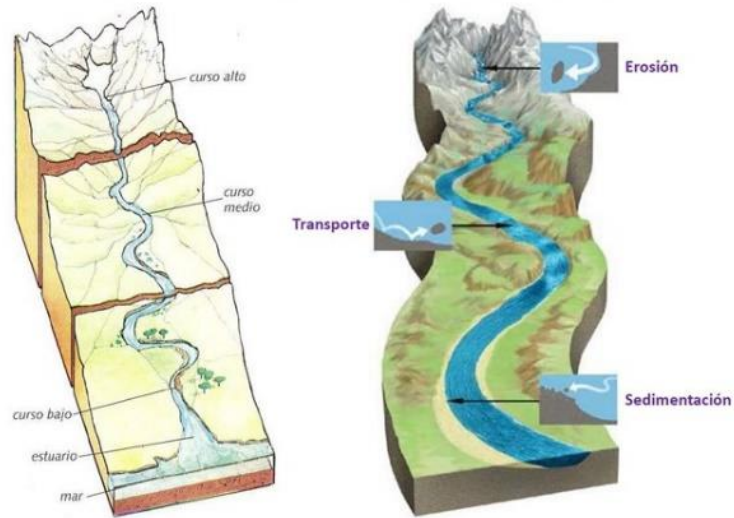


Imagen 2. Esquema de una cuenca.

Fuente: Ayén, (2016).

Nava A. y Cortés D. (2009) definen los tipos de ríos según el gasto y la carga de sedimento. Existen diferentes tipos de ríos de acuerdo con su forma los cuales pueden ser rectos, mendreantes, trezados y de acuerdo con el transporte de material en suspensión, y con arrastre de fondo o la combinación de estas dos, como se muestra en la imagen 3.

Según Gaspari (2012), el análisis morfométrico es el estudio de un conjunto de variables de superficie, de relieve y drenaje; lo cual permite la interpretación de la funcionalidad hidrológica y en la definición de las estrategias para la formulación de su manejo. La morfología de la cuenca queda definida por tres tipos de parámetros: (a) parámetros de forma, (b) parámetros de relieve y (c) los parámetros relativos a la red de drenaje.

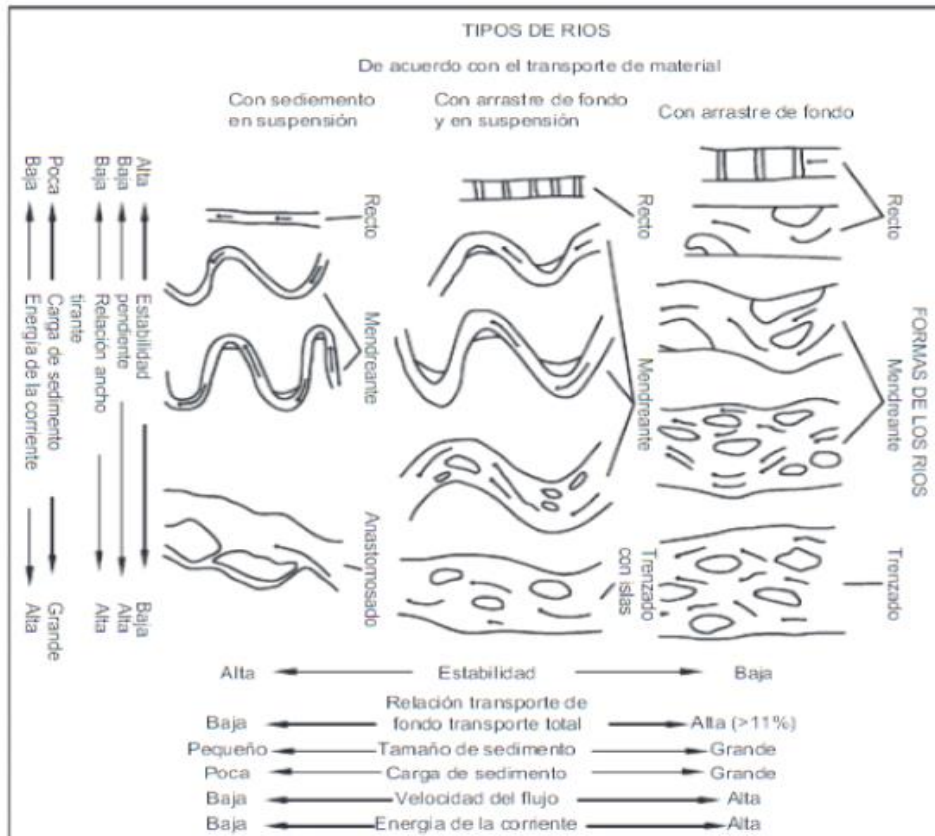


Imagen 3. Tipos de ríos según el gasto y la carga de sedimento;

Fuente: Nava y Cortés. (2009)

En la tabla 1 se relacionan algunos parámetros morfométricos que se tienen en cuenta.

Tabla 1. Parámetros morfométricos de la cuenca

Parámetro morfométrico	Significado morfométrico
Parámetros de forma	
Área (A)	Está definida como la proyección horizontal de toda la superficie de drenaje de un sistema de escorrentía dirigido-directa o indirectamente a un mismo cauce natural. Corresponde a la superficie delimitada por la divisoria de aguas de la zona de estudio; se expresa normalmente en km ² .
Perímetro (P)	Es la longitud sobre un plano horizontal, que recorre la divisoria de aguas. Este parámetro se mide en unidades de longitud y se expresa normalmente en metros o kilómetros.
Longitud de la cuenca (L)	Se define como la distancia horizontal desde la desembocadura de la cuenca (punto de desfogue) hasta otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

Ancho de la cuenca (B)	Se define como la relación entre el área y la longitud de la cuenca
Factor de Forma de Horton (Kf)	<p>En la ecuación 1, se observa la relación entre el área y el cuadrado de la longitud de la cuenca.</p> <p>Ecuación 1. Ancho de la cuenca.</p> $kf = A/L^2$ <p>Donde, L – longitud de la cuenca, A – area de la cuenca.</p> <p>Intenta medir cuan cuadrada (alargada) puede ser la cuenca. Una cuenca con un factor de forma bajo, esta menos sujeta a crecientes que una de la misma área y mayor factor de forma.</p>
Coefficiente de compacidad (kc)	<p>Se define como la razón entre el perímetro de la cuenca y el perímetro de la circunferencia. Este coeficiente adimensional, independiente del área estudiada tiene por definición un valor de uno para cuencas imaginarias de forma exactamente circular (ver Ecuación 2).</p> <p>Ecuación 2. Coeficiente de compacidad.</p> $Kc = \frac{P}{2\sqrt{\pi \cdot A}}$ <p>Donde, P – perimetro de la cuenca , A – area de la cuenca.</p>
Razón de Elongación (Re).	<p>Es la relación entre el diámetro de un círculo con igual área que la de la cuenca y la longitud máxima de la misma. La ecuacion 3 es la propuesta por Shumm (1956).</p> <p>Ecuación 3. Razón de elongación.</p> $Re = D/Lc = 1.1284\sqrt{Ac} / Lc$ <p>Donde, Lc – longitud de la cuenca, Ac – area de la cuenca.</p>
Índice de Alargamiento	<p>Muestra el comportamiento de la cuenca en la longitud máxima encontrada de la cuenca, medida en el sentido del río principal y el ancho máximo de ella medido perpendicularmente, su calculo se realiza como se muestra en la ecuacion 4.</p> <p>Ecuación 4. Índice de alargamiento.</p> $Ia = L/B$ <p>Donde, L – longitud de la cuenca, B – ancho de la cuenca.</p>

Parametros de relieve

Curva Hipsométrica Permite conocer la distribución de masa en la cuenca según la altitud de la misma representada en una gráfica con el área acumulada expresada en porcentaje (km²) en las abscisas y en las ordenadas la altitudes de cada una de las fajas altitudinales.

Pendiente media de la cuenca (s) Es uno de los principales parámetros que caracteriza el relieve de la misma y permite hacer comparaciones entre cuencas para observar fenómenos erosivos que se manifiestan en la superficie (ver ecuacion 5).

Ecuación 5. Pendiente de la cuenca.

$$s = 100 * (\Sigma Li)(E)/A$$

Donde, S – Pendiente media de la cuenca (%), ΣLi – Suma de las longitudes de las curvas de nivel (km), E – Equidistancia entre curvas de desnivel (km), A – Superficie de la cuenca (Km²).

Elevación media A partir de la curva hipsométrica, se determinará la elevación media equivalente al 50% del área de la cuenca, donde en el eje “X” del gráfico se aplicará el porcentaje.

Coefficiente de masividad Es la relación entre la elevación media de la cuenca y su superficieE, se calcula mediant la ecuacion 6.

Ecuación 6. Coeficiente de masividad.

$$Cm=Amed/A$$

Donde, Cm – Coeficiente de masividad, Amed – Altitud media, A –Área.

Índice Hipsométrico se obtiene a partir de la Ecuación 7.

Ecuación 7. Índice hipsométrico

$$IH:(Emedia-Emin)(Emax-Emin)$$

Donde, Emedia – Elevación media, Emax – Elevación máxima, Emin – Elevación mínima.

Parámetros relativos al drenaje

Orden de los cauces El orden de las corrientes es una clasificación que proporciona el grado de bifurcación dentro de la cuenca. Según Horton (1945), es una medida de la ramificación del cauce principal. Mientras mayor sea el grado de corriente, mayor será la red y su estructura más definida.

Relación de bifurcación (Rb) Horton también introdujo éste concepto para definir el cociente entre el número de cauces de cualquier orden (Nu) y el número de cauce de orden (u) del siguiente orden superior, es decir

Ecuación 8. Relación de bifurcación.

$$Rb = Nu / Nu + 1$$

Donde, Rb –relación de bifurcación Nu – número total de cauces con orden U,
U – numero de orden de cauce.

Tiempo de concentración. de Tiempo que tarda en llegar una gota de agua de lluvia desde el extremo hidráulicamente más alejado de la cuenca a la sección de salida, calculándose mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 9. Tiempo de concentración.

$$tc = (4\sqrt{S} + 1.5 L) / (0.8 \sqrt{H})$$

Donde, tc – Tiempo de concentración (h) , S – Área de la cuenca (km²) , L – Longitud del cauce principal (km) , H – Elevación media de la cuenca (km).

Fuente: Cardona, modificado por Pinzón (2018).

Según Rocha A. (1998), los sedimentos fluviales se originan en la erosión de la cuenca. La erosión es un proceso natural que determina y modela la forma de la corteza terrestre. El producto de la erosión es transportado por el agua o el viento hacia los ríos donde recibe el nombre de material sólido o sedimentos. El sedimento que se incorpora a los cauces fluviales puede provenir de deslizamiento, desplomes, etc., e ingresar violentamente, en grandes cantidades, al cauce fluvial.

Para Espinoza (2001) el arrastre de sedimentos en los ríos depende de elementos hidrológicos, hidráulicos, geológicos, geográficos y biológicos, además de factores como la duración e intensidad de lluvia, la pendiente, el uso de suelo en la cuenca, la cobertura vegetal, el tipo de suelo, las actividades humanas.

Beltrán & Ordoñez (2012), describen las propiedades características de los sedimentos teniendo en cuenta, el peso específico de la partícula sólida que corresponde al peso por unidad de volumen de sólido se obtiene del producto de la densidad de masa por la aceleración de la

gravedad. Generalmente, en los cauces naturales el peso específico tiene poca variación, densidad relativa que es el cociente o proporción entre el peso específico de la partícula sólida y el peso específico del agua, es un valor adimensional, peso específico sumergido de la partícula que de acuerdo con el principio de Arquímedes se afirma que el peso específico de una partícula sumergida en agua es igual a la diferencia entre el peso específico de la partícula sólida y del agua, tamaño del sedimento la propiedad más importante, debido a que es una representación del volumen por la poca variación del peso específico de las partículas, distribución granulométrica para lo cual se realizan análisis granulométricos con tamices para determinar las diferentes fracciones de material, forma de la partícula que es una característica que determina el movimiento de la partícula, generalmente se define a través de la redondez, esfericidad y el factor de forma., concentración, es decir, la cantidad de partículas contenidas en el seno de un líquido, la cual se puede calcular comparando o volúmenes., porosidad y velocidad de caída que caída es la máxima velocidad que la partícula alcanza cuando cae libremente en agua.

Teniendo en cuenta con lo expresado por Acosta (2017), los elementos fundamentales para entender y predecir la evolución de los ríos son el transporte, erosión y sedimentación. Según lo citado por Suarez (2017), el transporte de sedimentos en los canales naturales varía en el tiempo y el espacio. Debido a que los sedimentos arrastrados se van depositando aguas abajo, el transporte de sedimentos en el cauce que genera colmatación, socavación y/o reducción en el canal del río generando inconvenientes como modificación del cauce.

Existen dos formas principales de transporte de sedimentos: de fondo (rodando o saltando) y en suspensión (ver imagen 4). En el transporte de fondo, se movilizan principalmente las partículas gruesas que provienen de la erosión de cauces. El transporte en suspensión moviliza el

material fino proveniente tanto de la erosión laminar de la cuenca como de los cauces (García, 2009).

De acuerdo con Silva (2003) el transporte de los sedimentos se compone de carga de fondo, carga en suspensión y carga en saltación. La suma de las tres se denomina carga total. De igual manera, los sedimentos de fondo son material sólido que se mueve cerca del lecho del cauce, es alimentada por materiales transportados mediante procesos erosivos. Por otra parte, los sedimentos en suspensión son materiales finos que llegan a la corriente por procesos de erosión o por lavado de material suelto de las márgenes, estos se mantienen en suspensión mientras la fuerza ascensional generada por la velocidad sea mayor al peso de la partícula. Complementariamente los sedimentos en saltación producidos por irregularidades en el fondo del cauce, parte de la carga de fondo sube y se mantiene en suspensión por un periodo corto.

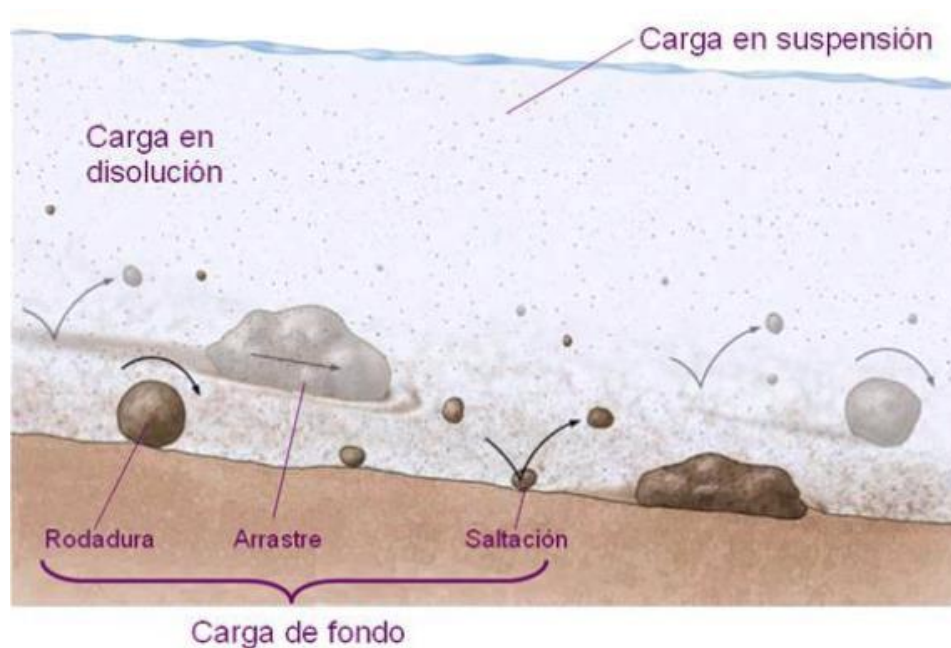


Imagen 4. Clasificación de sedimentos.

Fuente: Moreno, (2015).

Silva (2003), menciona que una cuenca aporta sedimentos a la carga total de dos maneras:

Por remoción en masa el cual está asociado con deslizamientos de grandes masas de material sólido que se han concentrado en sitios inestables. Los fenómenos de remoción en masa se clasifican en diferentes tipos dependiendo de las causas y la forma en que se originan como se observa en la imagen 5.

PMA: GCA, (2007) y Silva (2003), reciben el nombre de caídas cuando se presentan desprendimientos de bloques de rocas o porciones compactadas, se llaman volcamientos debido a que toda su masa está concentrada en un solo punto de apoyo, generando un giro sobre ese punto por su propio peso o por acción del agua. Asimismo, se encuentra la reptación, el cual es extremadamente lento de la parte superficial del terreno, generalmente el desplazamiento es de unos pocos centímetros al año afectando grandes áreas.

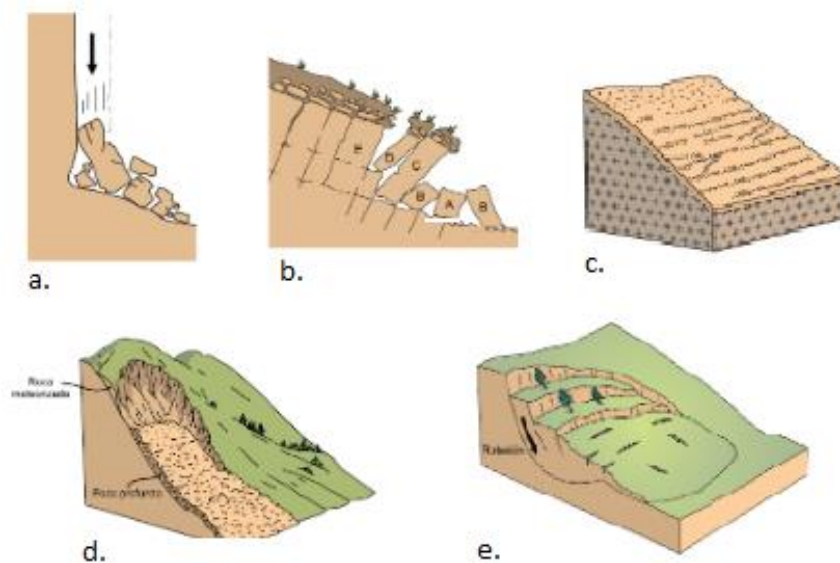


Imagen 5. Tipos de remoción en masa, a- caídas, b- volcamientos, c- reptación, d- flujos de masa, e- deslizamientos.

Fuente: PMA: GCA, (2007).

Igualmente existen fenómenos de remoción llamados deslizamientos, los cuales se dan cuando la unidad de suelo presenta remoción en masa superficial, estos deslizamientos a su vez se clasifican en deslizamientos traslacionales, ocurriendo cuando la masa de suelo se está desplazando de adentro hacia afuera y de arriba abajo, en zonas con pendientes moderadamente inclinadas; deslizamientos rotacionales cuando son presentados en superficies de deslizamientos internos, estos tipos de deslizamientos son presentados de forma circular a cóncava (Silva 2003 y PMA: GCA, 2007)

Otro tipo de remoción en masa son los flujos que son movimientos de terreno, ya sea capa vegetal o fragmentos de roca dentro de una porción de suelo que corre a través de una superficie, hay diferentes tipos de flujo como avalancha, causadas por la acumulación de materiales debido a deslizamientos acompañadas de gran cantidad de agua. Este conjunto de materiales puede adquirir gran velocidad ocasionando graves destrucciones. Por otra parte, los flujos de tierras se presentan de manera más lenta. Estos procesos presentan por lo general una zona de alimentación en la parte superior, que aporta los materiales desplazados. Otro tipo son los flujos de detritos se movilizan en forma rápida a muy rápida, dependiendo de la pendiente del terreno y del contenido de humedad (Silva 2003 y PMA: GCA, 2007).

Según lo mencionado por el Servicio geológico para Colombia (SGC,2017), la erosión es un proceso de pérdida continua y selectiva de materiales ocasionada por agentes naturales o antrópicos. Cuando la erosión se produce sin intervención antrópica, se denomina erosión geológica o natural, debido a la acción de agentes como el agua (hídrica), viento (eólica), entre otros, sobre los materiales de las capas superficiales roca o suelo; de lo contrario se considera erosión antrópica o acelerada, en la que el hombre altera los procesos naturales principalmente con

prácticas como el laboreo en el sentido de la pendiente, cultivos, compactación del terreno, deforestación, quemas, minería, entre otras actividades.

En contraste, la erosión hídrica ocurre en las laderas y es el resultado del arranque, transporte y depósito de los suelos por la acción de las aguas pluviales y de escorrentía (Escobar & Duque, 2018).

Para Silva (2003), la erosión hídrica se genera cuando las gotas de lluvia que caen sobre un suelo tienen suficiente energía para remover partículas de este, dejándolas libres para que puedan ser transportadas por la escorrentía superficial hacia las corrientes de drenaje. Las manifestaciones de la erosión hídrica son erosión pluvial la cual es causada por el impacto del agua lluvia sobre el suelo. Induciendo a que el suelo sufra una compactación por la energía de las gotas y la acción hidráulica del agua; asimismo, el escurrimiento superficial difuso ocurre en suelos desprovistos de vegetación en pendientes donde ha actuado la saltación pluvial dando lugar a que el agua remueva las partículas de suelo y materia orgánica (Gray and Leiser, 1982.); otra forma de manifestación de la erosión hídrica es mediante surcos de erosión o escurrimiento superficial concentrado, este ocurre cuando el escurrimiento concentrado labra pequeños canales más o menos paralelos, independientes. Finalmente, las cárcavas, las cuales son el proceso de erosión en zanjas profundas, de gran tamaño, estimuladas por la concentración de aguas y sólidos. El proceso crece gracias a la profundización del fondo y los procesos remontantes. Según Gray y Leiser (1982.), se presentan 4 estados en el desarrollo de cárcavas: 1) formación y entallamiento de un canal o zanja, por escurrimiento concentrado de agua, 2) erosión remontante desde la base del canal y ensanchamiento de este, 3) cicatrización y 4) estabilización.

En la actualidad la magnitud de la erosión hídrica se mide por medio de la Pérdida de Suelo. Esta pérdida es un índice medio anual del potencial erosivo de la cuenca; se calcula por medio de

fórmulas semiempíricas que consideran un pequeño porcentaje de pérdida de suelo y se expresa en milímetros por año (mm/año) (Silva, 2003).

Los factores que actúan en la generación de la pérdida de suelo en una cuenca son la lluvia, el cual es un agente que inicia el proceso erosivo. La magnitud de su efecto depende de su distribución temporal y espacial sobre la cuenca; para su cuantificación es necesario considerar intensidades de lluvias, frecuencia y el cubrimiento sobre el área de la cuenca; morfometría del área vertiente que da características como el área, la longitud de recorrido de la escorrentía y la pendiente del terreno y finalmente suelo el cual incluye la textura y la estructura que tiene suelo en el momento de comenzar las lluvias.

Por otra parte, La clasificación de la cobertura y uso de la tierra constituye uno de los aspectos más importantes dentro del análisis físico para manejo de cuencas, por su influencia en la formación y evolución de los suelos. Espinosa C (2003) afirma que en vista de que el uso de la tierra está en función de sus limitantes, Potencialidades y según las posibilidades y costumbres de los habitantes del territorio, se termina evaluándose y clasificándose en una serie de categorías. Por otro lado, determinar el uso actual del suelo e identificar sus principales coberturas vegetales, nos permite establecer los grados de intervención del hombre en ecosistemas de interés, cuál es su estado de conservación, además de identificar los principales conflictos socio ambientales existentes y establecer las responsabilidades sociales en el deterioro y las estrategias de ordenamiento y restauración.

Uno de los métodos más conocidos para determinación de pérdida media de suelo anual es la fórmula Universal de Pérdida de Suelo, propuesta por Wischmeier & Smith en 1958 (Ecuación 10).

Ecuación 10. Formula universal de pérdida del suelo.

$$E = R * K * L * S * C * P$$

Donde, E– pérdida de suelo, R– factor de erosividad, K– factor de erodabilidad del suelo, L y S– longitud y pendiente, C– factor de cultivo y P – prácticas de manejo del suelo.

Las variables L, S, C y P pueden estimarse utilizando métodos agrológicos, pero las otras dos tienen dificultades porque representan características propias del régimen pluviométrico y del tipo de suelo en el área de estudio en relación con la energía con que las gotas de lluvia llegan al suelo y con la resistencia del suelo al golpe de las gotas.

Como dentro de una misma cuenca pueden presentarse regímenes diferentes de lluvia, no homogeneidad de los suelos, variaciones en la pendiente, diferencias en cobertura vegetal, etc, se hace necesario dividir la cuenca en subcuencas de acuerdo con las circunstancias, calcular la pérdida de suelo en cada subcuenca y luego hacer el tránsito del sedimento producido hasta el río. Esto implica que cada subcuenca deberá calibrarse independientemente de las otras.

Existe una amplia gama de software que modelan la hidrodinámica de ríos en 1-D y 2-D, y algunos también incluyen un módulo para el cálculo de transporte de sedimentos, entre ellos se encuentran HEC-RAS el cual es un software que se utiliza para el análisis hidráulico y de sedimentos (USACE 2016). Calcula niveles de agua para cada sección de estudio, descargas, y condiciones de borde (Ahmad y Simonovic 2006). Dicho software ha demostrado ser capaz de brindar simulaciones consistentes (Fleenor y Jensen 2003, NWS 2007).

Según HEC-CEIWR, (2016), HEC-RAS contiene varios componentes de análisis fluvial para: cálculos de perfil de superficie de agua de flujo constante; simulación de flujo inestable de una y dos dimensiones; cálculos de transporte de sedimentos límite móvil; y análisis de calidad

del agua. Un elemento clave es que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométricos comunes y rutinas de cálculo geométricas e hidráulicas comunes.

El usuario a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI) interactúa con HEC-RAS (ver imagen 6). El foco principal en el diseño de la interfaz fue facilitar el uso del software, manteniendo al mismo tiempo un alto nivel de eficiencia para el usuario. La interfaz proporciona las siguientes funciones: gestión de archivos, entrada y edición de datos, análisis hidráulicos, tabulación y pantallas gráficas de datos de entrada y salida, mapeo de inundación y animaciones de propagación de agua, instalaciones de informes, finalmente Contexto sensible ayuda (HEC-CEIWR, 2016).

Para la obtención de las rugosidades (n-Manning) se basa en la vegetación existente, irregularidades del cauce, obstrucciones, tamaño y forma del cauce, material en suspensión y de fondo. El coeficiente de rugosidad se basa en los lineamientos facilitados por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos incluidos en el Manual de Uso de HEC-RAS. En la tabla 2, se observan los valores de rugosidad de Manning que son recomendados para cauces naturales por el HEC-RAS, explicando los criterios utilizados en la selección de los coeficientes de rugosidad en cada uno de los trayectos del río.

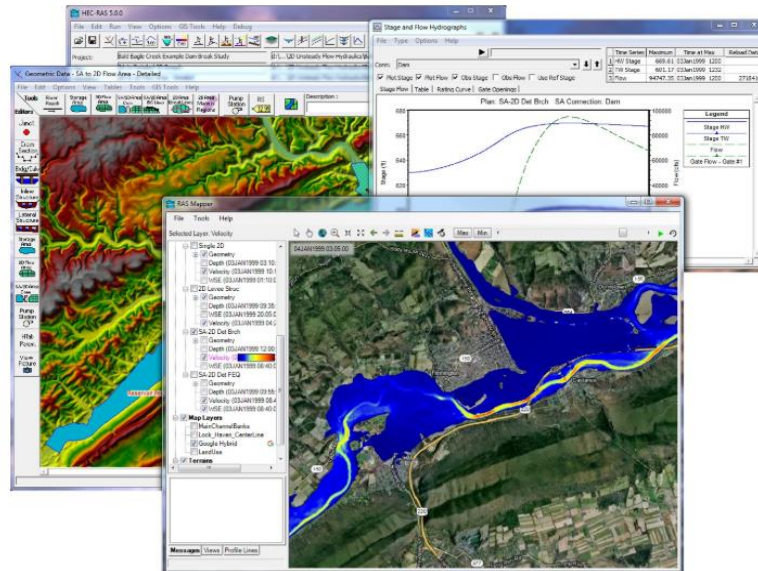


Imagen 6. Interfaz de HEC-RAS.

Fuente: HEC-CEIWR, (2016).

Tabla 2. Valores de rugosidad (n) recomendados para modelación hidráulica

Descripción de la corriente	Mínimo	Normal	Máximo
A Cauces naturales			
A.1 Cursos secundarios (ancho de la superficie libre en crecida < 30 m)			
<i>A.1.1 Cursos en planicies</i>			
-Limpios, rectos, sin fallas ni pozos	0.025	0.030	0.033
-Rectos con algunas piedras y pastos	0.030	0.035	0.040
-Limpios con meandros, con algunos pozos y bancos	0.033	0.040	0.045
-Meandros con algunas piedras y pastos	0.035	0.045	0.050
-Meandros con muchas piedras	0.045	0.050	0.060
-Tramos sucios, con pastos y pozos profundos	0.050	0.070	0.080
-Tramo con mucho pasto, pozos profundos y cauce en crecida con muchos arbustos y matorral	0.075	0.100	0.150
<i>A.1.2 cursos montañosos, carentes de vegetación en el fondo, laderas con pendientes pronunciadas y árboles y arbustos en las laderas que se sumergen en niveles de crecida</i>			
-Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
-Cauce de cantos rodados, con grandes rocas	0.040	0.050	0.070
A.2 Cursos en planicies inundadas			
<i>A.2.1 Zonas de pastos, sin arbustos</i>			
-Pasto corto	0.025	0.030	0.035
-Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>A.2.2 Zonas cultivadas</i>			
-Sin cultivo	0.020	0.030	0.030

-Cultivos sembrados en línea en fase de madurez fisiológica	0.025	0.035	0.045
-Cultivos sembrados a voleo en fase de madurez fisiológica	0.030	0.040	0.050
A.2.3 Zonas arbustivas			
-Escasos arbustos y pasto abundante	0.035	0.050	0.070
-Pequeños árboles y arbustos sin follaje (parada invernal)	0.035	0.050	0.060
-Pequeños árboles y arbustos con follaje (fase vegetativa)	0.040	0.060	0.080
-Arbustos medianos a densos durante la parada invernal	0.045	0.070	0.110
-Arbustos medianos a densos durante la fase vegetativa	0.070	0.100	0.160
A.2.4 Zonas arbóreas			
-Sauces densos, temporada invernal	0.110	0.150	0.200
-Terreno claro con ramas sin brotes	0.030	0.040	0.050
-Terreno claro con ramas con gran crecimiento de brotes	0.050	0.060	0.080
-Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación por debajo de las ramas	0.080	0.100	0.120
-Zonas de explotación maderera con árboles caídos, poco crecimiento en las zonas bajas y nivel de inundación que alcanza a las ramas	0.100	0.120	0.160
A.3 Cursos importantes (ancho de la superficie libre en crecida >30m)			
En este caso, los valores de coeficiente n son inferiores a los correspondientes de cauces secundarios análogos, ya que los bancos ofrecen una resistencia efectiva menor			
-Sección regular sin rocas ni arbustos	0.025		0.060
-Sección irregular y rugosa	0.035		0.100

Fuente: HEC-RAS citado por Oliveras, (2016).

Teniendo en cuenta que en las épocas de avenida es casi imposible aforar ya sea por no contar con equipos especializados o por no poner en peligro la vida de los aforadores; en este periodo los caudales se pueden estimar a partir de la interpolación de los niveles alcanzados por las aguas en el punto o zona de medición. Por lo tanto, se construyen las curvas de calibración o gasto para los distintos puntos de aforo en la microcuenca con los datos de nivel y caudal registrados en el periodo de estudio (Acosta, 2017).

Se emplea el método logarítmico, considerando que la sección de los puntos de aforo en la microcuenca puede aproximarse a una figura geométrica conocida. El método Logarítmico se basa

en la experiencia demostrada de que la Curva de Calibración queda representada por una parábola de orden superior, cuya expresión se da en la ecuación 11.

Ecuación 11. Método logarítmico de caudales

$$Q=(H-H_0)^n$$

Donde, Q – Caudal en m³/s para en nivel H, k y n – Constantes por determinar, H₀-Lectura de la mira para una descarga nula.

En primer lugar, se asumen valores de H₀ y se determinan los valores de Log(H-H₀) y Log(Q), y posteriormente se calcula los coeficientes n y k de la ecuación 12. Seguidamente se remplazan las constantes determinadas en la ecuación 11 para los diferentes niveles obteniéndose de esta manera los caudales estimados.

Ecuación 12. Caudales estimados

$$Log(Q)=nLog(H-H_0)+Log(k)$$

Donde, N – número de aforos.

La aplicación HEC-RAS, versión 5.0, tiene las siguientes funciones de transporte de sedimentos que son:

- ✓ Ackers y White
- ✓ Engelund y Hansen
- ✓ Meyer-Peter y Müller (MPM)
- ✓ Toffaleti
- ✓ Yang (ecuación para arena y gravas)
- ✓ Wilcock y Crowe

La función que se seleccionará para un cauce en particular será aquella que, dentro de los límites de aplicación para los que fue obtenida, cumpla con la mayor cantidad de parámetros usados en su derivación. Los parámetros evaluados son el diámetro promedio del material, la

pendiente y el ancho del cauce. Por las limitaciones de HEC-RAS, la función debe ser una de las que se incluyen en la lista anterior. En caso de que haya dos o más funciones que satisfacen los tres criterios, entonces se añadirán dos variables más que son la velocidad promedio del flujo y la profundidad del agua. Estos valores deben ser representativos de los flujos promedio en el cuerpo de agua (Silva & Rivera, 2016).

De acuerdo con Quispe (2013), los principales parámetros requeridos para el desarrollo de las ecuaciones se relacionan en la tabla 3, describen el movimiento de las partículas cuya variación radica en el diámetro máximo de la partícula

Tabla 3. Datos requeridos para las ecuaciones de transporte.

Parámetro	Símbolo
Temperatura	T
Viscosidad cinemática	V
Calado	D
Pendiente	Sm
Diámetro medio de la partícula	Dsi
Diámetro máximo de la partícula	d50 – d84 – d90 – d65
Velocidad media	V
Caudal	Q
Densidad del agua	Yw
Ancho del caudal	B
Gravedad específica del sedimento	S

Fuente: Quispe, (2013)

Acker y White (1973), es una función de carga total desarrollada con datos de un aforador para gradaciones que van desde arenas a gravas finas. La hidrodinámica se seleccionó para cubrir un rango de configuraciones del lecho que incluye: ondas, dunas y condiciones de lechos planos.

El sedimento suspendido es función de la velocidad de corte mientras que la carga de lecho es función del esfuerzo cortante. Para este método son requeridos una serie de datos relacionados en la tabla 3 que posteriormente se reemplazan en las siguientes ecuaciones (ecuaciones 13 – 18).

Ecuación 13. Caudal sólido.

$$G = Y_w * Q * X$$

Ecuación 14. Flujo de sedimentos.

$$X = \frac{G_{gr} * S_{dsi}}{D * \left[\left(\frac{U_{star}}{v} \right)^n \right]}$$

Ecuación 15. Parámetro de transporte

$$G_{gr} = C * \left(\left(\frac{F_{gr}}{A} \right) - 1 \right)^m$$

Ecuación 16. Numero de movilidad de sedimento

$$F_{gr} = HF * F_{gr}$$

Ecuación 17. Velocidad de corte

$$U_{star} = (g * D * S)^{\frac{1}{2}}$$

Ecuación 18. Diámetro adimensional de la partícula.

$$D_{gr} = D_{si} \left[\frac{g * (s-1)}{v^2} \right]^{1/3}$$

Donde, D_{gr} - diámetro adimensional de partícula, U_{star} - velocidad de corte, F_{gr} - Número de movilidad de sedimento ajustado por el factor de Evasión, G_{gr} - Parámetro de transporte, G -caudal sólido, X - flujo de sedimentos X , en partes por millón del peso del fluido.

La ecuación de Engelund & Hansen (1967) que representa la carga total del transporte de sedimentos efectuada mediante datos de aforador, pero en este caso emplearon partículas de arenas de tamaño relativamente uniforme entre 0.19 mm y 0.03 mm, como función simple de la velocidad del canal, la fuerza cortante en el lecho y el material de graduación d84. Las ecuaciones 19 y 20 son Recomendadas principalmente para sistemas arenosos por sus características.

Ecuación 19. Esfuerzo cortante

$$T_o = Y_w * D * S$$

Ecuación 20. Descarga del sedimento.

$$g_s = 0.05 * s * (v^2) * [(df/g * (s - 1))^{1/2}] * [T_o / ((\gamma_w * s - \gamma_w) * df)]^{3/2} * [B]$$

Donde, T_o = Esfuerzo cortante, g_s = descarga del sedimento.

Por otra parte, una de las ecuaciones (ecuaciones 21 y 22) más empleadas en el transporte de sedimentos es la de Meyer, Peter & Müller (1948) puesto que relaciona el exceso de fuerza cortante, su ecuación de carga de lecho se basó en datos de aforos para arenas y grabas bajo condiciones de lecho plano. Este método es sugerido para cálculo de gravas puesto que tiende a subestimar el transporte de materiales finos.

Ecuación 21. Caudal solido

$$G_s = \left[\left(\left(\frac{RKR}{g} \right)^{3/2} * Y_w * D * S - 0.047 * (Y_w * S - Y_w) * d_{Si} \right) / \left(0.25 * \left(\frac{Y_w}{g} \right)^{1/3} * \left(\frac{Y_w * S - Y_w}{Y_w * S} \right)^{2/3} \right) \right]^{3/2} * B$$

Ecuación 22. Relación de rugosidad de Nikaradse

$$RKR = \left(\frac{f}{8} \right)^{1/2} * (V / (g * D * S))^{1/2}$$

Donde, G_s = caudal sólido, RKR = relación de rugosidad de Nikaradse

De igual manera la función de transporte de Toffaleti (1968) es de carga total desarrollada principalmente para partículas de tamaño en el entorno de la arena. Esta función es considerada para ríos largos y no se ve influenciada por la velocidad de corte ni esfuerzo cortante en el lecho, se basa en regresiones de temperatura y un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas. Esto se relaciona a continuación en la ecuación 23.

Ecuación 23. Transporte total.

$$G = g_{si} * B$$

En las ecuaciones 24 – 28 relacionadas a continuación muestran los procesos requeridos en la ecuación anterior.

Ecuación 24. Transporte total por unidad de ancho.

$$g_{si} = g_{sbi} + g_{ssLi} + g_{ssMi} + g_{ssUi}$$

Ecuación 25. Transporte de carga de la cama.

$$g_{sbi} = M_t * (2 * d_{st})^{(1 + n_y - 0.756 * z_i)}$$

Ecuación 26. Capa inferior del transporte.

$$g_{ssLi} = M_t * [((R/11.24)^{(1 + n_y - 0.756 * z_i)}) - (2 * d_{si})^{(1 + n_y - 0.756 * z_i)}] / (1 + n_y - 0.756 * z_i)$$

Ecuación 27. Capa media del transporte.

$$g_{ssMi} = M_i * [((R/11.24)^{(0.244 * z_i)}) * ((R/2.5)^{(1 + n_v - z_i)}) - ((R/11.24)^{(1 + n_v - z_i)})] / (1 + n_v z_i)$$

Ecuación 28. Capa superior del transporte.

$$g_{ssUi} = M_i * [((R/11.24)^{(0.244 * z_i)}) * ((R/2.5)^{(0.5 * z_i)}) * ((R)^{(1 + n_v - 1.5 * z_i)}) - ((R/2.5)^{(1 + n_v - 1.5 * z_i)})] / (1 + n_v - 1.5 * z_i)$$

Donde, g_{si} - transporte total por unidad de ancho, g_{sbi} - transporte de carga de la cama, g_{ssli} - capa inferior del transporte, G_{ssMi} - capa media del transporte, g_{ssUi} - capa superior de transporte, G - transporte total (ton/día)

Otra función de carga total de transporte es aquella que se basó en el movimiento del lecho en el producto de la velocidad y el esfuerzo cortante. La ecuación 29 de Yang (1973 – 1984) en función de la concentración (ecuación 30) se desarrolló en función de gran variedad de aforadores y datos de campo. La ecuación está compuesta por dos relaciones separadas de transporte de arenas y gravas. La transición entre arena y grava es suavizada con el fin de evitar grandes discontinuidades. Yang tiende a ser muy sensible a la velocidad de la corriente y es más sensible a la velocidad de caída que todas las demás ecuaciones.

Datos requeridos en la tabla 8 con diámetro máximo de la partícula igual a d_{50} .

Ecuación 29. Descarga de sedimento.

$$[G = (\gamma_w * Q * C_t * 0.4536) / (1000000)]$$

Ecuación 30. Concentración.

$$C_t = 10^{(\log(ct))}$$

Donde, G = descarga del sedimento (Kg/s), C_t = concentración (ppm)

Por su parte Wilcock (2001) entrega la ecuación de carga sobre el lecho diseñada para superficies graduadas que contengan tanto arenas como gravas. El método de transporte superficial se encuentra basado en la teoría que el movimiento de los sedimentos depende principalmente del material en contacto directo con el flujo. Wilcock, tiene una función oculta que se encarga de la reducción potencial del

transporte de partículas en función de la premisa de que estas pueden ser depositadas entre grandes depósitos de gravas y no experimentar en su totalidad la fuerza del campo de flujo.

Finalmente, la teoría central de la ecuación de Wilcock (ecuación 31) es que el potencial de transporte de la grava aumenta conforme aumenta en contenido de arena. Un esfuerzo cortante referencial adimensional es calculado para el sustrato el cual es una función del contenido de arena en la superficie del lecho.

Ecuación 31. Esfuerzo cortante referencial.

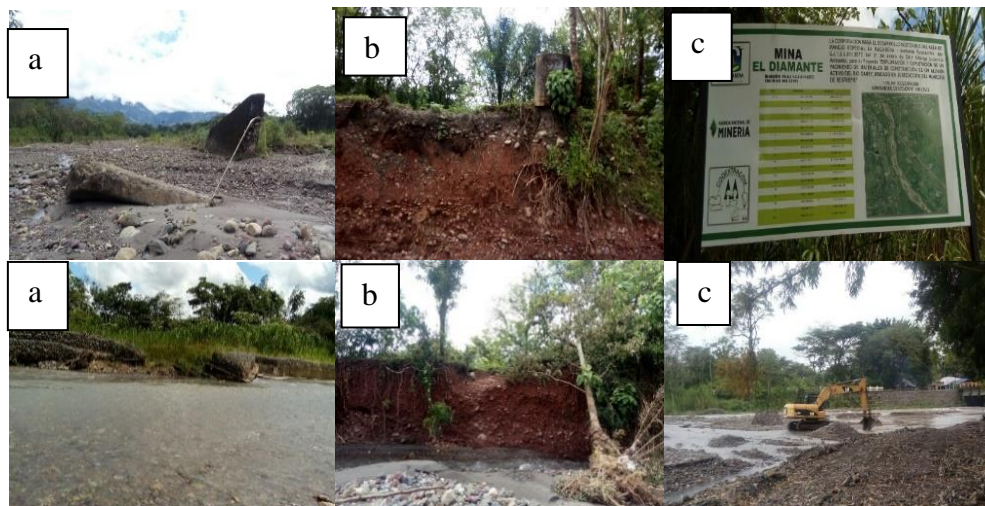
$$\tau^*m = 0.021 + 0.015e^{-20Fs}$$

Donde, τ^*m = esfuerzo cortante referencial, Fs = contenido de arena en porcentaje.

6 METODOLOGÍA

6.1 VISITAS DE CAMPO A LO LARGO DEL RÍO Y SUS PRINCIPALES AFLUENTES.

Después de realizar el reconocimiento de Rio Caney, se delimito la zona de estudio, comprendida entre los puntos con coordenadas geográficas $4^{\circ}15'59.54''N$ $73^{\circ}32'41.55''O$ – $4^{\circ}14'46.18''N$ $73^{\circ}32'4.84''O$, dichos puntos están ubicados en la zona media del cauce del río, la distancia entre estos puntos es aproximadamente 2.60 kilómetros; se hallaron zonas e infraestructuras altamente afectadas por socavación, así como árboles caídos. Además, de presencia de actividades antrópicas como el funcionamiento de varias minas de extracción de materiales para construcción (Fotografía 1). Dichas actividades pueden ser causa importante en el transporte de sedimentos reflejados aguas abajo, los cuales influyen en el daño de infraestructuras, debido a que dichas extractoras acumulan material dentro del cauce del río y al momento de una creciente la corriente arrastra gran parte de este.



Fotografía 1. a) Infraestructuras afectadas por socavación, b) árboles caídos y c) minas extractoras de material de río presentes en la zona de estudio.

Fuente: Pinzón, 2018.

6.2 PUNTOS DE INSTALACIÓN DE LIMNÍMETROS Y AFORO DE CAUDAL

La ubicación geográfica seleccionada para instalar las reglas limnimétricas se relaciona en la tabla 4, para la regla limnimétrica 1 fue el puente vía nacional Restrepo – Cumaral y la regla limnimétrica 2 una infraestructura antes del puente que comunica la vereda Los Medios con la vereda San Jorge (Fotografía 2). Estos puntos se eligieron teniendo en cuenta las recomendaciones citadas por la OMM (2011) y el IDEAM (2007). Posteriormente, se procedió a levantar las secciones transversales del sitio y a la instalación de reglas limnimétricas para el registro de los niveles de agua que se realizaron 3 veces al día: 7 am, 12 medio día y 6 pm.

Las reglas limnimétricas fueron construidas manualmente bajo los parámetros y criterios de La Organización Mundial de Meteorología (2011) con el fin de determinar la variación temporal de niveles del río.

Tabla 4. Ubicación geográfica de las reglas limnimétricas instaladas

Regla limnimétricas	Ubicación geográfica
1	4°15'59.84"N - 73°32'41.86"O
2	4°13'20.20"N - 73°31'29.40"O

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 2. Medición de nivel de agua. a). limnómetro 1. b). limnómetro 2

Fuente: Pinzón, 2018.

Para la medición de caudal se tuvo en cuenta las recomendaciones citadas por Chamorro. G, (2011) tales como: un tramo donde no exista en lo posible bloques grandes o troncos que afecten la medición del caudal aproximado, se seleccionaron dos secciones transversales a lo largo de un tramo de un canal recto, dichas secciones transversales estaban separadas de manera que fuera posible medir con la mayor exactitud el tiempo invertido por el flotador en pasar de una sección transversal a la siguiente. Por otra parte, algunos de los factores que se consideran al planificar el número y distribución de las mediciones del caudal a lo largo del año son:

- a) la estabilidad de la relación altura-caudal.
- b) las características estacionales del caudal y su variabilidad.
- c) la accesibilidad del medidor en distintas estaciones del año.

Según lo mencionado en el manual de prácticas hidrológicas de la OMM (2011) será necesario efectuar mediciones periódicas con el fin de definir las variaciones de la relación altura-caudal. Se recomienda un mínimo de 10 mediciones del caudal anuales. Debido a que la estación hidrométrica con la que contaba la microcuenca está suspendida aproximadamente 15 años por daños causados por la misma fuerza del agua, no es posible adquirir registros de dicha información, y teniendo en cuenta que no se cuenta con equipos más precisos como molinetes para el aforo, se estableció el método de flotadores para determinación de caudales, el cual se realizó en dos monitoreos durante 6 días a la semana por 2 semanas, realizando 6 aforos por día; un monitoreo se realizó en épocas con crecidas moderadas y el otro en época cercana al estiaje.

Para el cálculo de caudal por el método del flotador se implementó el uso de un factor de corrección (FC) recomendado en el manual 5 – medición de agua del Ministerio de agricultura y Riego - MINAGRI, a través de la Dirección General de Infraestructura Agraria y Riego – DGIAR

de Lima, Perú. El valor de FC se debe seleccionar de acuerdo con el tipo de río o canal y a la profundidad de este, de acuerdo con los valores de la tabla 5 relacionada a continuación, para efectos de este trabajo el FC utilizado fue de 0.5.

Tabla 5. Valores de FC recomendados para el cálculo de caudales, método flotadores

Tipo de cauce	Factor de corrección FC
Canal revestido en concreto, profundidad del agua > 15	0.8
Canal en Tierra, profundidad del agua > 15 cm	0.7
Riachuelos profundidad del agua > 15 cm	0.5
Canales de tierra profundidad del agua < 15 cm	0.25 – 0.5

Fuente: MINAGRI, 2015.

6.3 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES TRANSVERSALES.

En el desarrollo de este proyecto es importante contar con información de las condiciones topográficas del terreno, una de las limitantes es que no se cuenta con equipos de alta precisión. Por tal razón, se opta efectuar el levantamiento de secciones transversales del tramo de estudio, empleando GPS Etrex 20X marca Garmin, cinta métrica y reglilla (Ver fotografía 3). El procedimiento para determinar el área de una sección se realiza de la siguiente manera: se ubican los extremos de la sección en ambas orillas, se amarra o ata una cuerda a dos estacas ubicadas en los extremos de la sección, se mide el ancho superficial, se divide en partes iguales (fajas) la sección. Así mismo, se mide la profundidad del agua para cada faja, se registran los datos en el formato de campo, luego se calcula el área para cada faja. Finalmente, se suma el área de todas las

fajas. Las secciones se levantaron cada 10 y 20 metros para un total de 132 secciones transversales aproximadamente.



Fotografía 3. Levantamiento de secciones transversales de la zona de estudio

Fuente: Pinzón, 2018.

6.4 CARACTERIZACIÓN GEOMORFOMÉTRICA LA ZONA DE ESTUDIO.

Se realizó mediante el procesamiento geográfico con el software ArcGIS, teniendo como base el Modelo Digital de Elevación (DEM), el cual se descargó de la plataforma EarthExplorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). El procesamiento inicia corrigiendo el DEM de posibles imperfecciones, luego a través de la herramienta de Arctoolbox, Spatial Analysts tools – Hydrology y se utilizaron diferentes herramientas disponibles en el software, tales como basin, fill, Flow accumulation, Flow direction, entre otras. A partir de esto, se obtienen parámetros como la curva hipsométrica, el ancho, el coeficiente de compacidad (K_c), el factor de forma, el sistema de drenaje; características del relieve, pendiente, elevación media, tiempo de concentración, dirección de flujo, líneas de drenaje, área (A), perímetro (P), longitud axial (L_{ax}), orden de la cuenca, pendiente media (S_m), altura máxima y mínima, entre otros.

6.5 USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL.

Para la determinación de la cobertura vegetal se utilizó la metodología de NDVI y Software ArcGIS, permite describir, caracterizar, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), esto con su respectiva verificación en campo.

Con respecto al uso del suelo se utilizó la información del Plan de Desarrollo Municipal de Restrepo (2018) y se verificó con visitas en campo.

La verificación en campo de los tipos de cobertura vegetal y usos del suelo fue principalmente por vía terrestre. Se levantaron puntos de verificación, los cuales validaron el contenido del Mapa de Cobertura Vegetal de la cuenca y el mapa de usos potenciales del suelo suministrado por el Plan de Desarrollo Municipal.

6.6 ANÁLISIS CLIMATOLOGICO Y METEREOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

A partir de la serie histórica de datos hidrometeorológicos suministrados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) de las estaciones Buenavista, Puente Carretera y Palmarito aledañas a la zona de estudio se obtuvieron los datos faltantes empleando el método de proporciones normales. Luego, se determinaron las curvas IDF bajo la metodología planteada por Vargas y Díaz, (1998) y se analizaron de acuerdo con lo planteado por Castañeda (2014). Posteriormente, se obtuvieron los Hietogramas de lluvia organizados y los hidrogramas. Se resalta que el IDEAM no cuenta con las curvas IDF de la zona de estudio. Esta última

perteneciente a la corriente del Caney está suspendida desde el año 2002. En la imagen 7 se observa la ubicación espacial de dichas estaciones.



Imagen 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas.

Fuente. IDEAM, 2018.

En la tabla 6 se relacionan los datos generales de las estaciones utilizadas durante el desarrollo de este proyecto.

Tabla 6. Relación de estaciones climatológicas.

Estación	Código	Categoría	Latitud	Longitud	Altitud	Registro
Palmarito	35037110	limnimetrica	4.233333	73.533333	349	1979 – 2001
Pte Carretera	35057040	limnimetrica	4.198344	73.570197	390	1979 – 2002
Buenvista	35030090	Pluviográfica	4.274778	73.617833	1280	1994 – 2017

Fuente: IDEAM, elaborado por Pinzón, 2018.

6.7 CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE LOS SEDIMENTOS.

Para la recolección de las muestras de sedimentos, se llevó a cabo el reconocimiento de la zona, observándose en forma general los depósitos de sedimentos y las estructuras hidráulicas en el cauce. A partir de esto, se diseñaron, elaboraron e instalaron dos trampas de sedimentos en el cauce (Fotografía 4) y dos trampas de sedimentos en ladera (Fotografía 5). Cada trampa de cauce consiste en dos marcos de varilla de hierro de 30 x 40 cm, separados 20 cm, cuatro estacas de hierro y un saco de malla y lona para retener los sedimentos (Tipo Bunte con modificaciones por el autor). En el caso de las trampas de ladera fueron cuadradas con dimensiones de 80x60 cm en material de lona y ajustadas en las esquinas con estacas. Se tuvo en cuenta consideraciones importantes como el fácil acceso y recolección de los sedimentos colmatados o depositados en el margen del cauce. Una vez recolectadas las muestras de sedimento, se realizó un cuarteo para tomar una muestra representativa (Fotografía 6), en total se recogieron 17 muestras 6 de ladera, 6 de cauce y 5 de deslizamientos. Después, fueron llevadas al sitio dispuesto para el secado (Fotografía 7), luego, se llevaron al laboratorio de Mecánica de Suelos de la Universidad de Pamplona, donde se realizó la caracterización granulométrica de las muestras recolectadas, partiendo de un cuarteo para tomar una muestra representativa (ver fotografía 8).



Fotografía 4. Trampas de sedimentos en cauce instaladas.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 5. Recolección de sedimentos en ladera

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 6. Recolección y cuarteo de sedimentos.

Fuente: Pinzón, 2018



Fotografía 7. Secado de muestras de sedimentos recolectados.

Fuente: Pinzón, 2018.

Una vez pesada dicha muestra se empleó la serie de tamices 4, 20, 40, 80, 100 y 200 que fueron llevados a la tamizadora por aproximadamente 5 minutos (ver fotografía 9). Luego, se pesa y calcula el porcentaje retenido y porcentaje que pasa por cada tamiz (ver fotografía 10) para obtener la curva granulométrica. Asimismo, en las muestras que fue necesario, se halló el límite líquido, la ejecución de este ensayo se llevó a cabo por medio de la Norma Técnica Colombiana (NTC 4630) Numeral 9 “Determinación del Limite Liquido, Método de Casagrande”, se inició haciendo uniformidad de la muestra utilizando los más finos para tal fin, en un recipiente se humedece y mezcla la muestra hasta hacer una pasta uniforme que es llevada a la cazuela donde se extiende con una espátula formando una capa uniforme, luego, haciendo uso del ranurador se hace una ranura sobre la línea central (ver fotografía 11). Posteriormente, se levanta y agita la cazuela haciendo uso de la manija hasta que las dos mitades del suelo se pongan en contacto, se anota el número de golpes requeridos, posteriormente se toma una pequeña porción que se pesa y lleva al horno por una hora (ver fotografía 12). Este procedimiento se repite adicionando más cantidad de agua a la muestra. Finalmente, la clasificación de las muestras de suelo se realiza de acuerdo con los resultados de los cálculos obtenidos.



Fotografía 8. Cuarteo de muestras de sedimentos en laboratorio.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 9. Juego de tamices y tamizadora utilizados en laboratorio.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 10. Pesaje de muestra retenida en cada tamiz.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 11. Equipo de limite liquido con muestra de suelo dividida.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 12. Muestras para ensayo de limite liquido en proceso de secado.

Fuente: Pinzón, 2018.

6.8 MODELACIÓN HIDRÁULICA DEL TRASPORTE DE SEDIMENTO EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0.

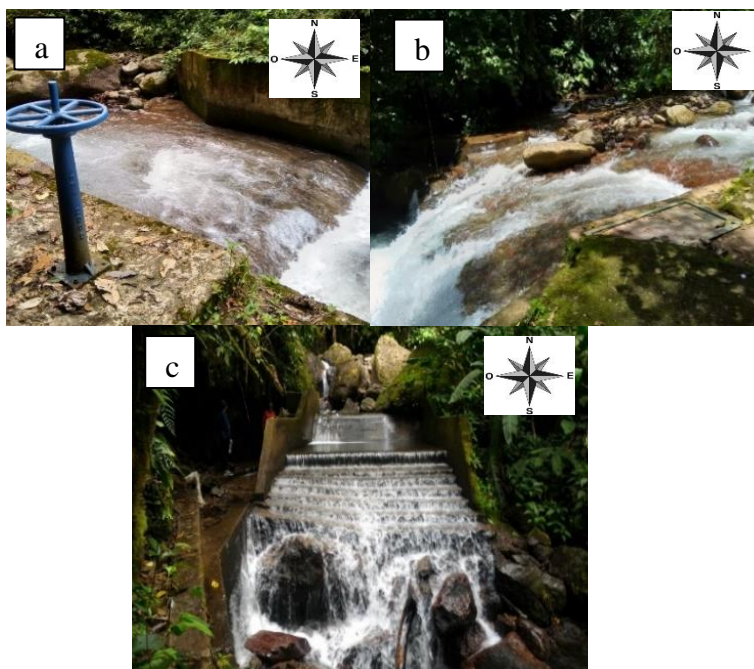
Con respecto a la modelación del transporte de sedimentos de la parte media del Río Caney se realizó en el software HEC-RAS. Para ello, se requiere en primera instancia la creación de la geometría, curvas de nivel del cauce principal y sus afluentes (ArcGIS), seguidamente se incluyen secciones transversales del cauce principal y sus afluentes incluyendo el valor de las rugosidades de Manning (n), las cuales se eligen basadas en la vegetación existente, irregularidades del cauce, obstrucciones, tamaño y forma del cauce, material en suspensión y de fondo, teniendo en cuenta los lineamientos facilitados por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos incluidos en el Manual de uso de HEC-RAS presentado en la tabla 2 citada en el apartado 5.3 del marco referencial. Esto, junto con la información de granulometría de los sedimentos y empleo de los modelos que se encuentran incluidas en el mismo, determinando cual se adapta mejor a las características propias de la zona de estudio (Suarez, 2017). El río debe ser identificado con su nombre al igual que los afluentes. Según Lluén (2015), la modelación final consiste en mostrar

la propagación del flujo sobre el terreno, para los diferentes períodos de retorno, así como mostrar la evolución de la superficie de agua en ciertos puntos de análisis. Por último, se determinará el transporte de sedimento mostrando la variación en las secciones transversales a causa del transporte de sedimentos.

7 RESULTADOS

7.1 RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Durante el transcurso de tres semanas se hizo un recorrido por la parte alta del río Caney, ubicando geográficamente las diferentes obras hidráulicas existentes en la zona de estudio. Se identificaron las bocatomas del acueducto de Restrepo que abastece las principales veredas, la del acueducto de Cumaral, el cual capta 76 L/s aproximadamente, las cuales están ubicadas en el cauce principal del río Caney. Sin embargo, la bocatoma ubicada en la quebrada Marayal, el cual es uno de los principales afluentes, capta aproximadamente 10 L/s (ver fotografía 13). Adicionalmente, se identificaron los predios y se hizo verificación en campo de deslizamientos que se han presentado en los principales afluentes del río Caney como la quebrada Marayal, caño Hondo (ver fotografía 14), y caño Caneycito, en lo posible se tomaron muestras de suelos para realizar posteriormente granulometría.



Fotografía 13. Estructuras hidráulicas ubicadas en el cauce. a). Bocatoma Restrepo. b). Bocatoma Cumaral. c). Bocatoma rural quebrada Marayal

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 14. a) y b). Deslizamientos activos sobre la quebrada Marayal. c) y d). Deslizamientos activos sobre el caño Hondo.

Fuente: Pinzón, 2018.

En la imagen 8 relacionada a continuación se muestra la ubicación geográfica de las bocatomas encontradas en el cauce de la microcuenca.



Imagen 8. Ubicación geográfica de las bocatomas encontradas en el río Caney.

Fuente: Pinzón, 2018.

Adicionalmente, se hizo un registro fotográfico durante crecidas evidenciándose caudales de escorrentía que se evacuan rápidamente en el transcurso de algunos días, también se observó la divagación constante del cauce (ver fotografías 15 y 16).



Fotografía 15. Cauce principal del río Caney durante crecida, transportando caudales de escorrentía.

Fuente: Pinzón, 2018.



Fotografía 16. Cauce principal del río Caney días después de una crecida, evidenciando rápida evacuación de caudales de escorrentía.

Fuente: Pinzón, 2018.

En la fotografía 15 se observa el caudal del cauce, transportado durante una crecida luego de un lapso donde se presentaron lluvias en la parte alta. Así mismo, se evidenció un ligero aumento en la turbiedad del cauce. Por otro lado, en la fotografía 16 se observa el mismo lugar, unos días después de la crecida, se evidencia una completa evacuación de los caudales de escorrentía cambiando la dirección normal del flujo del agua en la microcuenca.

7.2 PUNTOS DE MUESTREO DE LA LÁMINA DE AGUA Y AFORO DE CAUDAL

En la imagen 9 se observa la ubicación general de los puntos de aforo de la lámina de agua, así como la ubicación de las diferentes trampas de sedimento tanto en cauce como en ladera.

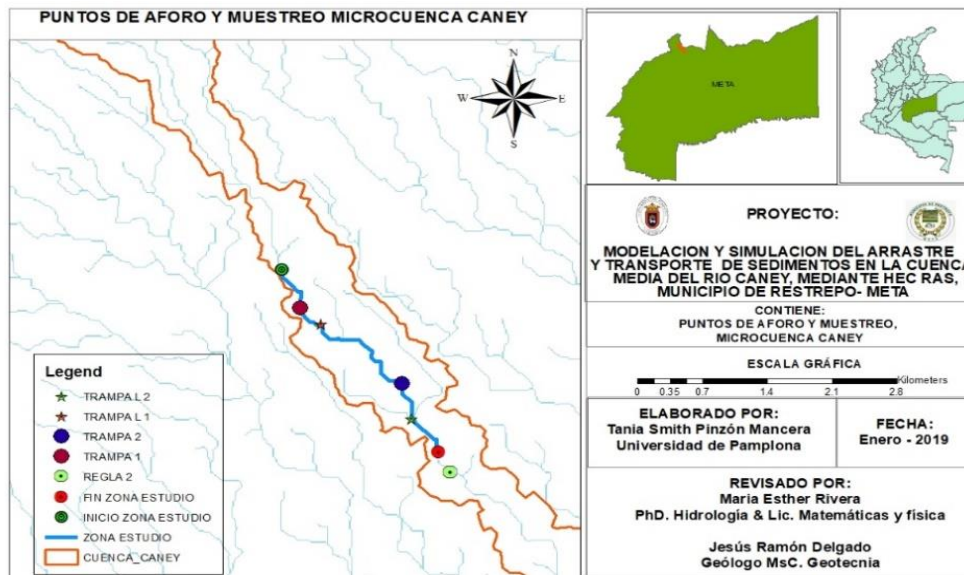


Imagen 9. Puntos de muestreo de aforos, ubicación de trampas de la zona de estudio.

Fuente. Pinzón, (2018).

El grafico 1 muestra la variación de la altura de la lámina de agua en el tiempo en la microcuenca Caney, debido a las precipitaciones presentadas en la zona de influencia. Cabe mencionar que el nivel del lecho del río variaba significativamente por las fuertes precipitaciones, siendo necesario recalcular la profundidad de la lámina de agua y ajustar el cero en la reglilla.

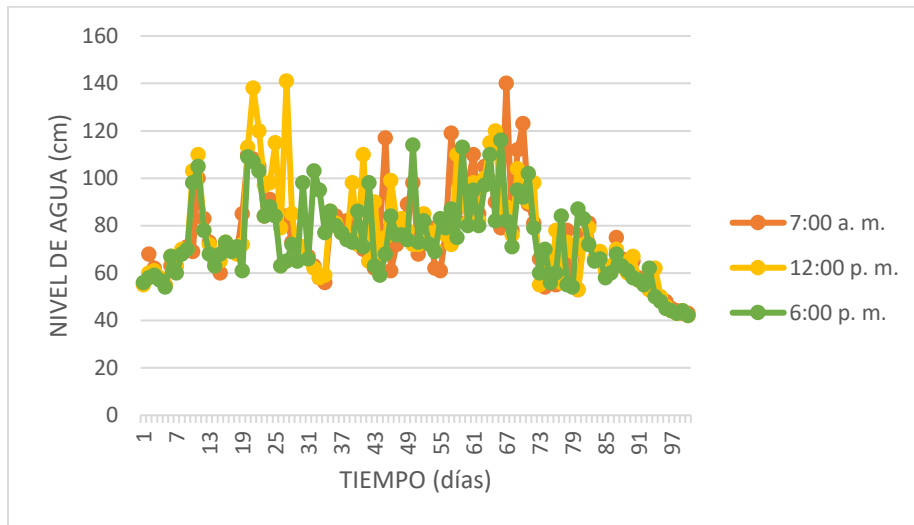


Gráfico 1. Altura de la lámina de agua en la zona de estudio de la microcuenca Caney.

Fuente: Pinzón, (2018).

Del grafico 1 se observa que los niveles más altos del nivel de agua se presentaron a las 12:00 p.m y los niveles más bajos se presentaron a las 6:00 p.m lo que indica una evacuación ligera de caudales de escorrentía.

Por otra parte, el aforo de caudal se realizó empleando el método de flotadores (ver fotografía 17). En épocas de lluvia el caudal puede ser aproximadamente de 3900 L/s, mientras que, en épocas de estiaje, el caudal es aproximadamente 1900 L/s, los caudales aproximados medidos durante el monitoreo realizado se relacionan en la tabla 8.



Fotografía 17. Aforo de caudal con el método de flotadores

Fuente: Pinzón, 2018.

El cálculo de caudal, para la medición 1 en el punto 1, se llevó a cabo de la siguiente manera, según lo muestra la ecuación 32, utilizando los valores de la tabla 7 los cuales fueron obtenidos en campo. El resultado del cálculo se puede observar en la ecuación 33. Se siguió el mismo procedimiento para todas las mediciones.

Ecuación 32. Calculo de caudal

$$Q = FC * A *(L/T)$$

Donde: Q –caudal (m/s³), L -longitud entre el A y B (m), A- - área, en m², T -tiempo promedio (s), FC – factor de corrección

Tabla 7. Datos para calculo de caudal

FC	A	L	T promedio
0.5	6.76	5	4.959

Fuente: Pinzón, 2018.

Ecuación 33. Resultado calculo de caudal

$$Q = (0.5) * (6.76) * ((5)/(4.959)) = 3.407 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 8. Caudales aproximados medidos en campo

Medición	monitoreo 1		monitoreo 2	
	caudal aproximado (L/s)		caudal aproximado (L/s)	
	punto 1	punto 2	punto 1	punto 2
1	3407	2491	2734	2365
2	2764	2637	3038	2691
3	2338	2948	2867	2318
4	3019	2594	3952	2037
5	3187	2269	3394	2012
6	2914	2123	3165	1967

Fuente: Pinzón, 2018.

7.3 LEVANTAMIENTO DE SECCIONES TRANSVERSALES

En total se levantaron aproximadamente 132 secciones transversales (ver imagen 10). A lo largo del tramo de estudio se observan pendientes que oscilan de 1.4% a 0.5% como lo muestra la imagen 11.

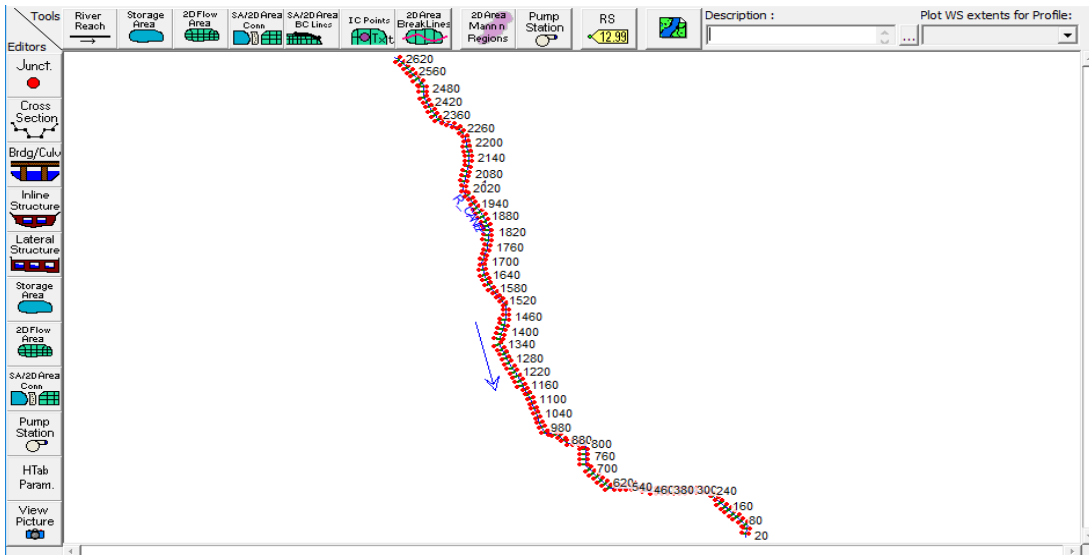


Imagen 10. Tramo de estudio con las secciones transversales

Fuente: Pinzón, (2018).



Imagen 11. Perfil transversal de la zona de estudio.

Fuente: Google Earth, editado por Pinzón, (2018).

En los gráficos del 2 al 4, se representa la variación dada por los caudales y las velocidades en una sección transversal en la parte alta, media y baja de la zona de estudio. La línea verde punteada representa el grado energético en la sección, la línea roja punteada muestra la profundidad crítica y la línea azul continua es la superficie del agua. Se observa que a medida que aumenta los caudales aumenta la velocidad en cada sección.

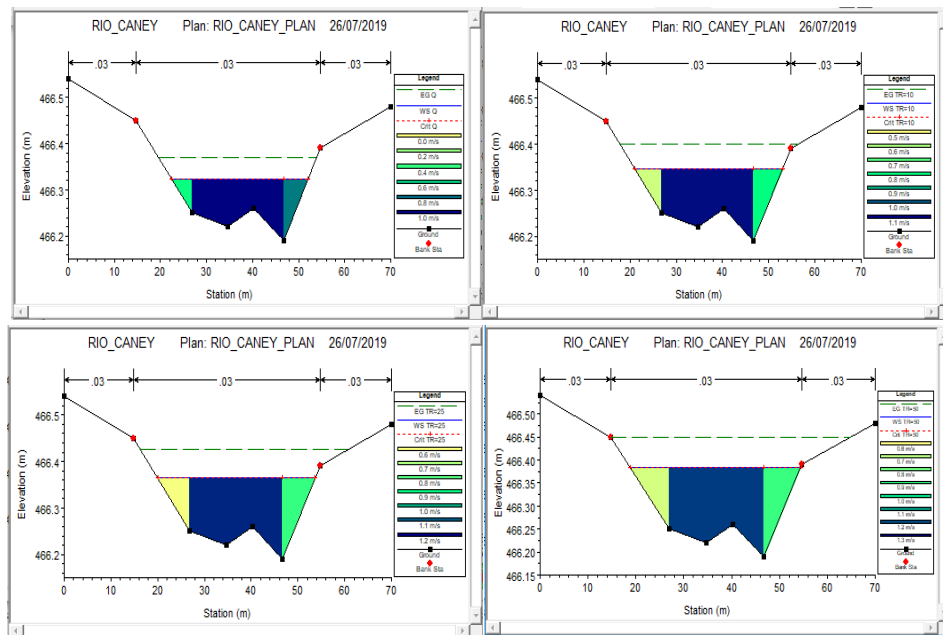


Gráfico 2. Variación de una sección transversal según periodos de retorno, parte alta

Fuente: Pinzón, (2019).

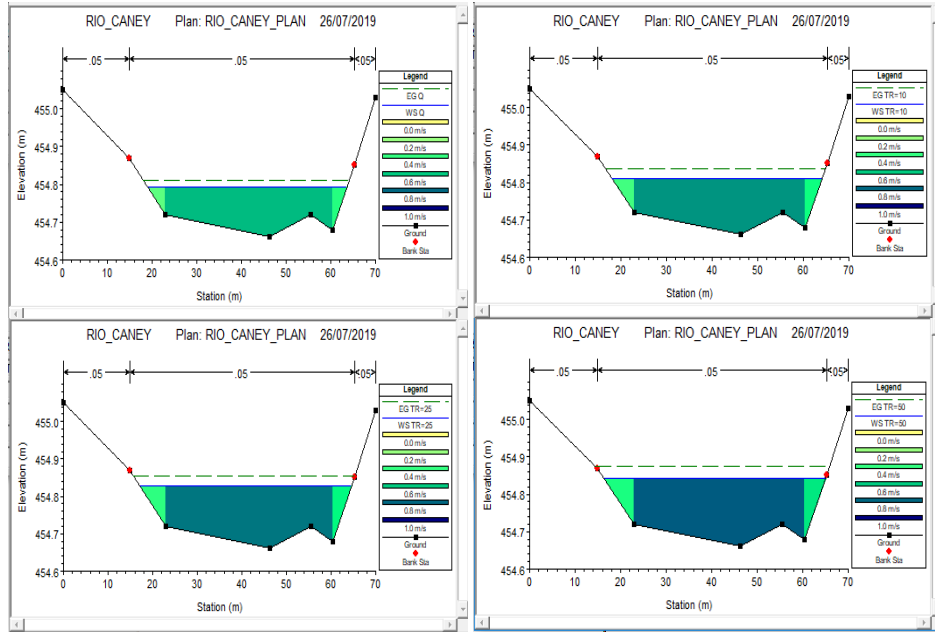


Gráfico 3. Variación de una sección transversal según periodos de retorno, parte media

Fuente: Pinzón, (2019).

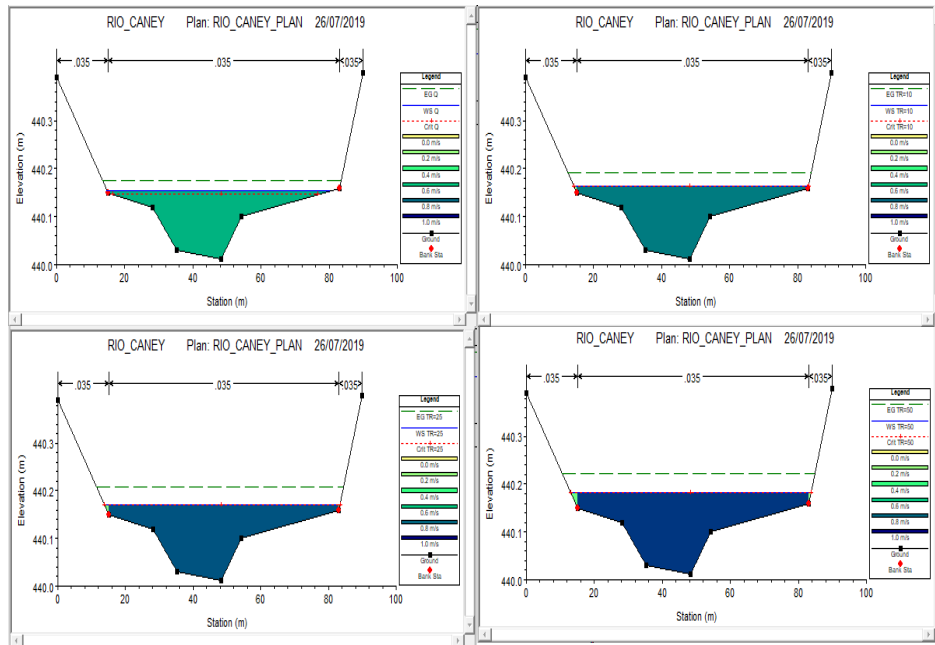


Gráfico 4. Variación de una sección transversal de periodo de retorno, parte baja

Fuente: Pinzón, (2019).

7.4 GEOMORFOMETRÍA LA ZONA DE ESTUDIO.

Las características generales de una cuenca dependen de su morfología, de los tipos de suelos, de las prácticas antrópicas, entre otras (Monsalve, 1995). Dichos elementos permiten tener una noción del comportamiento, variación y la correcta interpretación de la funcionalidad hidrológica de una cuenca ante un evento (Cahuana y Yugar, 2009). En la tabla 5 se relacionan los principales parámetros morfológicos de la microcuenca Caney.

Tabla 9. Parámetros morfológicos de la microcuenca Caney.

	Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Parámetros básicos	Área	Km ²	A	38.45
	Perímetro	Km	P	61.43
	Longitud de la cuenca	Km	L	20.79
	Ancho de la cuenca	Km	B	1.85
Forma de la cuenca	Factor de Forma	Adimensional	Ff	0.09
	Coefficiente de compacidad	Adimensional	Kc	2.77
	Razón de Elongación	Adimensional	Re	0.34
	Índice de Alargamiento	Adimensional	Ia	11.24
Relieve de la cuenca	Pendiente media de la cuenca	%	S	21.33
	Pendiente media del cauce principal	%	Sc	1.34
	Altitud media de la cuenca	m.s.n.m	Am	1067.83
	Altitud de frecuencia media	m.s.n.m	AFm	924.01
	Coefficiente de masividad	Adimensional	Cm	35.78
Drenaje de la red hidrográfica	Orden de los cauces	Adimensional	orden	4
	Densidad de la corriente	Adimensional	Dc	1.50
	Densidad de drenaje	Adimensional	Dd	2.17

Fuente: Pinzón, (2018).

De acuerdo con Aparicio (1992) y Monsalve (1995), el río Caney se clasifica como una corriente perenne, y exorreica, recorriendo 20.79 Km desde su nacimiento hasta su desembocadura, siendo un afluente significativo del río Guatiquía. Además, de acuerdo con Aguirre (2007) se clasifica como una microcuenca teniendo en cuenta que su superficie de 38.45 Km² y un perímetro de 61.43 Km, mientras que para Villon (2002) & Chauana y Yugar (2009), por su elevación y su área se clasifica como una cuenca pequeña de baja elevación. Por otra parte, con el factor forma (0.09) se clasifica en una cuenca muy poco achatada y según Monsalve (1995) está menos sujeta a crecientes; respecto al coeficiente de compacidad y el índice de alargamiento determina que su forma es de oval oblonga a rectangular oblonga e igualmente es muy alargada, lo que indica que es una cuenca irregular poco susceptible a crecientes e inundaciones, incidiendo directamente en el tipo de respuesta del río ante eventos de tal extensión.

La microcuenca Caney presenta una altitud de frecuencia media de 924 msnm indicando una elevación baja, una pendiente de la cuenca de 21.33%, mientras que el cauce principal tiene una pendiente con un valor de 1.34% denotando un cauce plano. En el gráfico 2 se muestra la curva hipsométrica y frecuencia de altitudes correspondientes al río Caney. A partir de estas, se deduce que es una microcuenca sedimentaria, con potencial erosivo, lo que se constata con el alto nivel de sedimentos presentes en el cauce. Asimismo, indica un avanzado grado de desarrollo (cuenca geológicamente vieja) de acuerdo con lo mencionado por Chauana y Yugar, (2009). También es conveniente mencionar que la mayor parte de su área es de pendientes consideradas como llanas o suaves (Cardona, 2012), representando aproximadamente el 53% de la superficie de la cuenca.

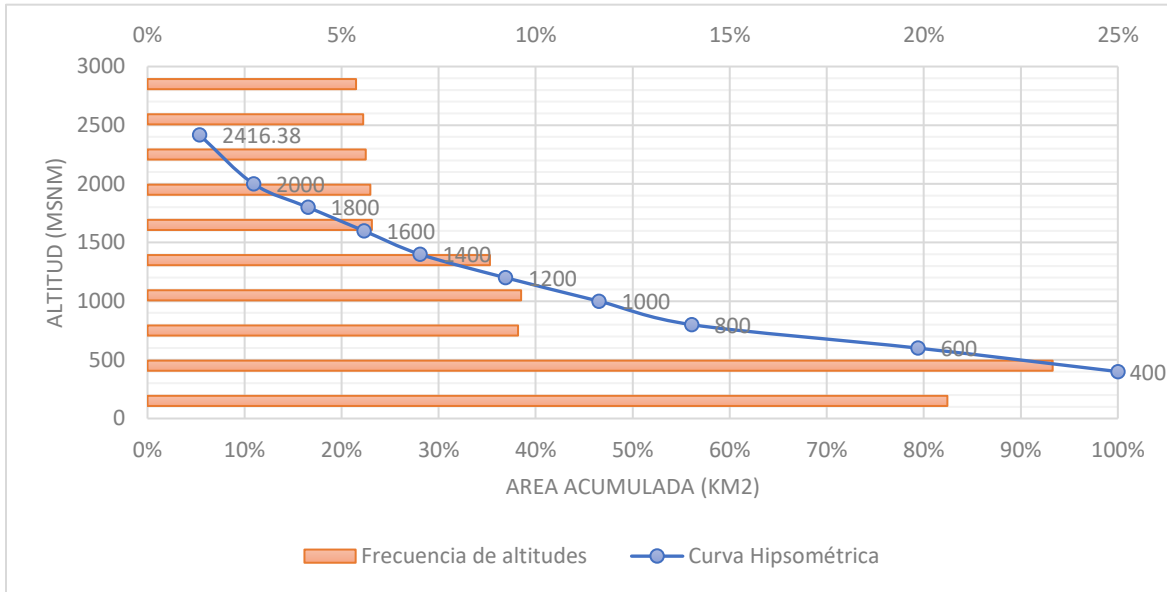


Gráfico 1. Curva hipsométrica y frecuencia de altitudes.

Fuente: Pinzón, (2018).

En la imagen 12 se observa el orden de drenaje o el grado de ramificación en el cauce principal la microcuenca Caney donde se identifica que el cauce principal presenta un orden 4, según los criterios de Horton (1945) modificados por Strahler (1964). A su vez, Henao (1998) explica que a mayor orden mayor energía y mayor control estructural y por lo tanto mayor erosión. Lo que indica un drenaje eficiente y por lo tanto, un rápido desalojo del agua de escorrentía según Cabanillas et al (2016), a su vez, se clasifica en una categoría alta de acuerdo a su densidad de drenaje, lo que representa una zona con poca cobertura vegetal, suelo fácilmente erosionable y presencia de suelos impermeables, por consiguiente, con mayor capacidad de producción de caudal superficial.

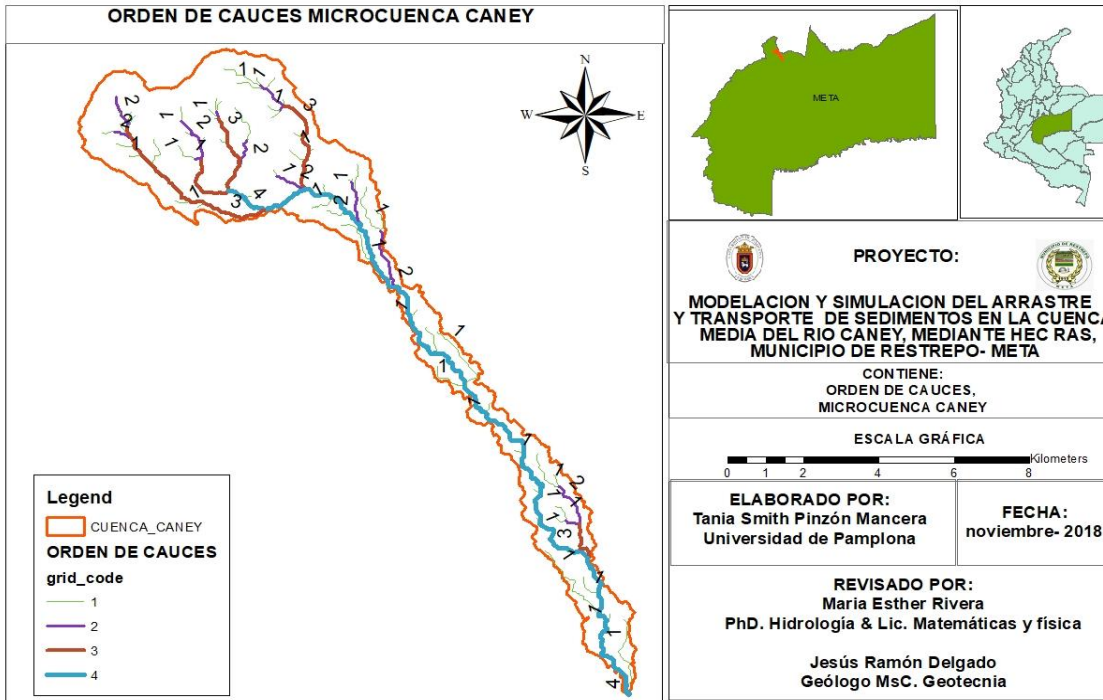


Imagen 12. Orden de cauces de la microcuenca del Río Caney, Restrepo -Meta.

Fuente: Pinzón, (2018).

El perfil del cauce inicia con la cota 1463 msnm y finaliza en el río Guatiquia en la cota 350 msnm, en la imagen 13 se observa la variación que presenta el mismo, cuya pendiente media se encuentra entre el rango del 15 al 1.6%.

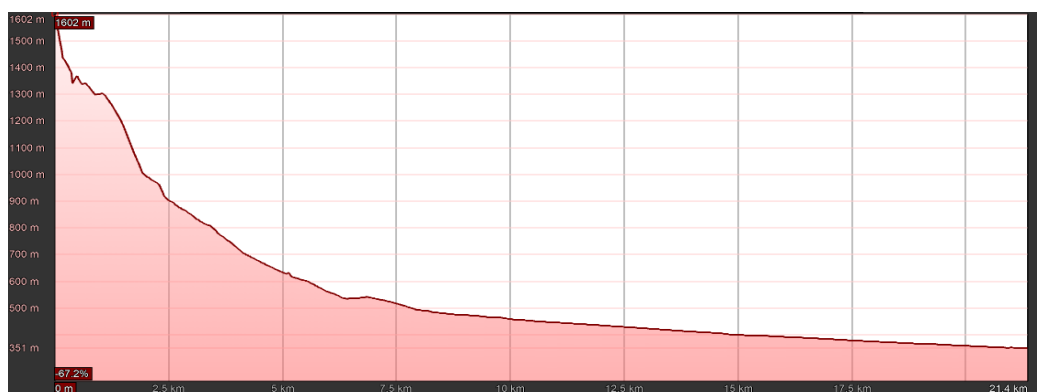


Imagen 13. Perfil transversal de microcuenca del río Caney

Fuente: Pinzón, (2018).

7.5 USO DEL SUELO Y COBERTURA VEGETAL

En cuanto al uso del suelo de Restrepo (imagen 14), se encontró que, en la zona de estudio, el suelo se clasifica como suelo suburbano tipo 3, mezclando las formas de vida del campo y la ciudad, donde se encuentran viviendas campestres con densidad no mayor a 4 viviendas por hectárea según lo dicta la resolución 580 de CORMACARENA (2010); donde prevalecen usos como Forestal, turismo, mejoramiento paisajista, agropecuario de bajo impacto (Plan de desarrollo 2012). Por otra parte, la parte alta y baja de la cuenca está catalogada como zona rural, cuyo uso predominante es pecuario con extensiones ganaderas, avícolas y cultivos diseminados de economía campesina, estos son suelos planos a moderadamente inclinados u ondulados de la planicie aluvial y de los valles del río Caney, Upín, Guatiquía, quebrada Salinas y otros cuerpos de agua de menor cauce. La información anteriormente relacionada fue verificada en campo haciendo recorridos por las diferentes zonas.

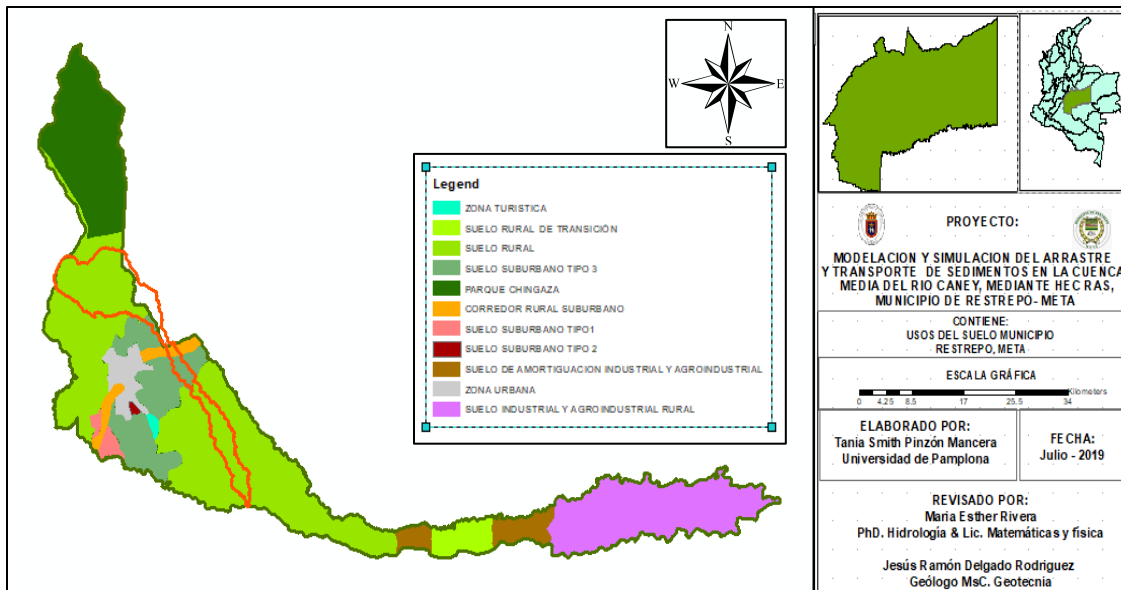


Imagen 14. Clasificación del uso del suelo del municipio de Restrepo, Meta

Fuente: PBOT (2018), elaborado por Pinzón, (2019).

En la imagen 15 se muestra como la en general la microcuenca cuenta con una abundante vegetación, aunque en la parte alta se observa un déficit ligero de vegetación en algunos puntos, esto se debe a deslizamientos presentes en la zona.

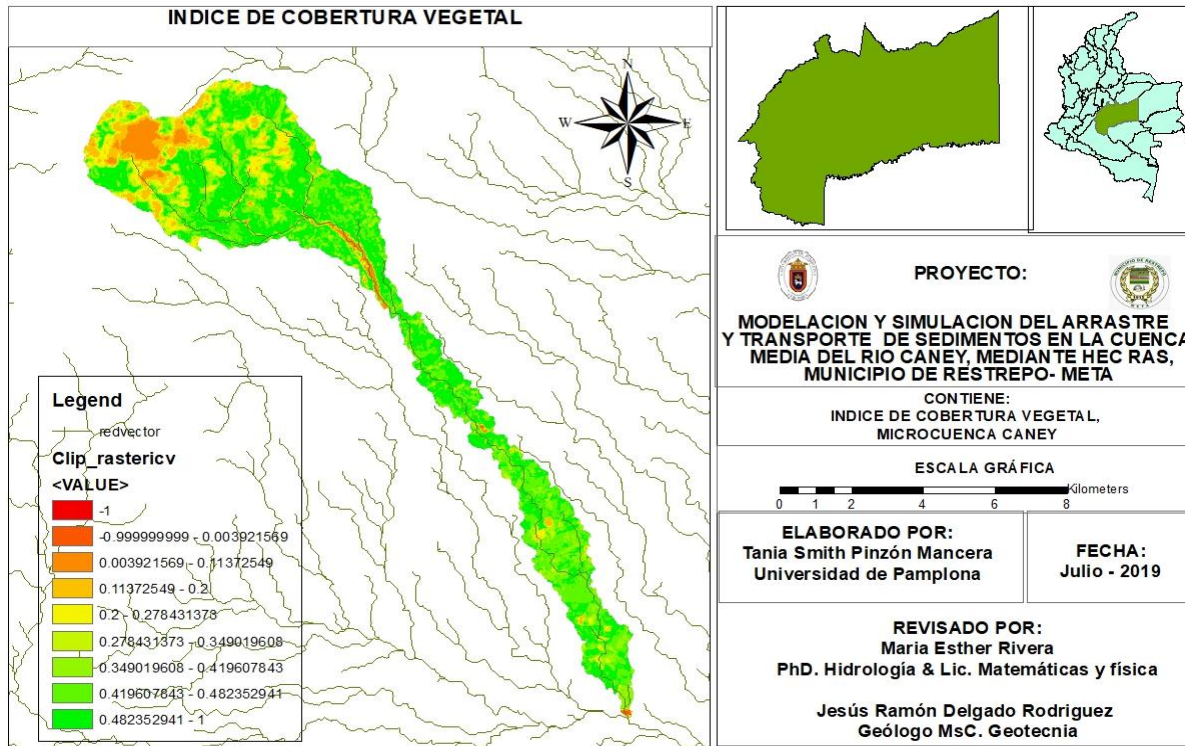


Imagen 15. Índice de cobertura vegetal de la microcuenca Caney

Fuente: Pinzón, (2019).

7.6 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

Teniendo en cuenta que el IDEAM en su base de datos no cuenta con las curvas de intensidad, duración y frecuencia (IDF) para ninguna de las estaciones que se solicitó información. Por lo tanto, se elaboraron las curvas de intensidad, duración y frecuencia para diferentes tiempos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 200 años, con la metodología de Precipitación máxima Probable (PMP) y distribución de Gumbel obteniendo como resultado el grafico 3.

Del gráfico 3 se infiere que a mayor tiempo de duración de la precipitación menor será su intensidad, por ejemplo: para un periodo de retorno de 2 años, las intensidades varían desde 236.11 mm/h en 5 minutos, 51.04 mm/h para 60 minutos (1 hora hasta 21.71 mm/h en 4 horas (240 minutos).

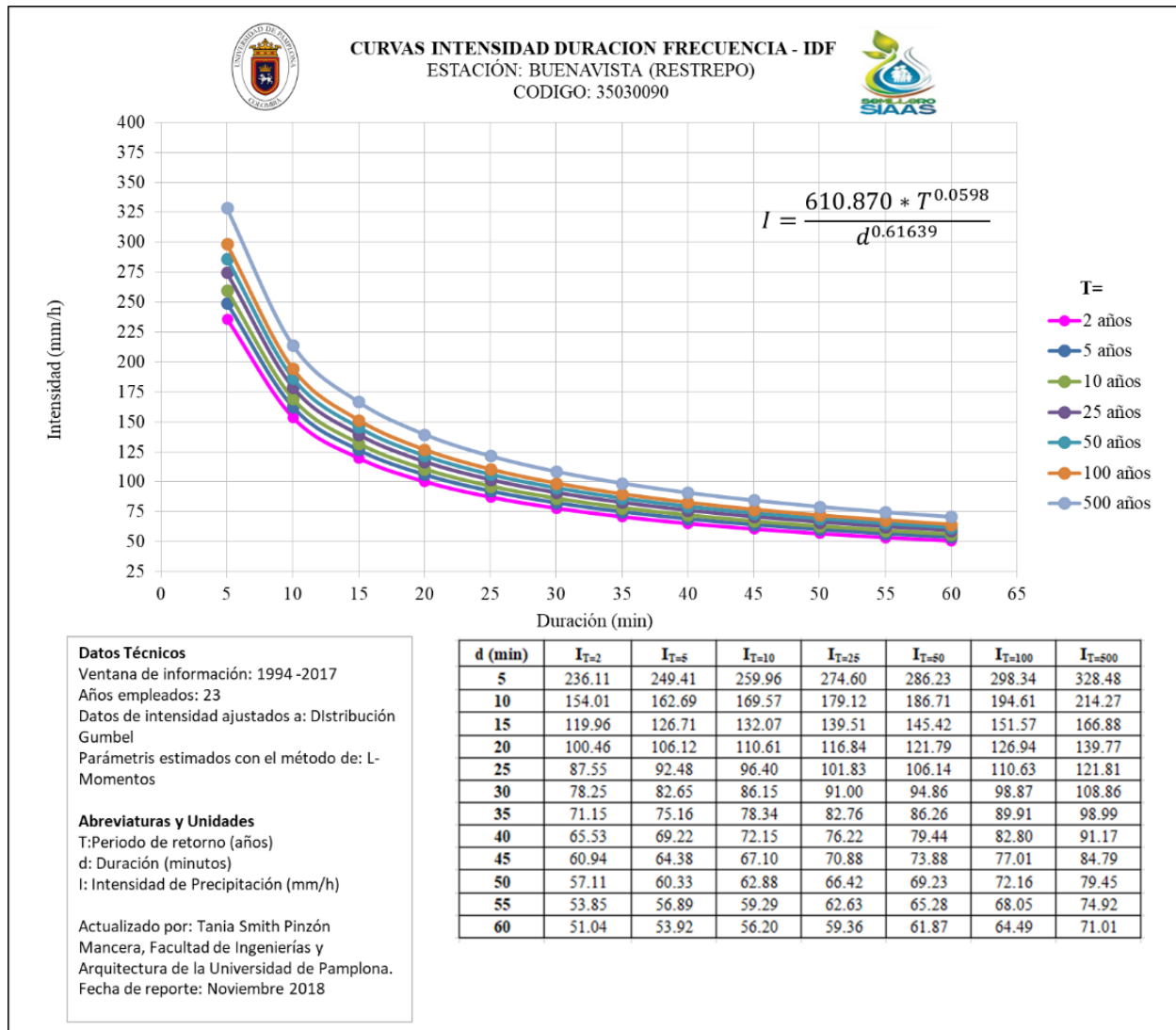


Gráfico 2. Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia para la estación Buena Vista.

Fuente: Pinzón, (2018).

Por otra parte, se obtuvo el coeficiente pluviométrico para el municipio de Restrepo, Meta (ver gráfico 4), en el cual se observa un régimen de lluvia bimodal, es decir que se presentan 2

épocas lluviosas en el año, la primera que abarca los meses desde abril a julio y una segunda que va desde el mes de septiembre hasta noviembre, siendo mayo el mes con mayor valor histórico registrado.

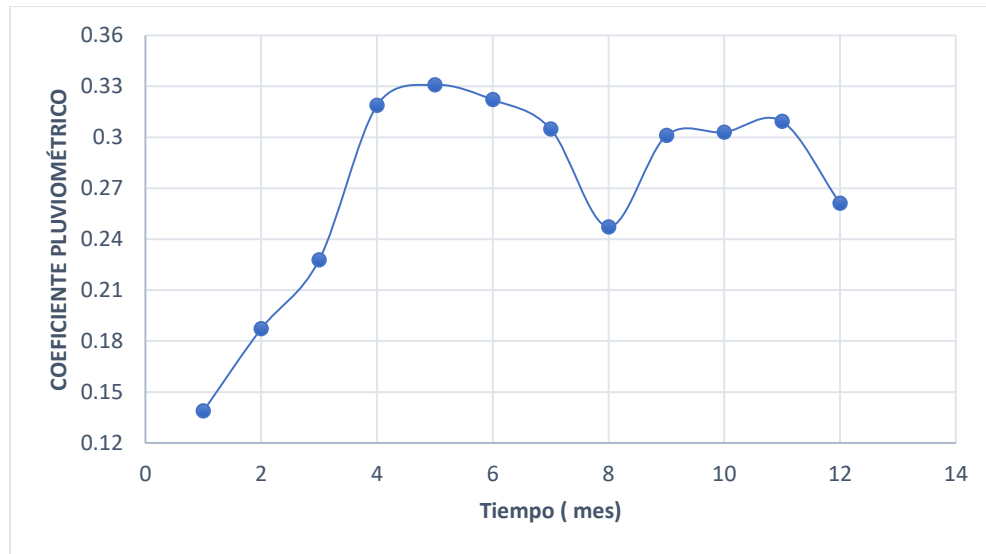


Gráfico 3. Coeficiente pluviométrico municipio de Restrepo, Meta.

Fuente: Pinzón, (2018).

Los hietogramas observados en el grafico 5 muestran el comportamiento de las precipitaciones para los distintos tiempos de retorno, en estos se determina que para todos los tiempos de retorno el pico o máxima descarga se obtiene el minuto noventa (90), observándose un aumento en dichos valores en el transcurso del tiempo. En el margen derecho se observa el segundo valor más significativo y el tercero al margen izquierdo, esto para todos los casos.

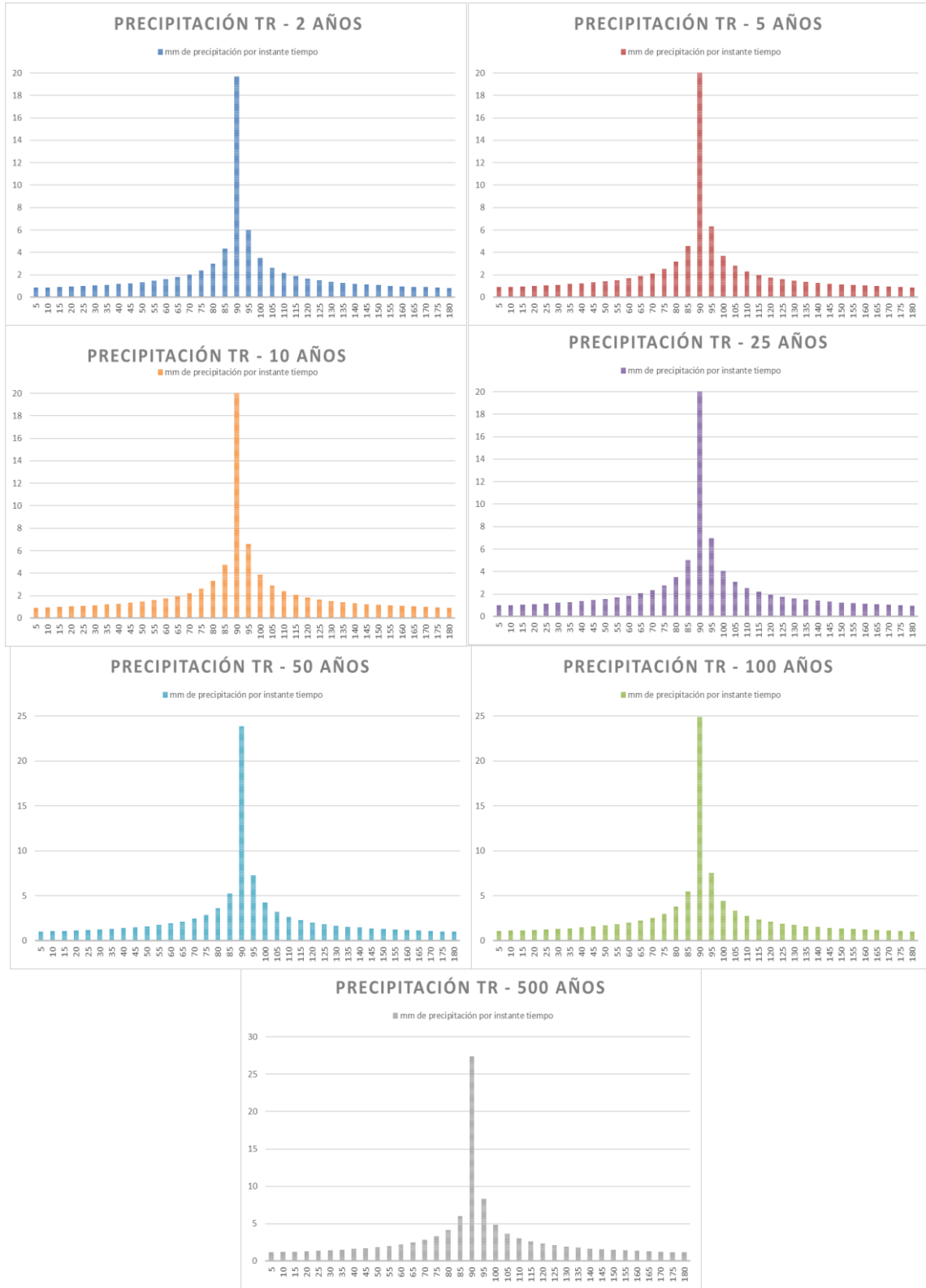


Gráfico 4. Hietogramas para diferentes periodos de retorno para el río Caney.

Fuente: Oliveras, elaborado por Pinzón, (2018).

7.7 GRANULOMETRÍA DE SEDIMENTOS

De las muestras de sedimentos analizadas se evidencio que la totalidad de muestras de cauce y ladera están clasificadas como SP, es decir, son arenas mal gradadas, con presencia de gravas con pocas partículas finas. Por otra parte, las muestras de deslizamientos en su mayoría son arenas con cantidades apreciables de finos. La clasificación de cada una de las muestras analizadas se relaciona en la tabla 9 a continuación.

Tabla 10. Clasificación de los sedimentos analizados en laboratorio.

Muestras de Cauce			Muestras de Ladera			Muestras de Deslizamientos		
N°.de muestra	Símbolo	Nombres típicos	N°.de muestra	Símbolo	Nombres típicos	N°.de muestra	Símbolo	Nombres típicos
1	SP	Arenas mal gradadas, con gravas con pocos finos	1	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	1	SC	Arenas arcillosas
2	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	2	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	2	SC	Arenas arcillosas
3	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	3	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	3	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos
4	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	4	SP	Arenas mal gradadas, gravas con pocos finos	4	SM	Arenas limosas
5	SP	Arenas mal gradadas, con gravas con pocos finos	5	SP	Arenas mal gradadas, con gravas con pocos finos	5	SC – SM	Arenas arcillosas y limosas
6	SP	Arenas mal gradadas, con gravas con pocos finos	6	SP	Arenas mal gradadas, con gravas con pocos finos	-		

Fuente: Pinzón, (2018).

En los gráficos 6 al 22 se muestran las curvas granulométricas obtenidas para cada una de las muestras analizadas, además se relacionan con fotografías de los lugares de donde fueron tomadas las muestras (ver fotografías 18 a 33).

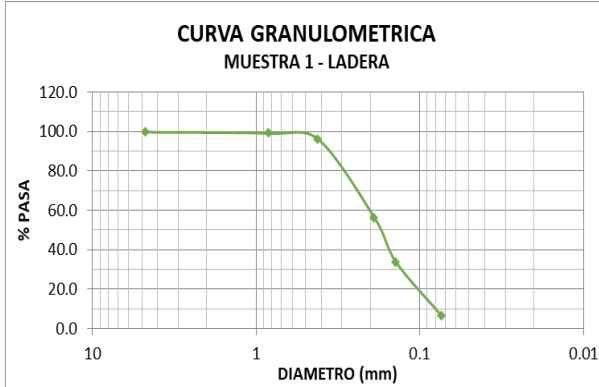


Gráfico 5. granulometría muestra 1 – ladera



Fotografía 18. Sitio de toma de muestra 1 L

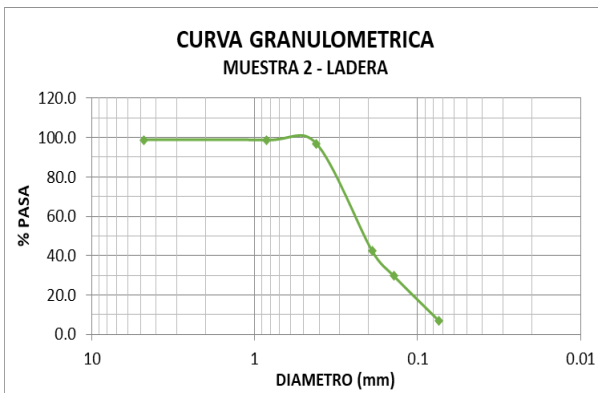


Gráfico 6. granulometría muestra 2 – ladera



Fotografía 19. Sitio de toma de muestra 2 L

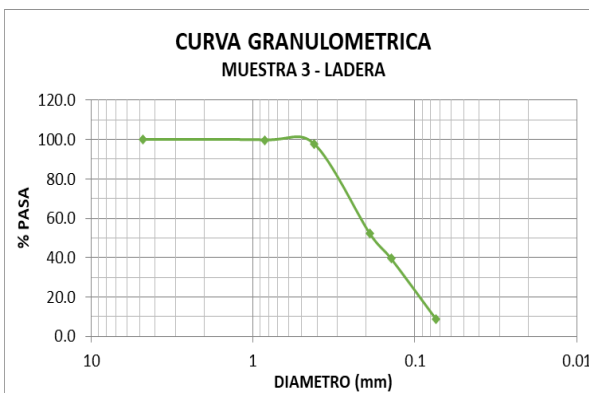


Gráfico 7. granulometría muestra 3 – ladera



Fotografía 20. Sitio de toma de muestra 3 L

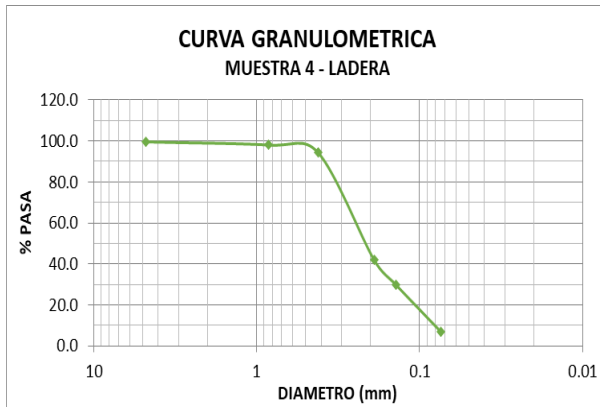


Gráfico 8. granulometría muestra 4 – ladera



Fotografía 21. Sitio de toma de muestra 4 L

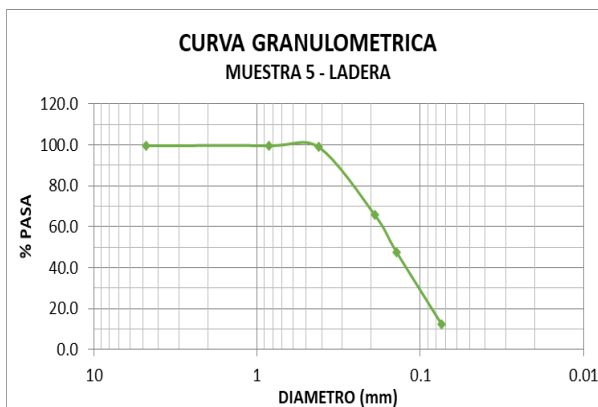


Gráfico 9. granulometría muestra 5 – ladera



Fotografía 22. Sitio de toma de muestra 5 L

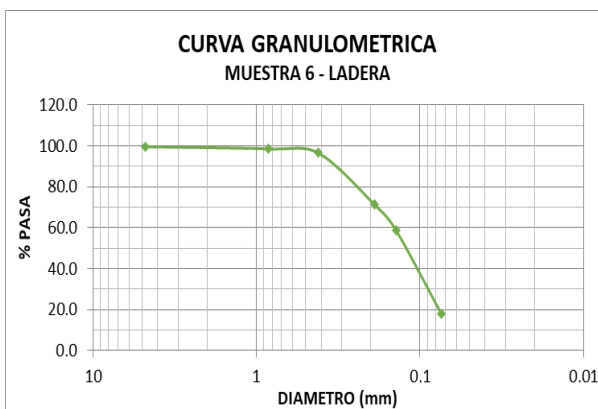


Gráfico 10. granulometría muestra 6 – ladera



Fotografía 23. Sitio de toma de muestra 6 L

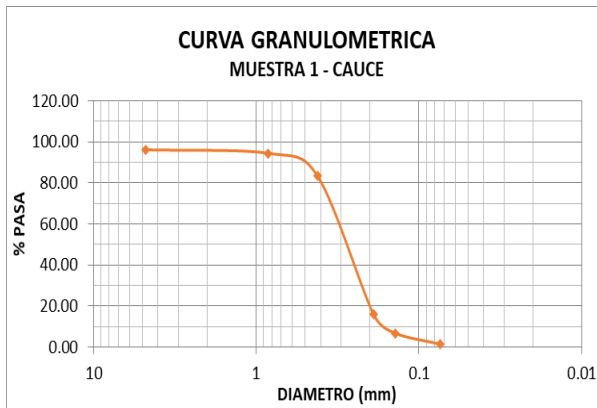


Gráfico 11. granulometría muestra 1 – cauce

Fotografía 24. Sitio de toma de muestra 1 C

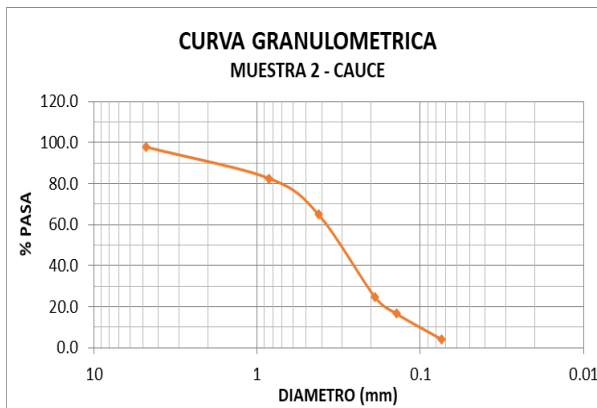


Gráfico 12. granulometría muestra 2 – cauce

Fotografía 25. Sitio de toma de muestra 2 C

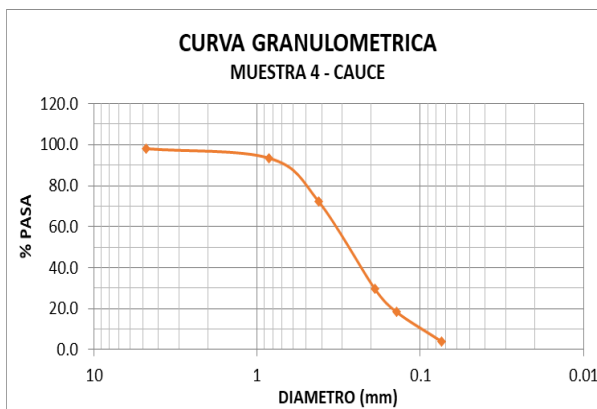


Gráfico 13. granulometría muestra 3 – cauce

Fotografía 26. Sitio de toma de muestra 3 C

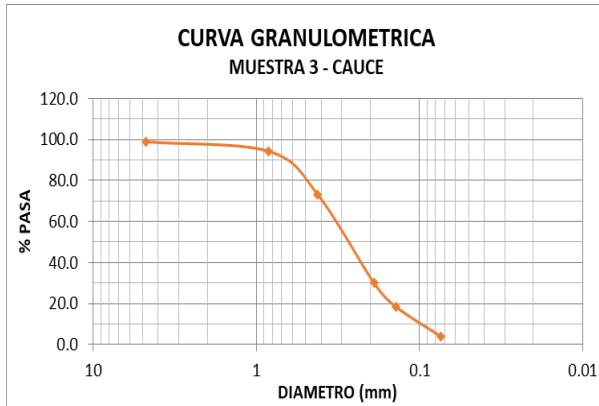


Gráfico 14. granulometría muestra 4 – cauce



Fotografía 27. Sitio de toma de muestra 4 C

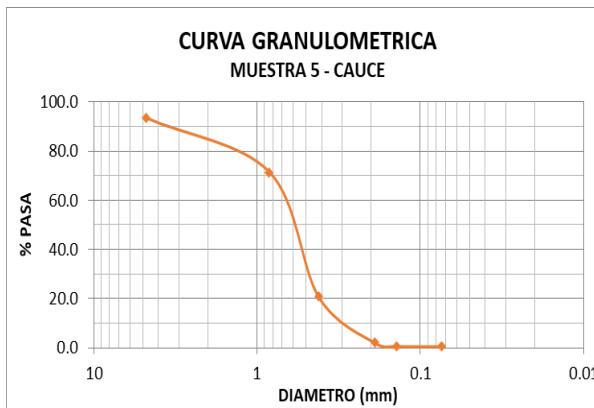


Gráfico 15. granulometría muestra 5 – cauce



Fotografía 28. Sitio de toma de muestra 5 C

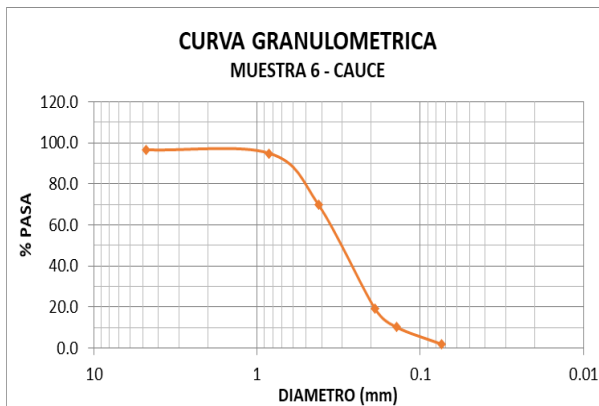


Gráfico 16. granulometría muestra 6 – cauce



Fotografía 29. Sitio de toma de muestra 6 C

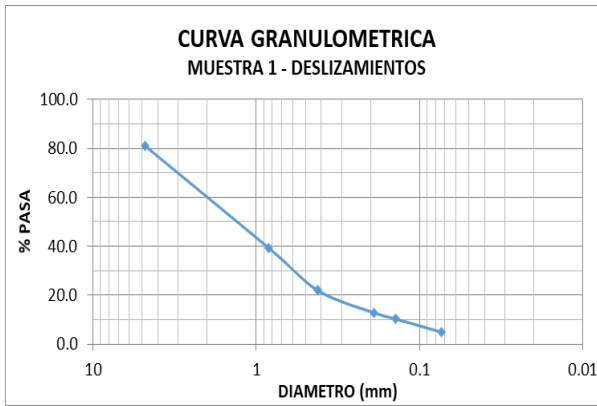


Gráfico 17. granulometría muestra 1 – deslizamientos

Fotografía 30. Sitio de toma de muestra 1 D

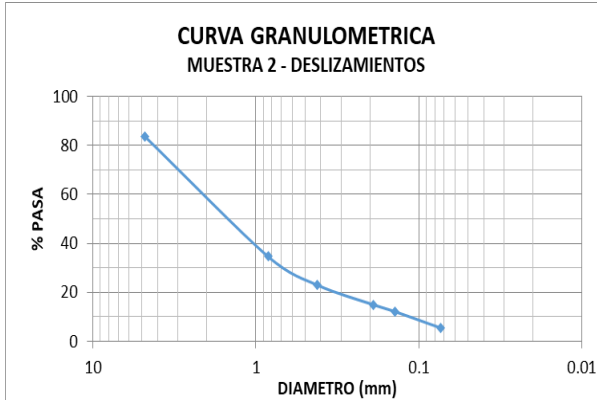


Gráfico 18. granulometría muestra 2 – deslizamientos

Fotografía 31. Sitio de toma de muestra 2 D

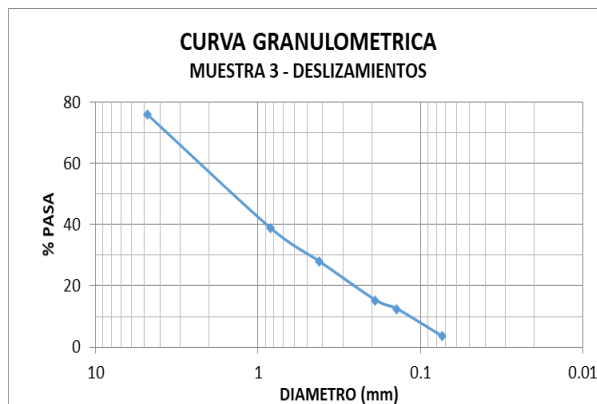


Gráfico 19. granulometría muestra 3 – deslizamientos

Fotografía 32. Sitio de toma de muestra 3 D

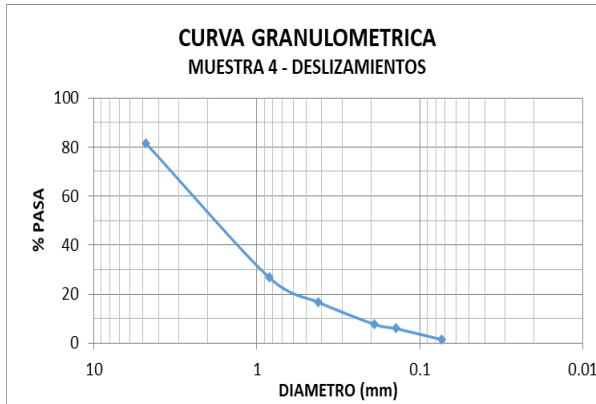


Gráfico 20. granulometría muestra 4 – deslizamientos

Fotografía 33. Sitio de toma de muestra 4 D

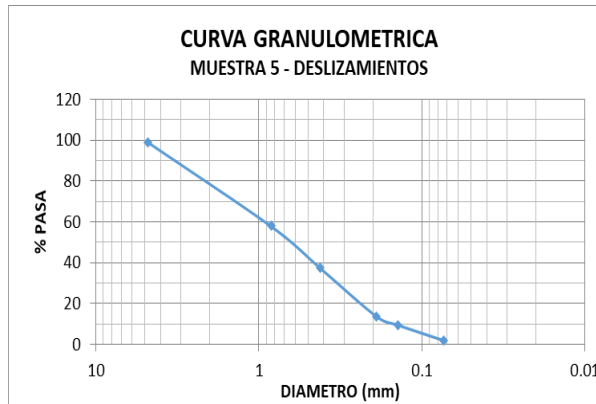


Gráfico 21. granulometría muestra 5 – deslizamientos

Fotografía 34. Sitio de toma de muestra 5 D

7.8 GEOLOGIA DE LA ZONA DE ESTUDIO

En la geología de la plancha 247 - Departamentos de Cundinamarca y Meta (imagen 10), suministrada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS), se observa la presencia de la falla Servitá la cual tiene una edad devónica (280 millones de años) y de la falla de Upín de edad cretácica (60 -106 millones de años). Asimismo, en la parte alta se evidencia presencia de rocas sedimentarias del grupo Farallones como DCcg que refiere a formación capas

rojas del Guatiquía con capas de areniscas de grano fino a medio grises, y verdes, intercaladas con lodolitas rojizas y limolitas negras y verdes, ocasionalmente conglomerados oligomícticos, en la parte superior se intercalan arenitas calcáreas a fosilíferas, también hay presencia de rocas sedimentarias del grupo Cáqueza específicamente las K1m donde se encuentra la formación lutitas de Macanal, con secuencias espesas de lodolitas grises a shales negros con nódulos ferruginosos intercaladas con areniscas cuarzosas a liticas de grano fino a medio, especialmente en la parte media, los niveles lodolíticos y arcillolíticos presenta.

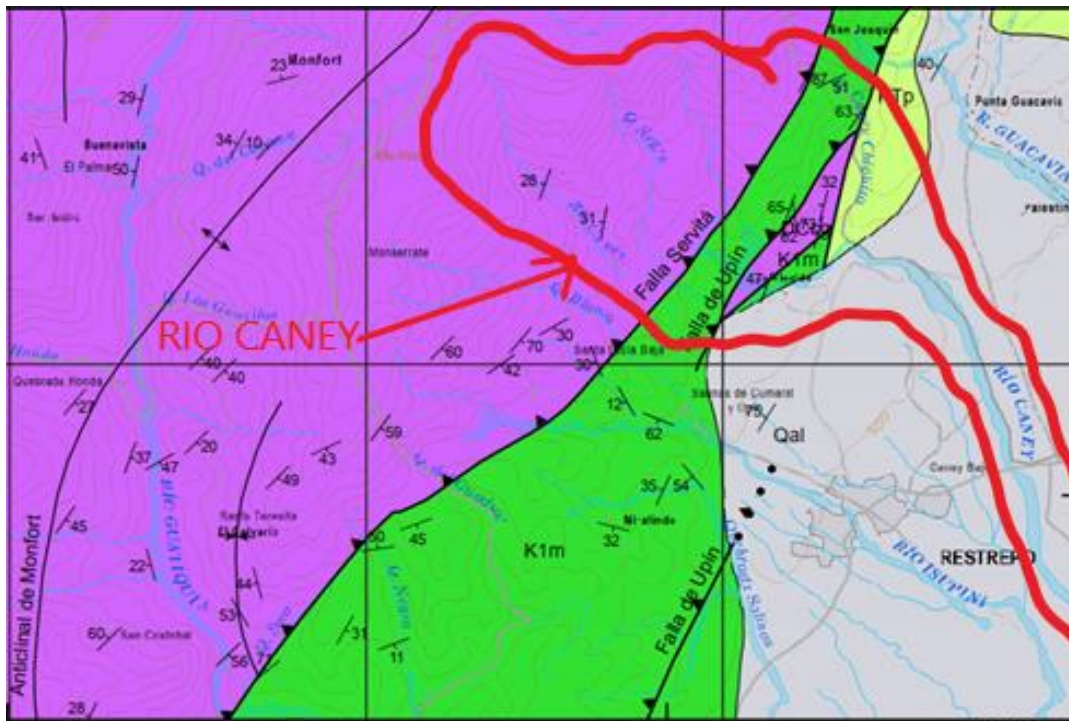


Imagen 15. Geología de la plancha 247 - Departamentos de Cundinamarca y Meta.

Fuente. INGEOMINAS (2011).

Del mismo modo, se encuentran las rocas sedimentarias de clase KTp que pertenecen al grupo Palmichal que tiene arenisca cuarzosa, blanca, de grano grueso a muy grueso, friable, con intercalaciones de arcillolitas grises, en las arenitas se encuentran impregnaciones de asfaltita. Por

otra parte, en la parte media y baja del río Caney se encuentran depósitos de tipo Qal, es decir, Depósitos Aluviales cuaternarios Recientes, depósitos aluviales de llanuras de inundación y cauces actuales conformados por cantos, guijos y gravas en una matriz areno-lodosa.

7.9 MODELACIÓN HIDRÁULICA EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0

La modelación del arrastre de sedimentos inicio con la exportación de la geometría del terreno desde la extensión HEC GeoRAS del software AcrGIS. Posteriormente, en la plataforma del software HEC - RAS se complementó el proceso con el ingreso de secciones transversales tomadas en campo, así como datos adicionales requeridos por el programas tales como caudales, rugosidades de Manning para cada tramo de la zona de estudio, granulometría de los sedimentos, entre otros (ver imagen 15).

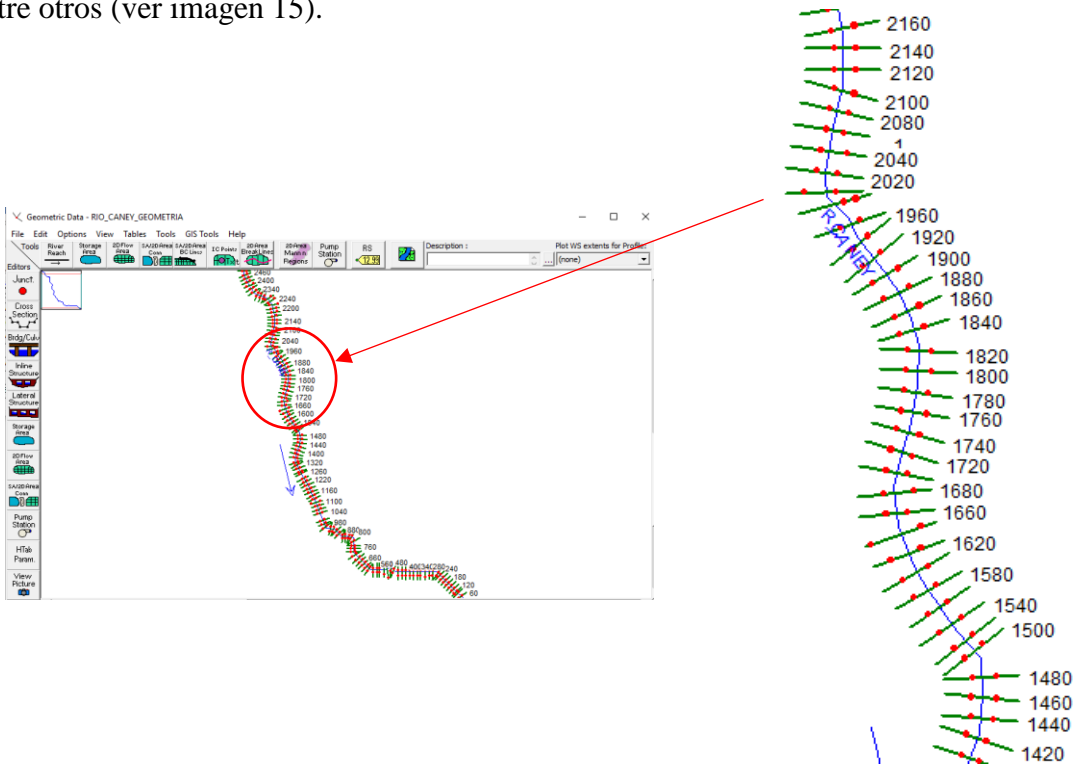


Imagen 15. Secciones transversales desde el HEC- RAS

Fuente: Pinzón, (2019).

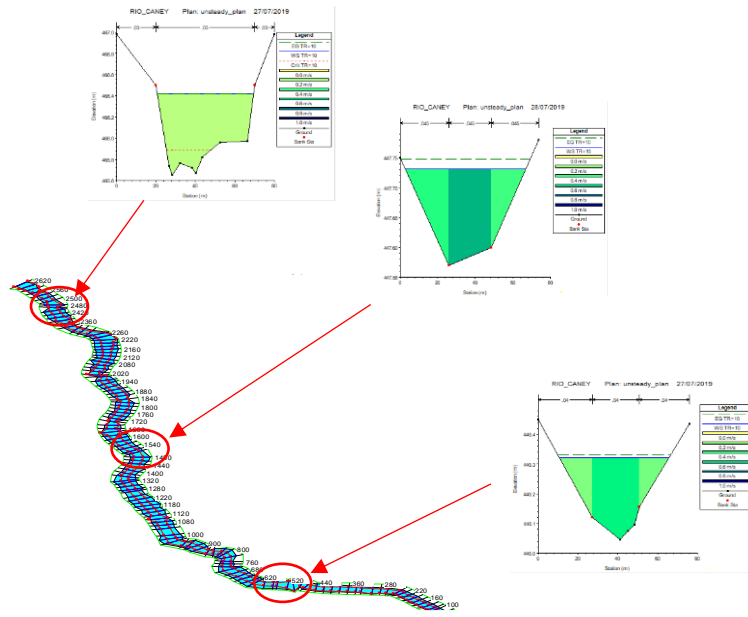


Imagen 16. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=10.

Fuente: Pinzón, (2019).

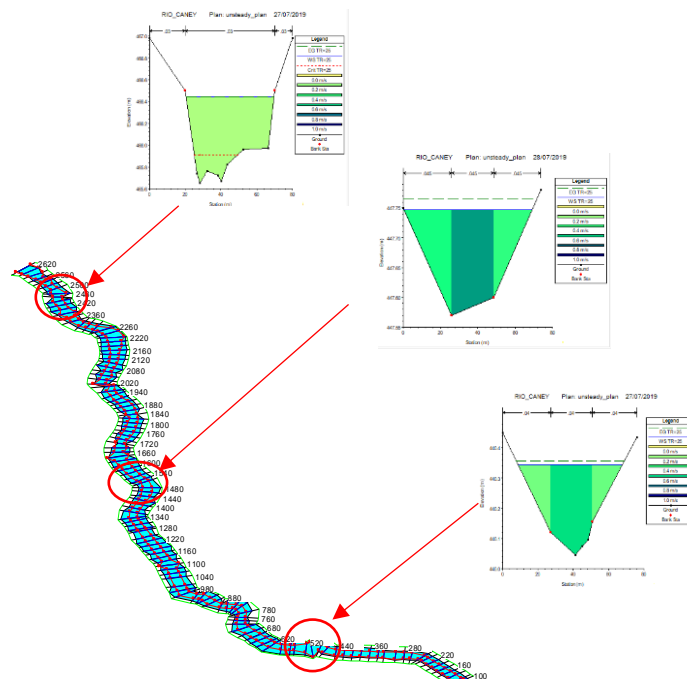


Imagen 17. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=25.

Fuente: Pinzón, (2019).

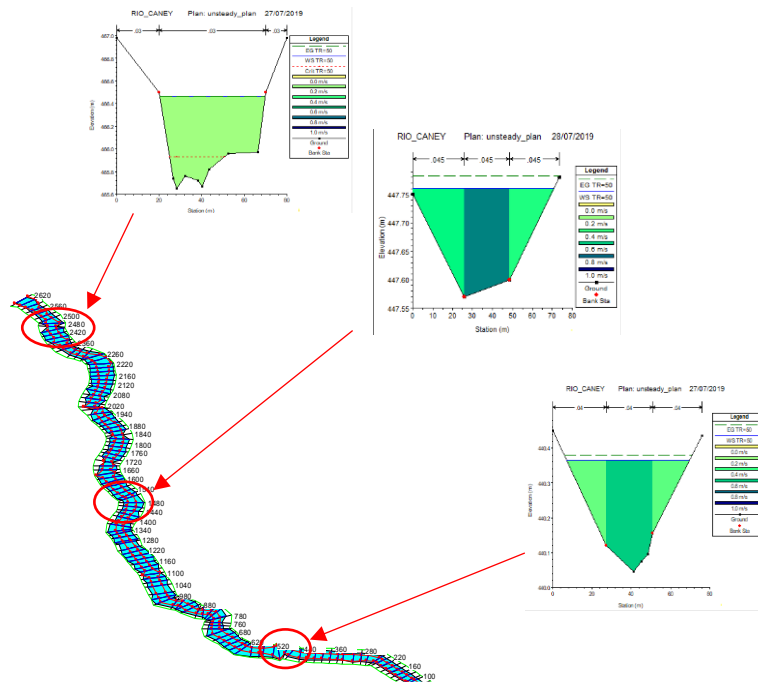


Imagen 18. Variación de caudal para diferentes secciones transversales con TR=50.

Fuente: Pinzón, (2019).

De las imágenes 17 al 19, se observa la variación en función de los caudales y velocidades para los periodos de retorno $Tr=10$, $Tr=25$, $Tr=50$ respectivamente, por ejemplo, la sección transversal 2600 en la parte alta, 1480 en la parte media y 580 en la parte baja. Se puede notar que la sección 1480 se desborda en el margen derecho aguas abajo para el $Tr=50$. También se observa a lo largo del cauce zonas de acumulación de sedimentos en ladera, comprobando lo visto en campo. Las velocidades del agua varían de 0.2 a 1.4 m/s, mientras que para el tiempo de retorno de 50 años estas velocidades varían de 0.2 a 1.6 m/s.

En la imagen 20 se presenta las secciones transversales con colmatación de sedimentos, la línea negra representa el perfil del cauce en condiciones normales, la línea azul representa la

variación con la modelación por el método de Yang, por ejemplo, la sección 2460 para la parte alta, 1640 en la parte media y 780 en la parte baja. Se observa, en la parte alta se presentó un espesor de colmatación de aproximadamente 0.5 m, en la parte media fue de 0.1 m, mientras que en la sección de la parte baja el valor fue aproximadamente 0.06 m. Esta simulación fue para 15 días con el modelo de Yang, correspondientes del 15 al 30 de septiembre del año 2018.

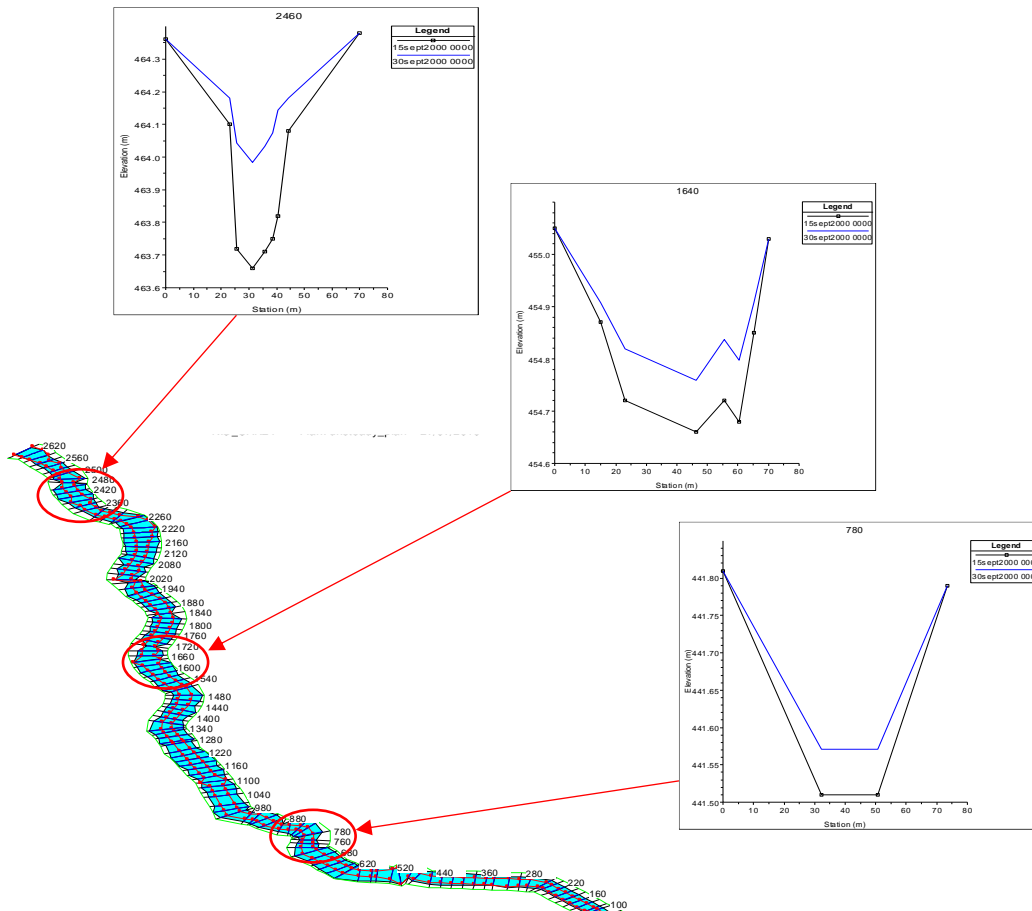


Imagen 19. Variación en la acumulación de sedimentos en diferentes secciones transversales.

Fuente: Pinzón, (2019)

Por otra parte, en la imagen 21 se muestran las secciones transversales 2000, 1260, 120 correspondientes a las partes alta, media y baja respectivamente, en ellas se observan la socavación en el lecho del cauce. La línea negra representa el perfil del cauce en condiciones normales, la

línea azul representa la variación con la modelación por el método de Yang En la sección 2000 se presentó una socavación de 0.5 m aproximadamente, en la sección 1260 el valor fue 0.4 m y en la sección 120 la socavación fue aproximadamente 0.7 m. Esta simulación fue para 15 días con el modelo de Yang, correspondientes del 15 al 30 de septiembre del año 2018.

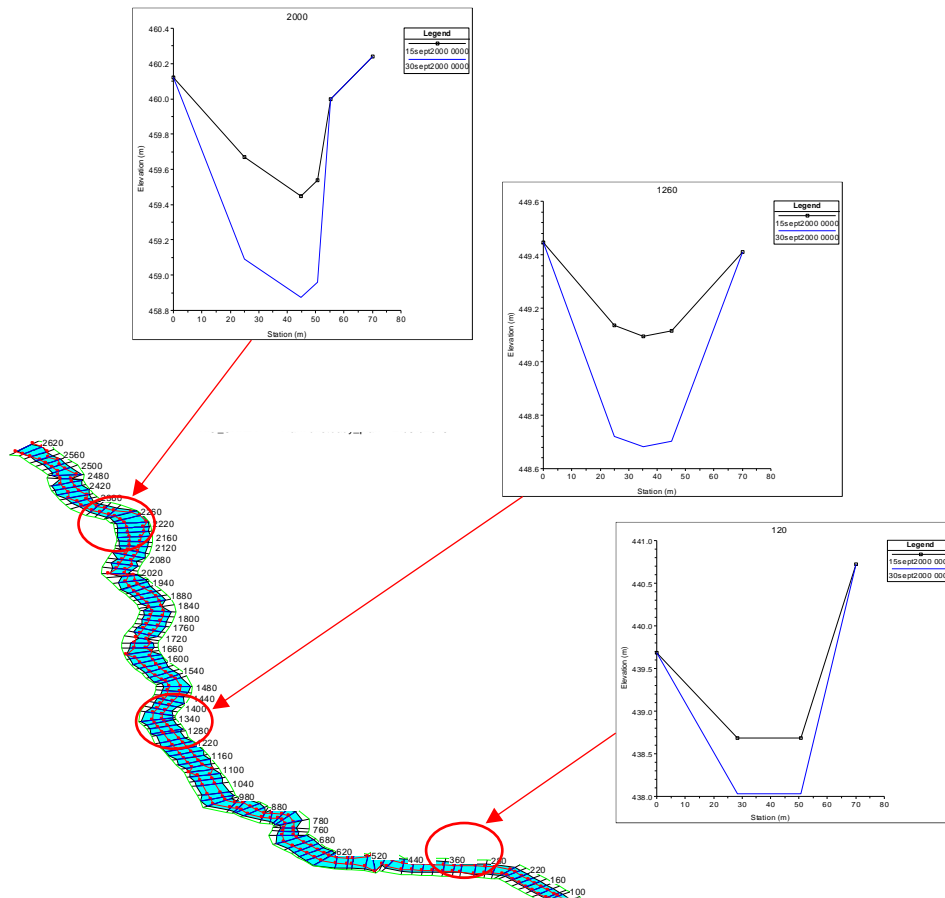


Imagen 21. Variación en la acumulación de sedimentos en diferentes secciones transversales.

Fuente: Pinzón, (2019)

En la tabla 11, se muestran las secciones transversales, donde se puede observar cueles de ellas fueron socavadas con color cafe, las secciones sedimentadas con color verde, mientras que las secciones en equilibrio permanecen de color blanco, para apreciar estos los resultados se tomaron los valores de la modelación arrojados para el 16 de septiembre a las 23:47 horas.

Tabla 11. Zonas de Socavación y Sedimentación

Sección	Elevación del lecho	Cambio en el lecho	Caudal de diseño	Velocidad	Esfuerzo Cortante
RS	Ch invert El (m)	Invert Change (m)	Flow (m3/s)	Velocity (m/s)	Shear Stress (pa)
2620	466.5799	0	2.799999	0.9520473	2.086155
2600	465.6695	1.95E-02	2.799999	0.1208464	1.90E-02
2580	466.1758	-1.42E-02	2.799999	0.9694183	2.039156
2560	466.1758	-1.42E-02	2.799999	0.9694183	2.039156
2540	465.3299	0	2.799999	0.9452934	2.374391
2520	464.9365	6.46E-03	2.799999	0.8624278	1.780174
2500	464.6133	-6.70E-03	2.799999	1.036838	2.666619
2480	463.9962	6.21E-03	2.799999	0.6272935	0.9981993
2460	463.6599	0	2.799999	0.645873	1.588544
2440	463.5301	0	2.799999	0.6313794	1.572484
2420	463.1736	-6.33E-03	2.799999	0.8490496	3.028976
2400	462.8102	0	2.799999	0.6476277	1.653807
2380	462.5135	-6.46E-03	2.799999	0.8777718	1.786388
2360	462.1399	0	2.799999	0.9798369	1.815475
2340	461.7601	0	2.799999	1.008915	1.917195
2320	461.0999	0	2.799999	0.6562712	3.494788
2300	460.8063	6.34E-03	2.799999	0.5442703	2.306259
2280	460.503	7.16E-03	2.799999	0.7138595	4.303129
2260	460.2967	6.60E-03	2.799999	0.2327463	0.3723274
2240	460.1581	0	2.799999	0.154038	0.1474587
2220	460.1941	0	2.799999	0.1828162	0.2429715
2200	460.1261	0	2.799999	0.1704358	0.176277
2180	460.1209	0	2.799999	0.2240417	0.3691859
2160	460.1319	0	2.799999	0.2395972	0.3707241
2140	460.2501	0	2.799999	0.4262512	0.6030642
2120	460.18	0	2.799999	0.3503751	0.379045
2100	460.2139	0	2.799999	0.6123024	1.352534
2080	459.9929	0	2.799999	0.2618226	0.1986928
2060	460.1629	-7.04E-03	2.799999	1.040855	4.417473
2040	459.81	0	2.799999	0.5811233	1.300112
2020	459.6	0	2.799999	0.5871613	1.254297
2000	459.45	0	2.799999	0.5782016	1.288621
1980	459.2614	-8.51E-03	2.799999	1.161341	5.089802
1960	458.9561	6.20E-03	2.799999	0.5584449	1.117473
1940	458.8033	-6.70E-03	2.799999	0.815457	2.69342
1920	458.4701	0	2.799999	0.6707255	1.738376
1900	458.0732	-6.74E-03	2.799999	0.9355859	3.88392

1880	457.5966	6.41E-03	2.799999	0.5997674	1.730462
1860	457.2837	6.25E-03	2.799999	0.7703233	3.004697
1840	456.6735	6.47E-03	2.799999	0.896309	4.17853
1820	456.4969	0.0068124	2.799999	0.5283553	1.222034
1800	456.3398	0	2.799999	0.6299497	1.833293
1780	456.0137	-6.40E-03	2.799999	0.7574953	2.847968
1760	455.7564	6.31E-03	2.799999	0.5155467	1.152365
1740	455.58	0	2.799999	0.2535171	0.2213593
1720	455.4501	0	2.799999	0.3423762	0.4932818
1700	455.5294	-4.05E-02	2.799999	1.320995	9.28705
1680	455.108	8.05E-03	2.799999	0.5501385	1.375374
1660	454.9701	0	2.799999	0.6667084	2.08742
1640	454.6601	0	2.799999	0.6377155	2.373349
1620	454.33	0	2.799999	0.4498979	1.669599
1600	454.12	0	2.799999	0.4630435	1.839822
1580	453.8499	0	2.799999	0.5767167	2.951946
1560	453.5399	0	2.799999	0.5171428	2.182657
1540	453.1938	-6.29E-03	2.799999	0.6892564	4.310688
1520	452.8467	6.53E-03	2.799999	0.4384099	1.496601
1500	452.6154	7.73E-03	2.799999	0.8095759	6.097399
1480	452.0099	0	2.799999	0.4586759	1.8636
1460	451.5999	0	2.799999	0.5789871	2.855165
1440	451.25	0	2.799999	0.6109366	3.049709
1420	450.9501	0	2.799999	0.4885302	1.877282
1400	450.6835	-6.58E-03	2.799999	0.6870033	3.962476
1380	450.3499	0	2.799999	0.4797854	1.670395
1360	450.2499	0	2.799999	0.4640817	1.622486
1340	450.15	0	2.799999	0.3626569	0.9427194
1320	450.1139	6.23E-03	2.799999	0.5968222	2.946751
1300	449.6438	6.26E-03	2.799999	0.7392449	4.799329
1280	449.2999	0	2.799999	0.451517	1.575317
1260	449.0817	-1.34E-02	2.799999	0.8110169	5.829036
1240	448.58	0	2.799999	0.6102425	3.124047
1220	448.2901	0	2.799999	0.6709294	1.830817
1200	447.9135	-6.59E-03	2.799999	0.7880788	2.638866
1180	447.5702	0	2.799999	0.620353	1.536395
1160	447.2234	-6.55E-03	2.799999	0.8541927	3.107116
1140	446.8801	0	2.799999	0.6073471	1.44299
1120	446.5325	7.44E-03	2.799999	0.9484699	3.897931
1100	445.7939	1.39E-02	2.799999	0.3902471	0.6828892
1080	445.8227	7.32E-03	2.799999	0.92145	3.761071
1060	445.4263	6.17E-03	2.799999	0.5787991	1.258547
1040	445.1433	6.77E-03	2.799999	0.7316392	4.857548

1020	444.78	0.00E+00	2.799999	0.6482478	3.47895
1000	444.42	0	2.799999	0.577549	2.896662
980	444.1299	0	2.799999	0.4875573	1.996133
960	443.83	0	2.799999	0.5908896	3.094252
940	443.1334	-6.47E-03	2.799999	0.7330511	4.812425
920	442.8964	6.48E-03	2.799999	0.2633826	0.4705265
900	442.9735	6.32E-03	2.799999	0.5554236	2.589538
880	442.58	0	2.799999	0.6611844	3.841193
860	441.914	-6.11E-03	2.799999	0.6994668	4.014672
840	441.6862	6.29E-03	2.799999	0.5223516	2.125292
820	441.5799	0	2.799999	0.3679752	0.2643478
800	441.6299	0	2.799999	0.5250139	0.6133903
780	441.504	-6.14E-03	2.799999	0.9951569	2.50886
760	440.8335	-6.37E-03	2.799999	1.050078	2.750221
740	440.6475	7.58E-03	2.799999	0.6702605	0.9886683
720	440.4427	7.29E-03	2.799999	0.9959649	2.56179
700	440.2361	6.20E-03	2.799999	0.2872103	0.1599321
680	440.18	0	2.799999	0.2939952	0.1670338
660	440.2501	0	2.799999	0.5073322	0.5813568
640	440.14	0	2.799999	0.3147731	0.1882802
620	440.1199	0	2.799999	0.3013083	0.2268145
600	440.1099	0	2.799999	0.3249834	0.2721959
580	440.0901	0	2.799999	0.3198921	0.2551281
560	440.0699	0	2.799999	0.3961855	0.4164374
540	440.045	0	2.799999	0.448058	0.5408135
520	439.9901	0	2.799999	0.3713733	0.3424212
500	440.0056	6.37E-03	2.799999	0.694956	2.747732
480	439.7538	0	2.799999	0.6727642	1.091814
460	439.6069	0	2.799999	0.3962272	0.3125043
440	439.6091	0	2.799999	0.4529636	0.4354092
420	439.4859	0	2.799999	0.2681659	0.1311089
400	439.4591	0	2.799999	0.2499017	0.1115198
380	439.5951	0	2.799999	0.5626459	0.7195256
360	439.4978	0	2.799999	0.6200023	0.8973827
340	439.3759	0	2.799999	0.5938974	0.8079908
320	439.2365	-6.52E-03	2.799999	0.8180066	1.674239
300	439.033	0	2.799999	0.6132367	0.9169006
280	438.8779	0	2.799999	0.3874225	0.2955403
260	438.8669	0	2.799999	0.4016681	0.3250185
240	438.7379	0	2.799999	0.2926476	0.1501764
220	438.7169	0	2.799999	0.3260815	0.1845078
200	438.6941	0	2.799999	0.3032464	0.1575323
180	438.6831	0	2.799999	0.2926255	0.1463067

160	438.713	0	2.799999	0.3263301	0.1891606
140	438.7169	0	2.799999	0.3469114	0.2177002
120	438.6831	0	2.799999	0.3221627	0.1835104
100	438.712	0	2.799999	0.3830577	0.2724901
80	438.712	0	2.799999	0.4204352	0.3371493
60	438.7169	0	2.799999	0.5007571	0.5051213
40	438.4499	0	2.799999	0.3256197	0.2126217
20	438.7102	-6.72E-03	2.799999	0.6546196	1.22987

Fuente: Pinzón, (2019)

CONCLUSIONES

- ✓ En la parte alta de la microcuenca de estudio se encontraron varios deslizamientos activos aledaños al cauce principal o a sus afluentes, estos fenómenos ocurren por la presencia de fallas geológicas como la falla Servitá y la falla Upín, debido a la cercanía con la Cordillera Oriental, los cuales inciden directamente con el arrastre de sedimentos y aumento de caudales en la parte media y baja de la microcuenca, generando islas de sedimentos en el cauce principal variando la dirección normal del cauce;
- ✓ A lo largo de la microcuenca hay 4 concesiones para aprovechamiento de material de río, las cuales con el desarrollo de sus actividades hacen que los desvíos y la variación del cauce sea constante, además, se hallaron pilas de material en el borde el cauce en varios puntos, lo que facilita el arrastre de sedimentos ante la ocurrencia de crecidas, aumentando la carga de sedimentos y afectación por socavación aguas abajo.
- ✓ En la variación de niveles de la lámina de agua los mayores valores registrados se presentaron en horas de la mañana (7:00 am) y medio día (12:00 pm) tomando valores máximos de 140 (cm), mientras que los valores mínimos se presentaron mayormente en horas de la tarde (6:00 pm) teniendo como dato mínimo 42 cm.
- ✓ Respecto a los caudales, se observó una variación de estos, registrándose valores que oscilan entre 3900 L/s aproximadamente, estos presentados en épocas de constantes precipitaciones y 1900 L/s aproximadamente, en época de escasas precipitaciones. El caudal promedio presentado es aproximadamente 2700 L/s.
- ✓ La pendiente del cauce en la zona de estudio varía entre 0.5% – 1.5%, contando con una pendiente promedio de 1% en la mayor parte del tramo estudiado, lo que facilita la

colmatación de sedimentos.

- ✓ De acuerdo con el coeficiente pluviométrico Restrepo, Meta, presenta un régimen de lluvia bimodal, es decir que se presentan 2 épocas lluviosas en el año, indicando que la mayor parte del año se presentan precipitaciones. Las curvas IDF muestran que a menor duración de precipitación mayor será su intensidad, las intensidades máximas varían desde 70 a 150 (mm/h) aproximadamente.
- ✓ El análisis de granulometría determinó que los sedimentos encontrados en cauce y ladera son arenas mal gradadas, cabe resaltar que en campo se observa un porcentaje significativo rocas con diámetros que oscilan entre 3 a 5 cm. por otra parte los suelos tomados en deslizamientos se clasifican en arenas arcillosas y limo arcillosas.
- ✓ Los valores del coeficiente de Manning oscilaron entre 0.035 a 0.05 característicos de cauces naturales en planicies, rectos y meandros.
- ✓ Aplicando el modelo de Yang se obtuvo que el transporte de sedimentos en la mayoría de las secciones analizadas se colmata, aunque existen casos en los que ocurre erosión y socavación de lecho del cauce. Los altos niveles de colmatación se deben a que la zona de estudio se encuentra ubicada en la parte media de la microcuenca Caney, por lo que recibe grandes cantidades de sedimento de las partes altas tanto del cauce principal como de sus principales afluentes, viéndose afectada la capacidad hidráulica a la altura de la zona de estudio.

RECOMENDACIONES

- ✓ A la alcaldía municipal de Restrepo, Meta se recomienda continuar con las mediciones de niveles - caudal y monitoreo de sedimentos para tener datos representativos en las diferentes épocas del año, debido a que los resultados de la presente investigación son característicos para el periodo de estudio, los cuales se pueden implementar en la actualización del plan de manejo de la microcuenca, proyectos de gestión del riesgo, entre otros.
- ✓ Se recomienda a la alcaldía municipal de Restrepo, gestionar ante el IDEAM la reapertura de la estación Palmarito, la cual pertenece al municipio, con el propósito de tener un monitoreo constante y poder hacer estudios y predicciones mas precisas. Asimismo, se recomienda la adquisición de equipos de alta precisión para medición de caudales como molinetes.
- ✓ Se recomienda a CORMACARENA llevar a cabo vigilancia de las actividades realizadas por las extractoras de material de rio que tienen concesión en esta microcuenca, dado que actualmente el equilibrio hídrico, la oferta hídrica y el paisaje son afectados.

BIBLIOGRAFÍA

- Acosta R. (2017). Aplicación del modelo Soil Water Assessment Tool (SWAT) para estimar la producción y transporte de sedimentos en la quebrada la maría, san José del Guaviare. Universidad de pamplona, Colombia.
- Ahmad, S; Simonovic, S. 2006. An intelligent decision support system for management of floods. *Water Resources Mangement* 20: 391-410.
- Alvarado E. Barrera J. (2015). Evaluación geomorfológica, multitemporal, hidrológica y geotécnica para el área comprendida en las coordenadas N: 963019,58 E: 1059435, N: 963234, E: 1059435, N: 962712, E: 1059929, N: 962651, E: 1059651 municipio de Restrepo meta. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Beltrán J. Ordoñez D. (2012). Estudio para establecimiento de tasas de arrastre de fondo para el proyecto de generación hidroeléctrica hidro san Bartolo mediante modelo físico de lecho móvil. Universidad De Cuenca, Cuenca-Ecuador.
- Bonilla O. (2014). Determinación del transporte de sedimentos en suspensión de fondo y total en el puente grande del río de Coata- Puno. Universidad Nacional Del Altiplano De Puno. Puno – Perú.
- Cardona, B. (2012). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Maestría en Energía y Ambiente, Universidad de San Carlos de Guatemala.
- Castañeda C. (2014). Estudio de crecientes y cálculo de niveles máximos en el río suaza en el cruce sobre la vía sustitutiva Pitalito – Garzón –Gigante Del Departamento Del Huila.
- Escobar C. and Duque G. (2016) Geotecnia para el trópico andino. Manizales, Colombia.
- Espinoza J. (2001). Procesos de transporte de sedimentos; Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). México.
- Espinosa, C. (2003). Estimación de la producción y transporte de sedimentos en la cuenca alta del río Yaque del norte y del río Guanajuma, república dominicana. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Fleenor, W; Jensen, M. 2003. Evaluation of numerical models Hec-Ras and DHI-MIKE 11. Draft submitted to *Journal of Hydraulic Engineering*. 2003.
- Gaspari, F. J. (2012). Caracterización Morfométrica de la cuenca alta del río Sauce Grande, Buenos Aires, Argentina. Séptimo congreso de medio ambiente AUMG. La Plata Argentina.
- Guzmán I. Watson F. (2016). Modelación Hidrodinámica y Morfológica del Río La Estrella, Limón. Tecnológico de Costa Rica.

- HEC-CEIWR. (2016). Documentación HEC RAS. Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology Geological Society of America Bulletin. U.S.A.
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC. Obtenido de <https://www.igac.gov.co/>
- Iroume A. Uyttendaele P. (2009). Cuantificación del transporte de sedimentos mediante mediciones directas y el uso de modelos empíricos en una cuenca experimental de la Cordillera de Los Andes, Sur de Chile. Universidad Austral de Chile.
- INGEOMINAS (1992). Memoria técnica del mapa de zonificación de amenazas naturales por inundaciones y avalanchas torrenciales (Restrepo-Meta). Colombia.
- IDEAM, IGAC, CORMAGDALENA, (2007). “Mapa de Cobertura de la Tierra Cuenca Magdalena-Cauca, Metodología Corine Land Cover Adaptada para Colombia, escala 1:100.000”.
- Moreno J. (2015). Transporte y sedimentación. Bogotá, Colombia. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una Guía para la Evaluación de Amenazas.
- Monsalve S. G. (1995). “Hidrología en la Ingeniería”. Editorial Alfa Omega. Colombia.
- Montoya L. Montoya R. (2005). Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de Antioquia. Universidad de Medellín, Antioquia – Colombia.
- OMM. (2011). Guía de Practicas Hidrológicas. (S. Edición, Ed.) Organización Mundial de Meteorología, Volumen I.
- Pérez D. Perillo G. (2002). Transporte de sedimentos del Arroyo Napostá Grande, Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires. Universidad Nacional del Sur, San Juan.
- Plan Básico de Ordenamiento Territorial del municipio de Restrepo, Meta. 2018 – 2030. Formulación rural.
- Plan Integral De Desarrollo Municipal De Restrepo, Meta, 2012 – 2015.
- Quispe J. (2013). Determinación del transporte de sedimentos en flujo gradualmente variado no permanente con el modelo HEC-RAS en el río Ilave, tramo puente antiguo-Alquipa. Universidad Nacional del Altiplano, Puno – Perú.
- Rocha Felices A. (1998). “Introducción a la Hidráulica Fluvial”, Universidad Nacional de Ingeniería-Facultad de Ingeniería Civil. Lima-Perú.
- Servicio Geológico de los Estados Unidos -USGS. Obtenido de <https://www.usgs.gov/>
- Silva G. (2003). Ríos y corrientes naturales. Bogotá, Colombia.

- Silva G. (2003). Transporte de sedimentos en los ríos. Bogotá, Colombia.
- Silva W. Rivera j. (2016). Guías para la elaboración de estudios de transporte de sedimentos para la extracción de material en los ríos de Puerto Rico. Universidad de Puerto Rico, Recinto de Mayagüez.
- Solano L. (2017). Análisis de los procesos erosivos en las vertientes de la microcuenca hato viejo municipio de Chitagá. Universidad De Pamplona, Colombia.
- Suarez N. (2017). Estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en el río la Plata, Mutiscua, Norte de Santander – zona de influencia de la cabecera municipal. Universidad de Pamplona, Colombia.
- Szupiany R. Trendo A. Álvarez A. (2005). Transporte de Sedimentos de Fondo en el Rio Salado (Santa Fe, Argentina). Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Vargas, R; Díaz, M. (1998). Curvas sintéticas regionalizadas de intensidad duración frecuencia para Colombia. Universidad de Los Andes, Bogotá Colombia.
- Vásquez V. A. (1997). “Manejo de Cuencas Altoandinas”, Escuela Superior de Administración del agua “CHARLES SUTTON”. Lima Perú.
- Villamizar R. (2017). Análisis de amenaza por crecientes súbitas de la microcuenca la Viuda, municipio de Chitagá, norte de Santander. Universidad de pamplona, Colombia.
- Villón M. (2002). Hidrología. Editorial MaxSoft. Lima – Perú.