

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN
EL RÍO LA PLATA, MUTISCUA, NORTE DE SANTANDER – ZONA DE
INFLUENCIA DE LA CABECERA MUNICIPAL.

NURY YADIRA SUAREZ GAMBOA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
INGENIERÍA AMBIENTAL
PAMPLONA
2017

ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN
EL RÍO LA PLATA, MUTISCUA, NORTE DE SANTANDER – ZONA DE
INFLUENCIA DE LA CABECERA MUNICIPAL.

NURY YADIRA SUAREZ GAMBOA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar por el título de Ingeniera
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
2017

Nota de Aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

DEDICATORIA

A Dios
Mi todo, mi refugio constante.

A mis padres
Sofía y Arnulfo, gratitud infinita.
Por su apoyo, cariño y por el
tesoro máspreciado - mi vida.

A mis hermanos
Por ser parte importante en esta
familia.

A mi abue Gerar
Por sus enseñanzas y porque
desde el cielo me acompaña
siempre.

La culminación de esta etapa es
el resultado de sacrificio,
perseverancia, fe y constancia. Mi
ejemplo propio de que los límites
solo están en la mente.
Soy decisiones, soy enseñanzas,
soy mi obra de arte.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ser guía en cada uno de mis pasos.

A mis padres por su entrega y confianza.

A la Alcaldía de Mutiscua por la oportunidad de realizar la pasantía y el presente proyecto.

A la coordinación de semilleros por los diferentes eventos realizados donde pude participar generando en mí el despertar del espíritu investigador y por ende el desarrollo como persona y profesional, bajo la dirección del semillero de investigación Agua - Aire y Suelos.

A mis profesores Maria E. y Jesús (El profe chucho) mis tutores, por su apoyo, colaboración, orientación y consejos de vida.

A Álvaro Ortega (El jefe) por su colaboración y gestión en la alcaldía.

A Ludy (monacha), Andrés (checho) y mi súper abuela Celi por su ayuda y acompañamiento en campo.

A mis hermanos Jhon, Yeison y Diego Alejandro, mis hermanas MarDayana y Noelia por ser el motor para luchar día a día por mis propósitos sin importar los obstáculos.

A Andre mi amiga, quien nunca dejo de creer en mí y estuvo ahí día y noche hasta la culminación de esta meta.

A mis compañeros, amigos y demás personas que estuvieron alentándome constantemente.

Gracias y mil gracias, Dios les bendiga.

CONTENIDO

| | |
|---|-----|
| RESUMEN..... | 13 |
| INTRODUCCIÓN..... | 14 |
| 2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 16 |
| 3. JUSTIFICACIÓN..... | 17 |
| 4. OBJETIVOS..... | 18 |
| 4.1.OBJETIVO GENERAL..... | 18 |
| 4.2.OBJETIVOS ESPECÍFICOS..... | 18 |
| 5. ALCANCES Y LIMITACIONES..... | 19 |
| 6. MARCO REFERENCIAL..... | 20 |
| 6.1.MARCO CONTEXTUAL..... | 20 |
| 6.2.ANTECEDENTES..... | 21 |
| 6.3.MARCO TEÓRICO..... | 29 |
| 7. METODOLOGÍA..... | 58 |
| 7.1.TOPOGRAFÍA..... | 58 |
| 7.2.CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE SEDIMENTOS..... | 58 |
| 7.3.CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO PARA DETERMINACION DEL CAUDAL..... | 60 |
| 7.4.OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INSUMOS DE PRECIPITACION PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS IDF, HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS Y LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL MODELAMIENTO..... | 60 |
| 7.5.CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE SEDIMENTOS EN LOS PUNTOS DE MUESTREO..... | 62 |
| 7.6.MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0..... | 65 |
| 7.7.MAPAS..... | 68 |
| 8. RESULTADOS..... | 69 |
| 8.1.MORFOMETRÍA DE LA CUENCA..... | 69 |
| 8.2.TOPOGRAFÍA..... | 71 |
| 8.3.ANÁLISIS HIDROLÓGICO..... | 72 |
| 8.4.GEOLOGÍA..... | 82 |
| 8.5.ANALISIS DE SEDIMENTOS..... | 88 |
| 8.6.HEC-RAS..... | 104 |
| CONCLUSIONES..... | 123 |
| RECOMENDACIONES..... | 125 |
| BIBLIOGRAFÍA..... | 127 |
| ANEXOS..... | 131 |

LISTA DE IMÁGENES

| | |
|--|-----|
| Imagen 1. Ubicación de la Microcuenca Río La Plata..... | 20 |
| Imagen 2. Patrones de drenaje..... | 32 |
| Imagen 3. Orden de los cursos de agua según Horton..... | 34 |
| Imagen 4. Formas de transporte del sedimento..... | 40 |
| Imagen 5. Formas de transporte del sedimento según el origen del material..... | 40 |
| Imagen 6. Formas de transporte del sedimento según el tipo de flujo..... | 41 |
| Imagen 7. Pantalla inicial del Software Hec-Ras V 5.0..... | 47 |
| Imagen 8. Interfaz HEC-RAS 5.0..... | 48 |
| Imagen 9. Perfiles de flujo. | 49 |
| Imagen 10. Pantallazo del modelamiento de flujo inestable de una o dos dimensiones..... | 50 |
| Imagen 11. Presentación del almacenamiento de datos. | 52 |
| Imagen 12. Gráficos e información final. Fuente: HEC-CEIWR, 2016..... | 52 |
| Imagen 13. Ras mapper. | 53 |
| Imagen 14. Datos requeridos para dibujar una sección transversal. | 67 |
| Imagen 15. Geometría en Hec-Ras. | 67 |
| Imagen 17. Ubicación de los punto de aforo, nivel y muestro de calidad de agua..... | 77 |
| Imagen 18. Mapa H13..... | 87 |
| Imagen 19. Mapa FAO y mapa IGAC 1994. | 87 |
| Imagen 20. Puntos de muestro de sedimentos en el Río La Plata. | 88 |
| Imagen 21. Geometría del terreno – zona de estudio..... | 104 |
| Imagen 22. Diagrama esquemático generado. | 115 |

LISTA DE ECUACIONES

| | |
|--|----|
| Ecuación 1. Pendiente media | 31 |
| Ecuación 2. Intensidad..... | 35 |
| Ecuación 3. Tiempo de punta | 37 |
| Ecuación 4. Tiempo base (Horas)..... | 37 |
| Ecuación 5. Caudal de punta (m ³ /s)..... | 37 |
| Ecuación 6. Transporte total | 42 |
| Ecuación 7. Caudal sólido | 54 |
| Ecuación 8. Flujo de sedimentos | 54 |
| Ecuación 9. Parámetros de transporte..... | 54 |
| Ecuación 10. Número de movilidad de sedimentos ajustado por el factor de evasión | 54 |
| Ecuación 11. Velocidad de corte..... | 54 |
| Ecuación 12. Diámetro adimensional de partículas | 55 |
| Ecuación 13. Esfuerzo cortante | 55 |
| Ecuación 14. Descarga del sedimento..... | 55 |
| Ecuación 15. Caudal Sólido (Ton/día) | 55 |
| Ecuación 16. Caudal sólido | 56 |
| Ecuación 17. Relación de rugosidad de Nikaradse - MPM | 56 |
| Ecuación 18. Transporte total - Toffaleti | 56 |
| Ecuación 19. Transporte total por unidad de ancho..... | 56 |
| Ecuación 20. Transporte de carga de la cama | 56 |
| Ecuación 21. Capa inferior de transporte..... | 56 |
| Ecuación 22. Capa media de transporte..... | 56 |
| Ecuación 23. Capa superior de transporte..... | 56 |
| Ecuación 24. Descarga del sedimento (Km/s) | 57 |
| Ecuación 25. Concentracion (ppm)..... | 57 |
| Ecuación 26. Esfuerzo cortante referencial | 57 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|-----|
| Tabla 1. Tiempos de concentración para las fuentes hídricas en función del Kc... | 30 |
| Tabla 2. Relieve en función de la pendiente media (%)..... | 31 |
| Tabla 3. Principales ecuaciones para determinar el tiempo de concentración..... | 33 |
| Tabla 4. Coeficiente tiempo base (tb) | 37 |
| Tabla 5. Numeración y abertura de los tamices / tipo de suelo..... | 38 |
| Tabla 6. Datos requeridos para la ecuación de transporte | 54 |
| Tabla 7. Coeficientes de contracción y expansión según el Hec-Ras..... | 66 |
| Tabla 8. Características morfométricas de Microcuenca- río La Plata..... | 69 |
| Tabla 9. Tiempos de concentración de la Microcuenca- río La Plata..... | 70 |
| Tabla 10. Aforos en Microcuenca - río La Plata..... | 78 |
| Tabla 11. Calidad de agua – muestra 1 | 80 |
| Tabla 12. Calidad de agua – muestra 2 | 81 |
| Tabla 13. Resultados de Hec-Ras para primer muestreo – flujo 2..... | 117 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1. Curva hipsométrica según la teoría. | 31 |
| Gráfico 2. Curvas IDF. | 35 |
| Gráfico 3. Hietograma. | 36 |
| Gráfico 4. Hidrograma SCS. | 37 |
| Gráfico 5. Factores determinantes. | 42 |
| Gráfico 6. Factores naturales y antrópicos para los modelos. | 45 |
| Gráfico 7. Aspectos influyentes en el transporte de sedimentos. | 46 |
| Gráfico 8. Curva hipsométrica zona de estudio. | 71 |
| Gráfico 9. Curva IDF, Estación La Caldera – Mutiscua, Río La Plata. | 73 |
| Gráfico 10. Hietogramas para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años del río La Plata, Mutiscua. | 74 |
| Gráfico 11. Hidrogramas para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100. | 75 |
| Gráfico 12. Nivel de agua del río en el punto de muestreo. | 78 |
| Gráfico 13. Caudales aproximados captados por las estaciones piscícolas. | 79 |
| Gráfico 14. Caracterización granulométrica del punto 1, zona del cauce. | 89 |
| Gráfico 15. Caracterización granulométrica del punto 1, zona del margen. | 90 |
| Gráfico 16. Caracterización granulométrica del punto 2, zona del cauce. | 92 |
| Gráfico 17. Caracterización granulométrica del punto 2, zona del margen. | 93 |
| Gráfico 18. Caracterización granulométrica del punto 3, zona del cauce. | 95 |
| Gráfico 19. Caracterización granulométrica del punto 3, zona del margen. | 96 |
| Gráfico 20. Caracterización granulométrica del punto 4, zona del cauce. | 97 |
| Gráfico 21. Caracterización granulométrica del punto 4, zona del margen. | 99 |
| Gráfico 22. Caracterización granulométrica del punto 5, zona del cauce. | 101 |
| Gráfico 23. Caracterización granulométrica del punto 5, zona del margen. | 102 |
| Gráfico 24. Sección transversal y variación de los caudales. | 105 |
| Gráfico 25. Perfil del tramo de estudio en función de los caudales. | 107 |
| Gráfico 26. Parcelas estándar para una sección en función del caudal. | 108 |
| Gráfico 27. Tramo en perspectiva para los diferentes caudales. | 110 |
| Gráfico 28 Diagrama de perfiles para el tramo de estudio y sección – representación del potencial de erosión. | 112 |
| Gráfico 29. Elevación de la superficie de agua (Wsed) – tabla de resultados. | 114 |
| Gráfico 30. Puente en una sección. | 116 |

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

| | |
|--|-----|
| Fotografía 1. Levantamiento de las secciones transversales | 58 |
| Fotografía 2. Sedimentos, forma y estructuras hidráulicas en el cauce. | 59 |
| Fotografía 3. GPSmap 76CSx usado en el levantamiento de información. | 59 |
| Fotografía 4. Reglilla para medición de nivel de agua (Cm). | 60 |
| Fotografía 5. Sedimentos presentes en el cauce (izquierda) y canal de recolección de muestra de sedimento fino en el margen (derecha)..... | 63 |
| Fotografía 6. Cuarteo en campo de los sedimentos. | 63 |
| Fotografía 7. Secado de las muestras de sedimento..... | 63 |
| Fotografía 8. Serie de tamices / sedimentos tamizados. | 64 |
| Fotografía 9. Muestreadores artesanales margen y cauce..... | 64 |
| Fotografía 10. Recolección de material retenido en los muestreadores. | 65 |
| Fotografía 11. Laguna La Plata..... | 69 |
| Fotografía 12. Bloques transportados y mármol con venas de calcita..... | 83 |
| Fotografía 13. Minerales con algún contenido de hierro y agua de pH ácido | 83 |
| Fotografía 14. Minerales con presencia de carbonatos. | 84 |
| Fotografía 15. Disposición de rocas en el margen..... | 85 |
| Fotografía 16. Fracturamiento de roca..... | 85 |
| Fotografía 17. Desgaste en rocas por acción de la corriente..... | 86 |
| Fotografía 18. Bloques transportados..... | 86 |
| Fotografía 19. Estructura del molino Herrán y antiguo matadero..... | 120 |
| Fotografía 20. Captaciones de estaciones piscícolas. | 120 |
| Fotografía 21. Puentes. | 121 |
| Fotografía 22. Muros y pilas en concreto..... | 121 |

ANEXOS

| | |
|---|-----|
| Anexo 1. Ubicación general del proyecto..... | 131 |
| Anexo 2. Mapa de elevaciones | 131 |
| Anexo 3. Mapa de los drenajes..... | 132 |
| Anexo 4. Mapa de orden de la cuenca..... | 132 |
| Anexo 5. Mapa de información generalizada de la cuenca | 133 |
| Anexo 6. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos..... | 133 |
| Anexo 7. Mapa de ubicación de los puntos de aforo, calidad de agua y nivel ... | 134 |
| Anexo 8. Elevación de la superficie de agua en función de los sedimentos | 134 |

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objeto estudiar el comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata, Municipio de Mutiscua, Norte de Santander – Zona de influencia de la cabecera municipal. Se da inicio con 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, toma de datos y análisis que permiten observar la manera cómo funciona el sistema cauce – características de la zona. Con los datos recopilados se efectúa la modelación en Hec-Ras V 5.0 y ArcGis 10.2. Obteniéndose como resultados: el perfil del cauce que inicia en la cota 2757 y finaliza en la cota 2565 msnm (vertimiento); así pues, la zona de estudio se clasifica como microcuenca con un área aproximada de 2.13% del área total (265 Km²), de orden 3 cuyo grado estructural es de tipo medio que implica mayor control estructural y mayor erosión, drenaje subparalelo. Por otra parte, las curvas IDF permitieron observar que a menor tiempo de duración mayor es la intensidad en función del periodo de retorno; así mismo, se tiene variación del caudal directamente relacionado con la precipitación que para el tiempo de los aforo disminuyó de 1.68 a 1.17 m³/s donde el mayor caudal captado por las estaciones piscícolas corresponde a 0.09 m³/s que por efectos del proceso de producción y corroborándose con las muestras para calidad, el agua No es apta para consumo humano sin previo tratamiento (Resolución 2115, 2007) La granulometría del sedimento efectuado en los 5 puntos de muestreo conllevó a determinar que en el cauce del río La Plata predominan las gravas arenosas y arenas media que junto con el levantamiento de las secciones transversales, caudales y condiciones de contorno en Hec-Ras V 5.0 permitieron obtener el modelo de la cuenca determinándose que las zonas vulnerables son las vegas de las fincas en el tramo que comprende el puente Los Salados y Molino Monarca, de igual manera las zonas de riesgo de inundación son: Molino Monarca, 4 estaciones piscícolas, zona de la vía sucre o antigua marmolería, Hogar Juvenil Campesino y la zona del vertimiento municipal – margen derecho. También, se destaca que la zona de estudio presenta mayor tendencia a ser socavada o erosionada siendo las estructuras hidráulicas las afectadas directamente, presentándose zonas de sedimentación en menor proporción.

INTRODUCCIÓN

En la antigüedad aparecen por primera vez los trabajos en pro de la hidráulica fluvial, aunque no reconocida como tal. De manera general Vega. D (2015) indica que en Colombia para el año 1600 nace la hidráulica fluvial, siendo para 1650 que se inician los estudios sobre la complejidad radicada en el transporte de sedimentos y la formación del delta, puesto que para esta época se comenzó el canal del dique, del hoy departamento de Atlántico, cuya zona está caracterizada por pantanos debido a la presencia de periódicas inundaciones del río. De forma más precisa en 1697 la hidráulica fluvial se direcciona a la combinación de conceptos de hidrología general, geomorfología y transporte de sedimentos, estudiando el comportamiento hidráulico de los ríos en lo que se refiere a caudales y niveles medios y extremos, velocidad de flujo, variaciones de fondo por socavación, sedimentación, capacidad de transporte y afectación contra las márgenes. Siendo para el año 1907 que se emprenden los estudios formales cuando se asignan los direccionamientos a encauzar el río y provocar la ruptura de la barra en la zona delta en Bocas de Ceniza; no obstante, muchas de las investigaciones sobre los cauces no son presentadas de manera formal; por lo cual, varias zonas carecen de información primordial para el caso no se reconocen estudios de sedimentos en la microcuenca del río La plata.

Por lo anterior, el desarrollo del estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en la zona de influencia de la cabecera municipal es parte de las labores designadas en la práctica en investigación desarrollada en la alcaldía municipal; este estudio da inicio a la documentación del municipio de Mutiscua en función de los recursos hídricos y el proceder de los mismos. El río La Plata se localiza en el municipio de Mutiscua en la región central, subregión occidental, el municipio limita: al Norte con Pamplona y Cucutilla, al Sur con Silos, al Oriente con Cácuta y Pamplona, al Occidente con el departamento de Santander.

Para realizar el estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata en primer lugar se efectúa el proceso de documentación, luego se determina su hidrología que incluye: caracterización morfométrica de la cuenca, curvas IDF, hietogramas, Hidrogramas, caudales captado y nivel de lámina. Seguidamente se hace el levantamiento de las secciones transversales e identificación de los puntos de muestreo de sedimento para su posterior caracterización mediante granulometría; otro factor importante corresponde a la revisión de la rugosidad de Manning para el canal y los bancos. Posteriormente, se

desarrolla el levantamiento a través del Hec-Ras 5.0 paso a Hec-GeoRas y ArcGis 10.2 en función de la información de campo para finalmente efectuar su análisis entregando como resultado la modelación y simulación de la microcuenca río La Plata del municipio de Mutiscua. La definición e información recolectada constituye una herramienta fundamental para el ente territorial puesto que permite el reconocimiento de las zonas vulnerables y las propensas al riesgo por inundación o por falla en las estructuras hidráulicas, para la generación de modelos y estrategias de prevención, cuidado y protección ambiental, social y económica de la región.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los cambios de uso del suelo en la parte alta de la cuenca, al pasar de zonas de bosque o de protección a uso para cultivos o de pastoreo generan gran influencia en el área de la cabecera municipal puesto que se facilita el mayor desprendimiento de partículas del suelo y por ende mayor erosión superficial en las temporadas de alta pluviosidad, incrementando notablemente la cantidad de sedimento en las corrientes.

En la actualidad las características y los comportamientos que se presentan en el cauce permiten evidenciar cómo la intensidad de los fenómenos naturales y antrópicos (producción piscícola que incluye la construcción de estanques y captaciones, zonas de pastoreo, agricultura, puentes, muros y pilas) generan modificación en menor o mayor escala tanto en la morfología del río como de las estructuras que se encuentran a su paso.

Debido a la variación de caudales se evidencia en mayor o menor proporción el transporte de los sedimentos; generando a largo plazo desequilibrio por acción de las denominadas aguas claras siendo lo más conveniente para las estructuras hidráulicas que se mantenga un lecho móvil, ya que los sedimentos removidos deben estar en igual proporción a los sedimentos depositados. Por otra parte, en cuanto a las captaciones de las estaciones piscícolas el desconocimiento del comportamiento de los sedimentos en el cauce ante las variaciones de corriente, tienen implicaciones económicas al no recibir el mantenimiento de manera constante se evita el suministro de agua a los estanques por depósito de los sedimentos a la entrada. Cabe resaltar que los sedimentos depositados en grandes escalas constituyen una modificación del cauce generando que la lámina de agua se eleve por acción de alta pluviosidad, puesto que con esto se aumentan los caudales ocasionando inundaciones en las zonas donde el cauce está muy cerca en cota de la planicie de inundación.

Lo anterior, conlleva a revisar ¿cómo es el comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata?

3. JUSTIFICACIÓN

Debido a la problemática planteada anteriormente se requiere revisar la interacción que se presenta entre el recurso hídrico (Río La Plata) – modificación natural – modificación humana y la intensidad de los factores (precipitación, topografía, flujo, sedimentos).

En diferentes estudios se destaca que uno de los problemas más relevantes que afecta la calidad del agua en las corrientes naturales son los sedimentos, por lo que se han implementado diversas estrategias para evaluar el comportamiento y el transporte de los mismos en las fuentes hídricas, haciéndose necesario que en el cauce del río La Plata se desarrolle dicho estudio con el objetivo de generar información detallada acerca de cómo es el comportamiento del flujo y los sedimentos ante los diferentes eventos propios de la cuenca, para posteriormente tomar acciones preventivas o de mitigación en caso de riesgos a gran escala y el mejoramiento, mantenimiento y estudios previos antes de ejecutar obras hidráulicas .

Por lo tanto, este proyecto se constituye en el punto de partida para la generación de información ya que no se cuenta con estudios sobre el transporte de sedimentos, análisis hidrológicos, erosión y socavación en el río la plata ni en el área de influencia de la cabecera municipal.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

- Estudiar el comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata, Mutiscua, Norte de Santander - Zona de influencia de la cabecera municipal.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer los criterios de selección para los puntos de muestreo de sedimentos.
- Caracterizar la granulometría de sedimentos tomados en los puntos de muestreo.
- Establecer criterios de selección de los puntos de aforo para determinación del caudal.
- Obtener y procesar insumos de precipitación para la determinación de las curvas IDF, hietogramas, Hidrogramas, topografía y los elementos necesarios para el modelamiento.
- Modelar la información recopilada en el Software Hec-Ras v 5.0.

5. ALCANCES Y LIMITACIONES

5.1. ALCANCES

- El proyecto “Estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata, Municipio de Mutiscua, Norte de Santander – Zona de influencia de la cabecera municipal” tiene como alcance revisar y analizar la manera como los sedimentos presentes en el cauce son transportados teniendo en cuenta las características morfológicas y meteorológicas del área de estudio.

5.2. LIMITACIONES

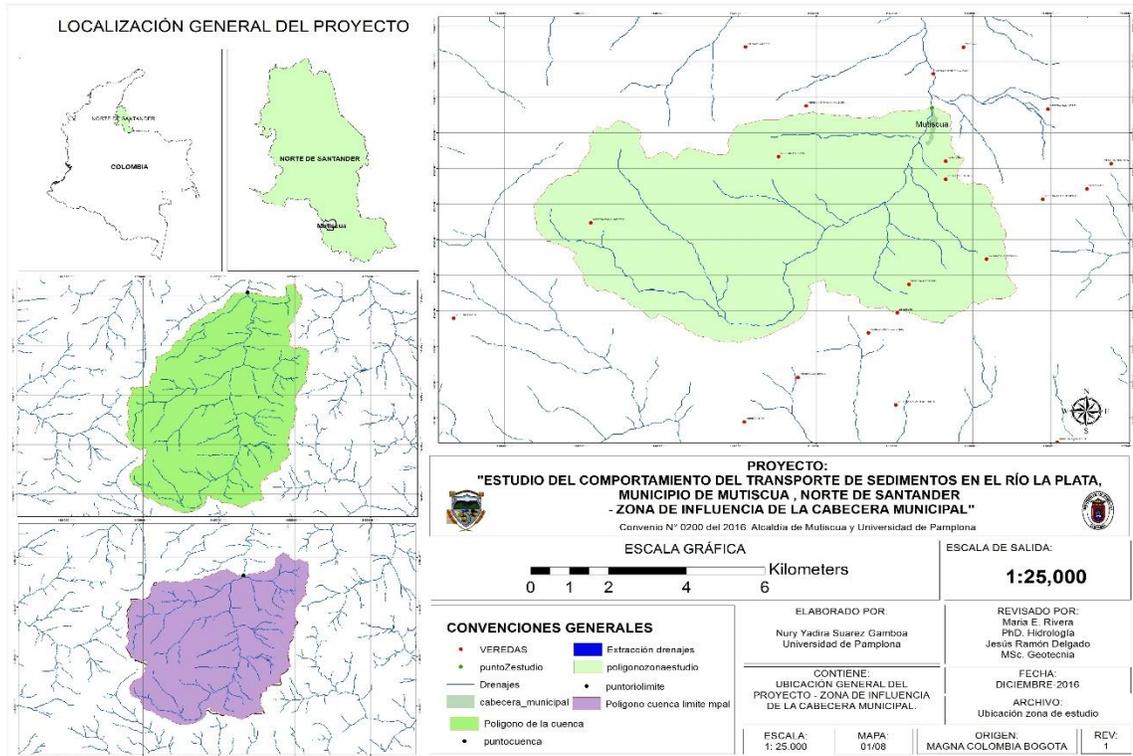
- En el municipio no se cuenta con molinete, por lo tanto, los caudales de aforo fueron medidos mediante método de flotador, destacando que este presenta un margen de error considerable.
- La topografía existente en el municipio de Mutiscua es detallada, pero no es precisa, puesto que para el presente proyecto se requería curvas de nivel o modelo digital de terreno de precisión aproximada de 1 metro, por lo tanto, es conveniente realizar un levantamiento con equipos de precisión para mejoramiento de la calidad de la información. Dicha limitación está dada porque la alcaldía no cuenta con los equipos de alta precisión y no se tienen los rubros para pagar un levantamiento topográfico. por consiguiente, se optó por realizar un levantamiento con equipos de limitada precisión.
- Para el proceso de la investigación se requiere información niveles y caudales, pero en la zona no se cuenta con estaciones hidrometeorológicas.
- En el lugar no existen laboratorios para la realización de pruebas de calidad de agua o laboratorio de suelos que permitan el proceso de mejoramiento y ampliación de información constante.

6. MARCO REFERENCIAL

6.1. MARCO CONTEXTUAL

La microcuenca del río La Plata se encuentra localizada en el municipio de Mutiscua en Longitud Oeste de Greenwich $71^{\circ}45'02''$ y Latitud Norte $07^{\circ}18'07''$, en el departamento Norte de Santander en la región central, subregión occidental a 25 Km de la ciudad de Pamplona (PBOT Mutiscua, 2016-2019) Además, cuenta con los siguientes límites: al Norte con Pamplona y Cucutilla, al Oriente con Cágota y Pamplona, al Sur con Silos y al Occidente con el Departamento de Santander. La microcuenca en la zona de estudio está conformada por las veredas: Ranchadero, La Plata, El Aventino, Chinavega y Centro, límites con la vereda Tapagua y otras (Imagen 1). La Laguna La Plata es el punto de inicio del Río La Plata, el cual a su paso es alimentado por afluentes principales tales como: El Chorrerón y Las pavas; además, recibe aportes aguas abajo de la zona de estudio de las quebradas: La Caldera, Sicabala, Los Salados, Valegrá, entre otras.

Imagen 1. Ubicación de la Microcuenca Río La Plata.



Fuente: ArcGis. Editado: Suarez, 2016.

6.2. ANTECEDENTES

Los estudios de hidráulica fluvial surgen desde que el hombre da sus primeros pasos en pro del desarrollo social en el caso de las conducciones para acueductos o la misma agricultura. No obstante, recientemente a nivel internacional se han desarrollado diversas investigaciones destacando 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) que emplea el modelo distribuido del ciclo hidrológico y de sedimentos TETIS en la cuenca del río Ésera (España) con el objeto de analizar el efecto producido por el cambio climático en la dinámica de los sedimentos de la cuenca y en el aterramiento del embalse de Barasona que la drena. El submodelo de sedimentos se realizó mediante el empleo de los volúmenes de sedimentos depositados en el embalse medidos a partir de batimetrías históricas. Cuyos análisis de los efectos del cambio climático se han usado como entrada del modelo de las series de precipitación y temperatura. La metodología empleada parte del análisis de evolución de emisiones (incremento del CO₂), modelos climáticos (series de precipitación y temperatura), Comparación con observaciones en periodo de control (análisis y toma de decisiones), Implementación del modelo hidrológico (series de caudales y sedimentos), comparación de resultados en situación actual y futuras (análisis y toma de decisiones) en el orden descrito. Los resultados de manera general de las simulaciones con TÉTIS se determina que las aportaciones de caudal tenderán a disminuir en el futuro como consecuencia directa de la disminución de la precipitación, una mayor evapotranspiración potencial y una menor humedad del suelo en la cuenca.

Cabe resaltar de manera general que en Argentina se realizó la modelación matemática del transporte de sedimentos no uniformes en condiciones de desequilibrio (Basile, 2000) donde se describe el desarrollo y la implementación computacional del modelo matemático apropiado para realizar la simulación del flujo hídrico y el transporte de sedimentos por las clases granulométricas en los diferentes procesos de erosión y sedimentación, además de los cambios dados en los lechos del cauce. Dicho modelo busca simular las condiciones de desequilibrio del transporte de sedimentos en suspensión, por consiguiente el modelo ha sido aplicado en casos esquemáticos y a nivel de laboratorio para simular numéricamente un experimento que implica los cambios morfológicos en una trinchera construida transversalmente a la dirección del flujo hídrico.

Así pues, Moya, A, & J en su trabajo presentado en XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica en Perú – 2016 exhiben cómo se realizó el estudio

de socavación general sustentado en un análisis bibliográfico y en las génesis de las formulaciones en lo correspondiente al proyecto de la refinería del pacífico en zona costera del Ecuador, para tal efecto se ejecutaron estudios hidrológicos, hidráulicos y de socavación en los 7 sitios de cruce, coincidentes con los ríos principales a lo largo de la ruta empleando el HEC-HMS como modelo hidrológico para el análisis de la frecuencia de caudales y mediante la aplicación del HEC-RAS se llevó a establecer el nivel de agua y la velocidad. Además se obtuvo que la observación de los métodos presentan resultados cercanos; siendo el método de Lischtván - Levediev el que de alguna manera tiene comprobación de campo; además que su uso en Latinoamérica es bastante generalizado.

Por otra parte, a nivel nacional se consideran: Los estudios realizados por (Jaramillo & Ramírez, 2005) han conllevado a la consideración de que los sedimentos son fuente de afectación directa en la calidad del agua y a raíz de esto cabe resaltar que en la actualidad se han realizado pocos trabajos de investigación puesto que se presentan escasas metodologías donde se relacionen las variables óptimas de la cuenca con la carga contenida en la corriente; estudios realizados en Antioquia (Colombia) se ejecutan con el objeto de deducir aquellos fenómenos que están involucrados de forma inmersa en la formación de los sedimentos, el transporte y finalmente su disposición dentro de la cuenca hidrográfica. Este planteamiento lleva a la determinación de la relación entre la carga de sedimentos presentes y a las variables climáticas con mayor influencia.

Sin embargo, en la literatura se encuentran expuestas diferentes metodologías para la determinación de la capacidad de la corriente hídrica para efectuar el transporte de sedimentos, así como la importancia de realizar registros de forma simultánea de caudal líquido y sólido, todo esto en función de la selección del método apropiado para el caso. Una vez conocida la información se efectuó el análisis de confiabilidad de los registros usando el concepto de geometría hidráulica propuesto por Leopold y Maddock, donde la carga es medida a partir de los aforos y evaluada con el procedimiento modificado de Einstein, donde dicho programa de computadores se calibró con los datos provenientes del río Apure seguido del cálculo de la concentración de los sedimentos y la granulometría del lecho. Posterior al análisis de las limitantes presentes en los modelos de la literatura se hizo posible la selección del modelo aplicable a la región y considerando que no se disponía de granulometría del materia presente en el lecho dando mayor énfasis a las cargas de sedimentos en suspensión y a la carga total del cauce. En los primeros se empleó el modelo de Toffaleti, Van Rijn y Posada y para la carga total los modelos de Yang, Ackers y White, Shen y Hung, Colby modificado por Posada y Nordyn (1993).C

El transporte de sedimentos en los canales naturales varía en el tiempo y el espacio, adicional la confiabilidad y la calibración del modelo se fundamentan en el número de muestras. Cabe resaltar lo complicado del proceso y que dicha investigación realizada en la predicción de la capacidad de transporte del material sólido en una corriente las fórmulas no definen en su totalidad el proceso de transporte de sedimentos si no que estas se comportan mejor que otras dadas unas condiciones. (Posada Y Montoya 2000)

El análisis de los diversos modelos de transporte de sedimentos es el principal objeto del trabajo efectuado en Arbúcies, cordillera Costero Catalanas. El grado de correlación entre las predicciones de los modelos y las tasas de transporte de sedimento obtenida en el campo varía en gran consideración. El mejor ajuste lo presentan las ecuaciones de Ackers & White (1973) y Engelund & Hansen (1967) citado por: Batalla & Sala, 1996, reflejo de su diseño original para ríos de granulometría dispersa y movimiento de dunas en el lecho respectivamente.

Los modelos desarrollados por Brownlie (1981) y Van Rijn (1984) muestran un funcionamiento más deficiente, a causa del desajuste entre los datos de campo y algunas condiciones de aplicación de los modelos. La discrepancia entre valores estimados y observados pone de relieve la complejidad de los procesos hidráulicos y sedimentológicos en ríos permanentes, relacionados tanto con la migración de formas durante caudales bajos como con la destrucción durante crecidas de sectores del lecho con acorazamiento de gravas. (Batalla & Sala, 1996)

Además, el estudio de técnicas nucleares aplicadas a la medición de la concentración de sedimentos en suspensión en fuentes hídricas de (Quintero, 2005) programa de investigación de la Universidad Libre investigan técnica que basada en el empleo de fuentes radioactivas, utilizada en hidrología para la determinación de la concentración de sedimentos en suspensión transportados por los ríos. Realizando comparación de la técnica convencional con la técnica de medición nuclear determinado, analizando y cuantificando los valores consistentes. Partiendo de que en dichos procesos que relacionan el área de hidrología isotópica hoy día Colombia no cuenta con información actualizada, que asegure un estudio eficiente en la aplicación de técnicas nucleares a sedimentos en suspensión por esto las prácticas son realizadas en tanques de simulación de fuentes líticas, que posee el laboratorio como toma de blancos o fondos para dar inicio a la calibración de los equipos en diferentes concentraciones pertinentes a la documentación y recomendación de los parámetros de medición. Las muestras se recolectaron en el río Checua – Cundinamarca en el 2004 se llevaron a laboratorio para prácticas y finalmente este trabajo permitió que mediante el equipo portátil para la medida punto a punto de la concentración de sedimentos suspendidos hayan sido desarrollados

por el organismo internacional de energía atómica, que a través de una sonda de medida que se introduce en el agua emiten los impulsos del detector de centelleo y se registran las cuentas en una escala portátil, bastando solo unos minutos de recuento para obtener la información con la exactitud requerida.

Por otra parte, el trabajo “Identificación de la incertidumbre en el proceso estocástico de caudales medios en el río Fonce (San Gil – Santander)” desarrollado por Torres. K, Rivera. M, Fuentes. J, León. M, pretende demostrar que el movimiento del agua del río Fonce interpretado como errático en los valores medios de caudales en la estación hidrológica del IDEAM con sede en San Gil (Santander) es un problema de percepción y realmente su tipificación como proceso estocástico tipo Wiener puede obedecer más a los márgenes de incertidumbre que generan los instrumentos de medición y no tanto a la naturaleza errática del comportamiento del río. El proceso se inicia con la compilación de los valores medios de caudales del río seguido de la consideración de 2 casos: la inclusión y la no inclusión de la incertidumbre para posteriormente plantear los espacios muestrales, los eventos (Caudales bajos, medios bajos, medios y altos), las sigmas algebraicas, los espacios medibles, los espacios de probabilidad, las variables aleatorias y finalmente el proceso estocástico. Esta investigación conlleva a identificar los errores instrumentales en los aforos de caudales para el caso del molinete; además, que la construcción de con valores quincenales de caudales medios del río Fonce un proceso estocástico es fundamental considerar la incertidumbre y a pesar de las dificultades que estos presentan pueden ser sometidos a la interpretación estocástica.

Otro estudio sobre la medición en laboratorio de la capacidad de infiltración en suelos mediante un simulador de lluvia permite la revisión de la infiltración como fundamental en el proceso de relación lluvia-escorrentía y en este caso los problemas de diseño y predicción asociados a la dimensión y operación de obras hidráulicas. Para tal efecto se desarrolló un simulador portátil con el objetivo de medir in situ la capacidad de infiltración logrando diseñar e implementar el procedimiento experimental para la determinación en laboratorio de la capacidad de infiltración, así mismo los valores ajustados del modelo de Horton muestran que el procedimiento en laboratorio es comparable a sus resultados a la experimentación in situ. Considerándose que el procedimiento descrito podrá ser aplicado para futuros análisis de la alteración de la capacidad de infiltración producto de los incendios forestales.

Así mismo, en el trabajo realizado por la Universidad Nacional, (2009), sede Medellín sobre la restauración del cauce quebrada el Chumbimbo se ejecuta el modelamiento hidráulico del sector ADEMINAS-INGEOMINAS en el tramo de estudio; primeramente se hace el levantamiento topográfico (tipo altimétrico) que incluye el levantamiento de las estructuras hidráulicas seguido de la caracterización

de sedimentos por medio del conteo de piedras para obtener la rugosidad del canal. A partir de la información obtenida y los caudales de diseño por el estudio hidrológico mediante la implementación del Hec-GeoRas 4.1.1 y Hec-Ras 4.0 se construyeron las secciones transversales y se simula el tránsito de la corriente en el canal para diferentes periodos de retorno. En el caso se proponen varias intervenciones en el cauce de la quebrada El Chumbimbo con el fin de controlar y solucionar las problemáticas tales como: controlar la degradación del lecho utilizando estructuras para el control del gradiente, controlar la erosión de las orillas, para ello se implementa un tipo de gavión anfíbio denominado geocolchon, utilizado principalmente en la protección de las orillas en zonas donde el flujo genera alta socavación, controlar la degradación del lecho en el sector de INGEOMINAS empleando presas intermedias que permitan controlar la pendiente del cauce en este tramo. Para su efecto se presentan las siguientes alternativas: Diseño de disipadores en saltos y pozos, diseño de la protección para las bancas, redimensionamiento del box culvert de la carrera 80, redimensionamiento de presas en INGEOMINAS, entre otros. Cuyo modelamiento hidráulico considera el diseño de los saltos y pozos, la rugosidad de las paredes del canal con el geocolchon, la ampliación del box culvert y el diseño de las presas en INGEOMINAS.

Es a partir del análisis y evaluación del transporte de sedimentos en cuencas mediterráneas (aplicación a la rampla de Albuñón, Cartagena) realizado por García. R, (2012) se hace una ampliación de la información de los procesos que tienen lugar durante el movimiento del flujo en el seno de un cauce natural, como son los procesos de erosión, transporte y sedimentación, para lo que debe definir una adecuada morfología de cauce, una correcta granulometría, en cada avenida en los distintos periodos de retorno, esto permitirá obtener unos valores, próximos a una realidad que se sabe tridimensional, donde la aplicación de programas unidimensionales como Hec-Ras, ya empiezan a suponer una desventaja en la modelación de los fenómenos que intervienen en el movimiento de un fluido. El objetivo del proyecto es analizar para diferentes formulaciones de arrastre de sedimentos, la evolución de la solera del cauce, en los últimos 11 km, teniendo en cuenta las progresiones de los procesos de erosión, transporte y sedimentación, que para diferentes periodos de retorno, la avenida del diseño es capaz de ocasionar; y posteriormente elegir las ecuaciones a aplicar. Realizado el análisis entre las diferentes ecuaciones se observa que la ecuación de Meyer Peter & Müller, es la formulación que produce resultados más próximos a los valores medios, en el transporte de sedimentos, comparada con el resto de las formulaciones, para los periodos de retorno seleccionados.

Es el transporte de sedimentos en el cauce que genera colmatación, socavación y/o

reducción en el canal del río dado que los sedimentos presentes se van depositando aguas abajo produciéndose de esta manera diferentes inconvenientes tales como: modificación del cauce punto importante en la hidráulica fluvial, construcción de obras civiles y/o afectación en los bancos (OBRAS FLUVIALES, 2014). Este transporte presentado en los sedimentos son de naturaleza continua y los efectos normalmente se reflejan aguas abajo; además, estos son influenciados por la intensidad y duración de la lluvia, la pendiente, el uso de la cuenca, la cobertura vegetal, el tipo de suelos y las actividades humanas de la zona. A esto se le suman otros factores como: geomorfología de la corriente, localización, características del flujo, características del material de lecho y los bancos, profundidad, tipo y diámetro del sedimento, entre otros. (UNICAUCA, 2016). Son los que debido a su existencia generan mayor influencia en los procesos de erosión, sedimentación y transporte que se reflejan en el río La Plata.

Por consiguiente, se destaca que a partir de los diferentes estudios e investigaciones es posible evidenciar que se han dado las fórmulas que permiten encontrar las tasas de sedimentos pero el funcionamiento de las mismas en otros estudios es lo que ha hecho que algunas de ellas sean aceptadas y que sean las mediciones de campo las que jueguen un papel fundamental en el factor proceso y tiempo; por tanto, en las condiciones naturales los factores que afectan el transporte de sedimentos que se encuentren en el cauce son diversos que hacen requerimientos para que sean detallados y analizados bajo criterios específicos. Por otra parte Posada & Montoya en el año 2000 presentan su estudio sobre la capacidad del transporte de sedimentos en cuencas con información escasa donde evalúan la literatura y el gran número de metodologías que existen para realizar la estimación de la capacidad de una corriente para transportar sedimentos y la necesidad de una gran cantidad de registros simultáneos de caudal líquido y sólido, permitiéndose de esta manera encontrar el método más apropiado. Dando como resultado de este estudio el desarrollo de un nuevo método para el cálculo de carga en suspensión y material del lecho cuya información proviene de las corrientes del departamento de Antioquia en la zona andina colombiana, donde el principal problema consiste en la estimación de la descarga de los sedimentos en una corriente y la necesidad de obtener información para efectuar adecuada razón ante los procesos fluviales, el diseño hidráulico, entre otros requerimientos.

Sin embargo, para dar continuidad es fundamental prestar atención a los procesos dados por el transporte de sedimentos y como ejemplo se tiene el “Estudio de consultoría de las obras de protección sobre la margen izquierda aguas abajo del río Grita, para impedir la erosión en la zona urbana del municipio de Puerto Santander” donde se evidencia que uno de los factores que contribuye al

desbordamiento corresponde al represamiento del río como producto de la acumulación de la gran cantidad de sedimentos haciendo necesaria la revisión de sus propiedades y características. En dicho estudio se denomina barras a los depósitos de los sedimentos que han sido transportados y que se van conformando junto a las orillas o dentro del cauce del río La Grita y la conformación del cauce meándrico del río cerca de la desembocadura del río Zulia depende de los altos valores del caudal en las crecidas, la poca pendiente en el tramo final del thalweg y la disponibilidad de los sedimentos que transporta. Cuya problemática para el caso del municipio de Puerto Santander refiere a que en años anteriores la Zona Urbana del Municipio, quedaba ubicada sobre el costado del lado izquierdo en la finalización del último Meandro del Río La Grita, como allí se construyeron una serie de Espolones posiblemente este proceso ocasionó un represamiento a la entrada del Cuello de ese Meandro dando como resultado una gran deposición de Sedimentos Formando Barras Longitudinales marginales que rompieron el Cuello del Meandro.

A nivel local en el municipio de Mutiscua, se mencionan algunos estudios que se han llevado a cabo:

El estudio de factibilidad técnico económico para el montaje de un aserradero de mármol en Mutiscua realizado por CORPONOR en el año de 1987 incluye las condiciones y los requerimientos para su desarrollo técnico-productivo, presentando la mineralogía y el estudio de mercado del mármol a nivel nacional e internacional.

Para el año 2000 Lizarazo, B. y en su nombre COORPONOR desarrollan el “ordenamiento y reglamentación del uso del recurso hídrico en la microcuenca Canutos, Municipio de Mutiscua donde se logra la caracterización y zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgos para diferentes parámetros como lo son: fenómenos de remoción en masa, inundaciones y sismicidad, y así determinar áreas con potenciales problemas para desarrollar las diferentes actividades en cada uno de los municipios de cada cuenca.

Gómez H. (1997), llevo a cabo la Zonificación ambiental base para un proceso de planificación del medio ambiente en las microcuencas de las quebradas El Chorrerón y Las Pavas del Municipio de Mutiscua, del cual se obtuvo la elaboración de los mapas representativos del uso del suelo dando de esta manera la priorización de los programas de manejo de estas dos microcuencas.

Así mismo, Cupper, H. (2007) realizó la Formulación de los objetivos de calidad para los cuerpos de agua receptores de los vertimientos líquidos de los cascos urbanos de los municipios de Toledo, Labateca, Santiago, San Cayetano, Salazar, Mutiscua,

Cucutilla y Chitagá,) con el fin de entregar la clasificación de los cuerpos de agua de acuerdo a los criterios de calidad establecidos por el decreto 1594 de 1984, además se determinaron los usos y expectativas de la calidad el recurso hídrico en los tramos seleccionados en los municipios antes mencionados definiendo el criterio y los objetivos de calidad para un periodo de proyección de 5 años de acuerdo a la metodología mesoca.

En el caso del Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Zulia: Inventario detallado y caracterización de los usuarios y usos del recurso hídrico en los minidistritos de riego y en el acueducto de la vereda La Caldera, en el municipio de Mutiscua ejecutado por Alvarado, M. (2009) permitió realizar el diagnóstico de la cuenca hidrográfica del río Zulia, siendo este un elemento trascendental de tipo técnico y científico, útil para la definición integral del territorio y evidenciar su realidad.

Mientras que Gelvez, R. (2009) realizó el Inventario detallado y caracterización de los usuarios y usos potenciales del recurso hídrico en la cuenca del río Zulia, en las veredas Tapaguá, Valegrá, La Plata, Las Mercedes, Sabana Larga, San José, La Laguna y el casco urbano del municipio de Mutiscua, cuyo estudio conlleva a la elaboración de informes de cumplimiento resultado de la evaluación de los programas de uso eficiente y ahorro del agua.

Por otra parte en el 2010 Gélvez, R. bajo la subdirección de Recursos Naturales y el grupo técnico POMCH realiza el inventario detallado y la caracterización de usuarios y usos del recurso hídrico en los acueductos y minidistritos de riego en los municipios de Mutiscua y Bochalema, dentro de la fase de diagnóstico en el proceso de elaboración del plan de ordenación de la cuenca hidrográfica del río Zulia, obteniéndose la identificación de la situación ambiental de la cuenca con el fin de establecer las potencialidades, conflictos y restricciones de los recursos naturales renovables.

Para el año 2010 Rojas, E J. & Rojas, E G. desarrollaron la implementación del plan de manejo ambiental con énfasis en labranza mínima, pesticidas y abonos orgánicos, objeto principal de la alianza estratégica de ASPROMUSIL (Asociación de Pequeños y Medianos Productores de Leche de Mutiscua y Silos), además se realizó el Plan de administración y manejo ambiental del área estratégica Laguna Colorada, municipio de Mutiscua, Norte de Santander desarrollado por Valero, L. (2006) cuyo plan conlleva a la orientación de las estrategias en pro de la conservación de dicha zona puesto que es el nacimiento principal de la quebrada el Chorrerón de la cual proviene el acueducto municipal, por otra parte para Solano, F. et al (1998) la Evaluación del impacto ambiental causado por el uso de

agroquímicos en el río La Plata, municipio de Mutiscua, trajo consigo la revisión de la influencia negativa que tienen los agroquímicos sobre la calidad del agua.

Por consiguiente y con base en la información anterior, se evidencia que no se han realizado investigaciones sobre la modelación del transporte de sedimentos en el río La Plata en el Municipio de Mutiscua, por lo tanto se considera fundamental para conocer las características, los fenómenos físicos y su impacto en la cuenca hidrográfica; es por esto que durante el 2016-1 se dio inicio al proyecto en el semillero de investigaciones ambientales Agua, Aire y Suelo (SIAAS) como opción de trabajo de grado, se obtuvo el primer avance mediante la presentación en el II encuentro departamental de Semilleros Redcolsi con la ponencia denominada “IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO LA PLATA, MUTISCUA- NORTE DE SANTANDER” en el instituto de educación superior ISER Pamplona.

6.3. MARCO TEÓRICO

Una cuenca hidrográfica es una unidad morfológica integral, que se define en un territorio donde las aguas superficiales convergen hacia un cauce o unidad natural delimitada por la existencia de la divisoria de las aguas, las cuales fluyen al mar a través de una red de cauces principales. En una cuenca hidrológica, además se incluye toda la estructura hidrogeológica subterránea del acuífero como un todo, conformando un sistema integral, constituyendo un conjunto de componentes que están conectados e interactúan formando una unidad. La estabilidad y permanencia de todos sus componentes estructurales son propiedades y formas de comportamiento del sistema. (Gaspari, Vagaría, Senisterra, Delgado, & Besteiro, 2013)

Una cuenca hidrográfica se puede caracterizar por la morfología, la naturaleza del suelo o la cobertura vegetal y uso del suelo (Henaó, J.E, 1988) Los estudios a realizar sobre la cuenca se inician con la determinación de las características morfométricas puesto que proporcionan la descripción física y espacial que permite concluir sobre las características de la zona a partir de la geometría. Así mismo, los parámetros de forma, relieve y red de drenaje son indicadores morfométricos destinados a determinar la influencia de los límites de la cuenca en relación al movimiento y captación de agua lluvia. (López Cadenas de Llano, 1988).

Dentro de los parámetros de forma se tiene el perímetro que corresponde a la línea que envuelve la cuenca hidrográfica en la dirección de la divisoria de aguas, la

longitud axial que indica la distancia entre el punto más lejano de la cuenca y la desembocadura; siendo el ancho promedio el que relaciona la superficie de la cuenca y la longitud axial. Sumado a esto se tiene el área que se considera el parámetro más importante y es la superficie encerrada en la divisoria de agua que según el Centro Iberoamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Suelos en Carrión 2014 se generó el sistema de clasificación: sistema hidrográfico (+ de 3000 Ha), cuencas (60mil a 300mil Ha), Subcuenca (10mil a 69 mil Ha) y microcuencas (< a 10mil Ha). Así pues, los parámetros adimensionales son: el factor forma que indica cómo se regula la concentración del escurrimiento superficial y el coeficiente de compacidad de Gravelius (K_c) donde se relaciona el perímetro de la cuenca con el perímetro de un círculo de área de la cuenca. (Gaspari, Vagaría, Senisterra, Delgado, & Besteiro, 2013), donde el valor que adquiera el coeficiente (Tabla 1) indica la forma de la cuenca.

Tabla 1. Tiempos de concentración para las fuentes hídricas en función del K_c

| Coef. de compacidad | Rango | Forma adquirida por la cuenca en F(x) de K_c |
|---------------------|-------------|--|
| K_{C1} | 1.0 – 1.25 | Redonda a oval redonda |
| K_{C2} | 1.25 – 1.50 | Oval redonda a oblonga |
| K_{C3} | 1.50 – 1.75 | Oblonga a rectangular oblonga |

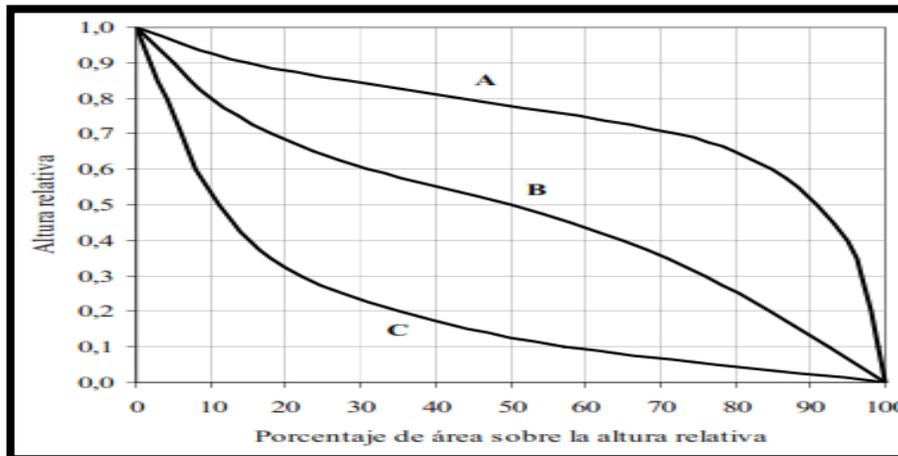
Fuente: Gaspari. F et al, 2013.

Por consiguiente, K_c cuando tiende a 1 tiende a ser redonda y la peligrosidad ante las crecidas es mayor porque las distancias relativas de los puntos de la divisoria con respecto a uno central, no presenta diferencias mayores y el tiempo de concentración se hace menor, por lo tanto mayor será la posibilidad de que las ondas de crecidas sean continuas.

Por otra parte los parámetros de relieve incluyen la curva hipsométrica y la pendiente media de la cuenca principalmente.

La curva hipsométrica en un área (Gráfico 1) en primera instancia fue sugerida por Langbein et al (1947) con objeto de entregar información sobre la altitud de la cuenca (msnm) representándose de esta manera gráficamente la distribución de la cuenca vertiente por tramos de altura. Así mismo, Gaspari et al (2013) define la curva hipsométrica como la representación de área en función de la elevación; de igual forma, Strahler (1952) muestra que está permite conocer la distribución de masa de la cuenca desde arriba hacia abajo.

Gráfico 1. Curva hipsométrica según la teoría.



Fuente: Strahler, 1952. en: Gaspari. F et al, 2013

El segundo parámetro de relieve que corresponde a la pendiente media (Ecuación 1) de la cuenca según López Cadenas de Llano (1998) en Gaspari (2013) se refiere al proceso de degradación al que se somete al igual que el Q máximo, estos están influenciados por la configuración topográfica, puesto que el poder erosivo se manifiesta en mayor o menor grado de acuerdo al grado de pendiente. (Tabla 2)

$$P_m = 100 * \left(\frac{H * L}{A} \right) \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde, P_m = Pendiente media (%), H = Equidistancia entre curvas medidas (Km), L = Longitud de las curvas de nivel (Km), A = Superficie (Km²)

Tabla 2. Relieve en función de la pendiente media (%)

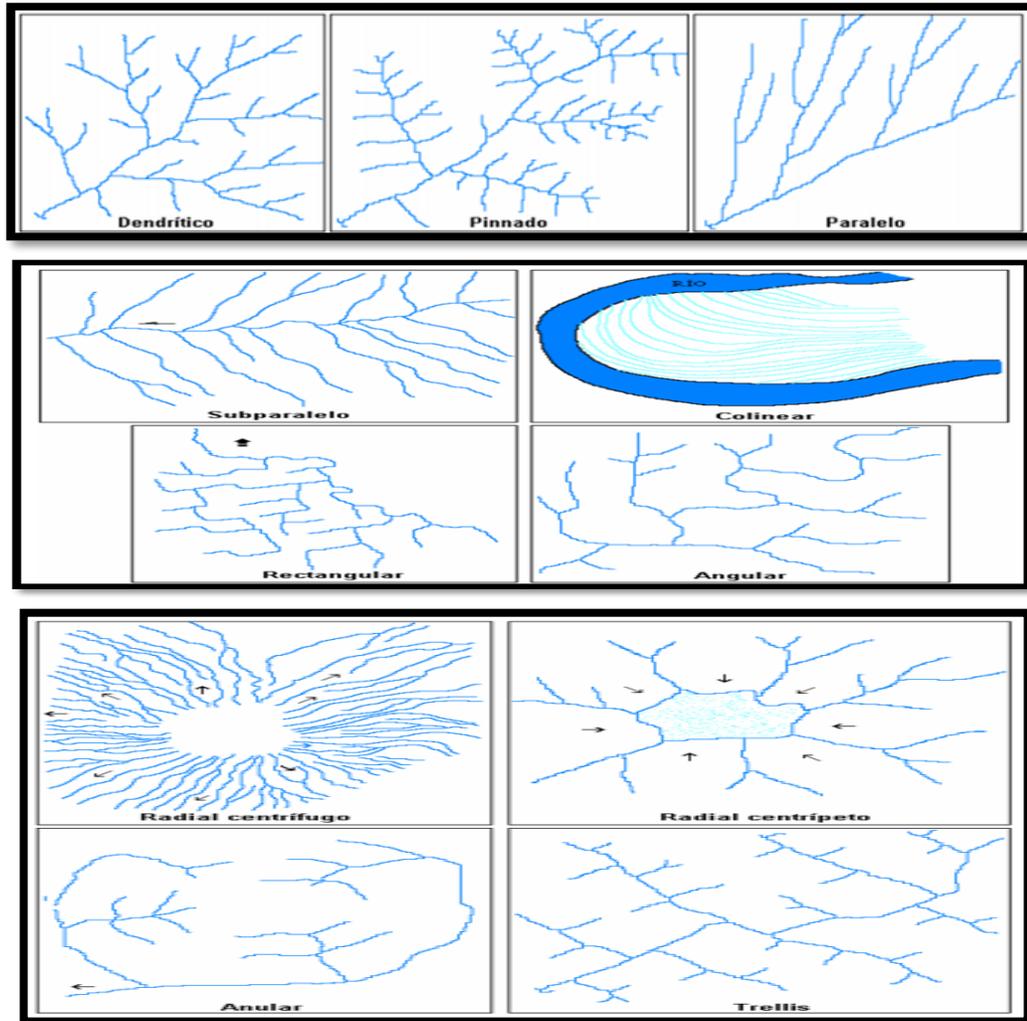
| Pendiente media (%) | Relieve |
|---------------------|---------------------------|
| < 0.5 | Muy plano |
| 0.5 – 1 | Plano |
| 1 – 3 | Suave |
| 3 – 12 | Lomadas |
| 12 – 20 | Accidentado o pronunciado |
| 20 – 50 | Muy fuerte |
| 50 – 75 | Escarpado |
| > 75 | Muy escarpado |

Fuente: López Cadenas, 1998 en: Gaspari. F et al, 2013

Con respecto a los parámetros de drenaje en primera instancia se tiene la densidad de drenaje que implica la relación entre la suma de longitudes de todos los cursos de agua que drenan por la cuenca en función del área de la misma. Así pues, la densidad de drenaje fue establecida por Horton. (López Cadenas de Llano, 1998 en

Gaspari et al., 2009). Los patrones de drenaje erosionables se presentan en la imagen 2; donde los sistemas de drenaje están definidos por las características de la cuenca: área, topográfica, propiedades físicas del suelo, entre otros.

Imagen 2. Patrones de drenaje.



Fuente: Londoño. C, 2001

Así mismo, la longitud del cauce principal está definida como la sumatoria de las longitudes de todos los cursos de agua que conforman el cauce principal y drenan por la cuenca. Por otra parte, se tiene la pendiente media del cauce que es representada en porcentaje y se deduce a partir del desnivel topográfico sobre el cauce principal y longitud de este.

Por otro lado, el tiempo de concentración representa el tiempo en que tarda el flujo superficial en contribuir al caudal de salida, desde el punto más alejado hasta la desembocadura de la cuenca (Chow & Mays., 1994); así también, el tiempo de

concentración depende en gran medida de la forma de la cuenca según lo referencia Cadenas de Llano y Mintegui Aguirre, (1987) en Gaspari (2013). Por lo tanto, Para su determinación matemáticamente existen varias ecuaciones entre las que se destacan las mostradas en la Tabla 3.

Tabla 3. Principales ecuaciones para determinar el tiempo de concentración.

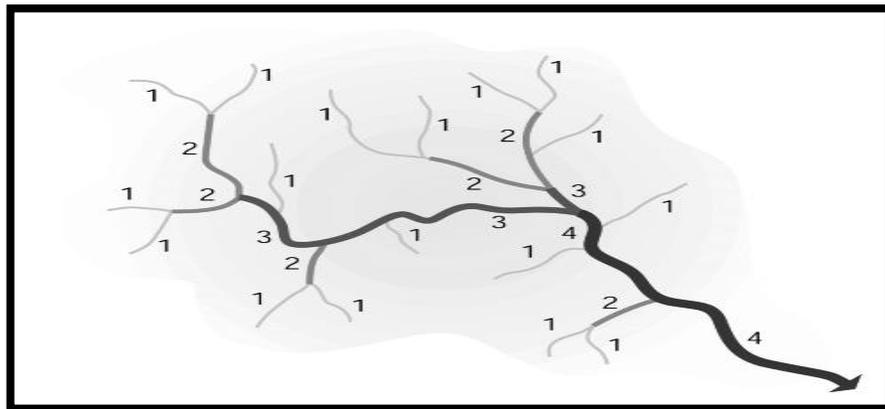
| MÉTODO | ECUACIÓN | DESCRIPCIÓN |
|--------------------|---|---|
| Bransby – Williams | $tc = 14,6LA^{-0,1}S^{-0,2}$ | tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) |
| Kirpich | $tc = 0,02L^{0,77}S^{-0,385}$ | tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (m) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) |
| Venturas – Heras | $tc = a \frac{A^{0,5}}{S}$ | tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente media del cauce principal (%) A= Área de la cuenca (Km ²) L= Longitud del cauce principal (Km) a= Alejamiento medio, $a = L/A^{0,5}$ Siendo 0,05 ≤ a ≤ 0,5 |
| Passini | $tc = a \frac{[(AL)^{1/3}]}{S^{0,5}}$ $a = L/\sqrt{A}$ | tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²) siendo 0,04 ≤ a ≤ 0,13 a= alejamiento medio |
| Giandotti | $tc = \frac{4\sqrt{A} + 1,5L}{25,3\sqrt{SL}}$ | tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km) A= Área de la cuenca (Km ²) siempre que $L/3.600 \leq tc \leq (L/3.600 + 1,5)$ |
| Témez | $tc = 0,3 \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$ | tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) L= Longitud del cauce principal (Km) |
| California | | tc= Tiempo de concentración (minutos) L= Longitud del cauce principal (Km) |

| | | |
|------------------|---|---|
| Culvert Practice | $tc = 60 \left[\frac{0,87075L^3}{H} \right]^{0,385}$ | H= diferencia del nivel entre la divisoria de aguas y la salida (m) |
| Clark | $tc = 0,335 \left[\frac{A}{S^{0,5}} \right]^{0,593}$ | tc= Tiempo de concentración (horas) S= Pendiente promedio del cauce principal (m/m) A= Área de la cuenca (Km ²) |

Fuente: Ibáñez. S, Moreno. H & Gisbert. J, 2011.

Con respecto al número del cauce se hace referencia al número que tiene estrecha relación con la cantidad de ramificaciones de la red de drenaje. Donde el concepto dado por Scumm (1956) permite asignarle el orden 1 a todos los cauces que no tienen tributarios y la unión de 2 cauces de orden uno dan continuidad al orden inmediatamente superior; en el caso de dos de diferente orden da origen a otro orden de igual orden que el mayor. (Imagen 3) El orden de la cuenca está definido por el orden más elevado del cauce principal. Se ordenan y numeran los afluentes desde su nacimiento hasta su desembocadura.

Imagen 3. Orden de los cursos de agua según Horton.



Fuente: USDA, 2007. En: Gaspari. F et al, 2013

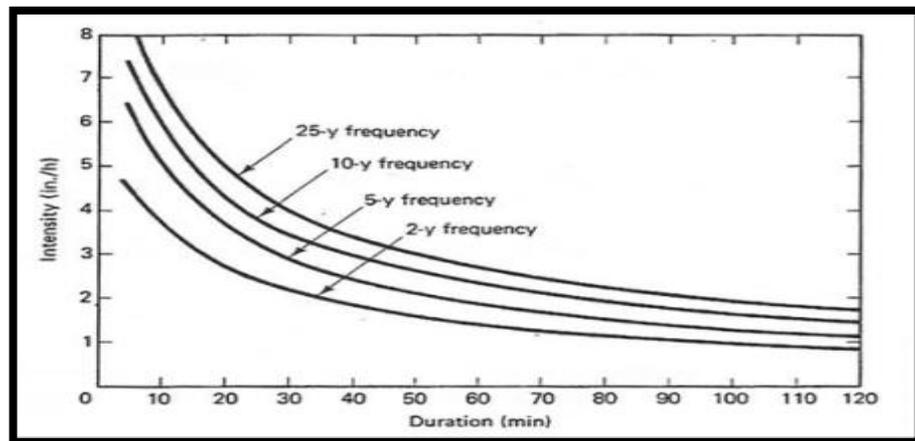
Según Londoño. C, 2001, los cursos de agua se clasifican en: perennes cuando la corriente con agua se presenta todo el tiempo y el nivel de agua mantiene alimentación continua y nunca desciende debajo del lecho del río. El curso de agua puede ser intermitente cuando la corriente escurre en estaciones de lluvia y se secan durante el verano; además, el nivel de agua subterránea se conserva por encima del nivel del lecho del río sólo en la estación lluviosa. En verano el escurrimiento cesa, u ocurre solamente durante o inmediatamente después de las lluvias. También esta clasificación puede ser de tipo efímero puesto que estos existen durante o inmediatamente se presenta el periodo de precipitación y sólo

transportan escurrimiento superficial. El nivel de agua subterránea se encuentra siempre debajo del nivel inferior del lecho de la corriente; no hay, por lo tanto, posibilidad de escurrimiento subterráneo.

Con respecto, a las curvas de Intensidad - Duración - Frecuencia según lo indicado por Pizarro. R et al (2013) estas son la representación gráfica de la relación existente entre la intensidad y la duración de un evento máximo de lluvia, asociado a la frecuencia o el periodo de retorno donde cada periodo de retorno genera una curva diferente (Nanía, 2003; Pizarro et al 2013). Para Témez (1978) en Pizarro (2013) las curvas IDF son las curvas que resultan de unir los puntos representativos de la intensidad media en intervalos de diferente duración y correspondientes todos ellos a una misma frecuencia o periodo de retorno.

Una definición más detallada es la dada por Mintegui. y López 1990, quienes señalan que las curvas IDF representan a las duraciones en las abscisas y a la altura o intensidad de precipitación en las ordenadas. Cada curva representada corresponde a una frecuencia (o periodo de retorno), de tal forma que las gráficas de estas curvas (Gráfico 2) representan la intensidad media en intervalos de diferente duración, correspondiendo todos los puntos de una misma curva a un idéntico periodo de retorno.

Gráfico 2. Curvas IDF.



Fuente: Ponce, 1989. En: Pizarro. R et al. 2013

En la construcción de las curvas IDF el método relaciona simultáneamente la intensidad (Ecuación 2), la duración y el periodo de retorno en una familia de curvas mediante la ecuación que se presenta a continuación:

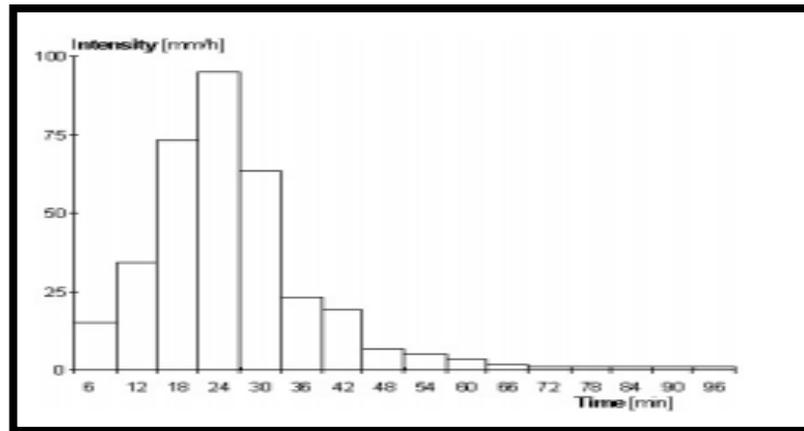
$$I = \frac{KT^m}{(d+c)^n} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde, K , m , n y c = son constantes que se calculan mediante un análisis de correlación lineal múltiple, L y d = corresponden a la intensidad de precipitación y duración, respectivamente.

Chow et al (1994), plantean 2 formas de trabajar las curvas. La primera, utiliza un análisis de frecuencia de la lluvia, considerando para ello una función de distribución de probabilidad de valor extremo como la función de Gumbel. El segundo método, expresa las curvas IDF como ecuaciones, con el objeto de que la lectura de la intensidad de lluvia se haga con una gráfica.

De manera general, hietograma proviene del griego Hietos – lluvia, es un gráfico que expresa precipitación en función del tiempo. En la ordenada se presenta la precipitación caída (mm) o la intensidad de precipitación (mm/hora). Según (Sanchez, 2008) es un gráfico de barras que denominamos histograma (Gráfico 3) aunque este también puede ser representado mediante un gráfico de línea; este puede mostrar un día, meses, años o una tormenta concreta en el tiempo (Abscisas). Por otra parte, para su elaboración, si se trata de un hietograma mensual o anual, bastará con representación de datos diarios pero si en su defecto es un hietograma para un día o unas horas de duración, se hace necesario implementar una banda de pluviógrafo para leer la precipitación de caída en los intervalos elegidos.

Gráfico 3. Hietograma.

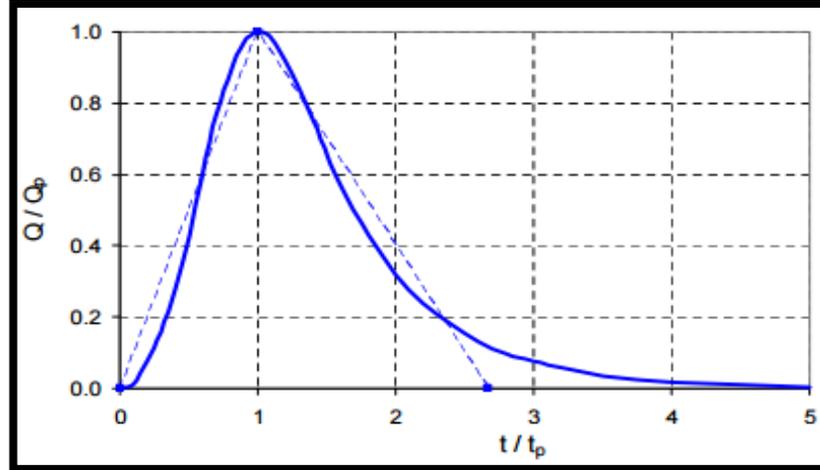


Fuente: Sánchez. J, 2008.

Con respecto a los Hidrogramas (Gráfico 4) estos se representan mediante un triángulo que proporciona el caudal punta (Q_p), el tiempo base (t_p) a partir de las ecuaciones 3, 4 y 5 en función de la duración de determinada precipitación donde el Hidrograma triangular del sistema de conservación de suelos es resultado de las

ecuaciones obtenidas de Hidrogramas de crecida provocados por precipitaciones cortas y uniformes en numerosas cuencas.

Gráfico 4. Hidrograma del Servicio de Conservación de Suelos (SCS).



Fuente: SCS en, Sánchez. J, 2016

$$t_p = 0.5 * D + t_r \approx 0.5 * D + 0.6 t_c \quad \text{Ecuación 3}$$

$$t_b = 2.67 t_p \quad \text{Ecuación 4}$$

$$Q_p = \frac{P * A}{1.8 * t_b} \quad \text{Ecuación 5}$$

Donde, t_p = tiempo de punta (horas), D = Duración de la precipitación neta (horas), t_r = tiempo de retardo, Log (horas), t_c = tiempo de concentración (horas), t_b = tiempo base en horas, Q_p = caudal de punta (m^3/seg), P = precipitación neta (mm), A = superficie de la cuenca (Km^2).

Para el caso, el coeficiente 2.67 (Tabla 4) es una proporción empírica del Servicio de Conservación de Suelos (SCS) a partir de los valores propuestos para ese factor por Wanielista, 1997 en Sánchez (2016).

Tabla 4. Coeficiente tiempo base (t_b)

| Lugar | Valor del coeficiente | Ecuación que relaciona |
|--------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Zona urbana, pendientes pronunciadas | 1.25 | $t_b = 2.25 * t_p$ |
| Promedio SCS | 1.67 | $t_b = 2.67 * t_p$ |

| | | |
|--------------------------|------|--------------------|
| Mezcla rural/urbano | 2.25 | $t_b = 3.25 * t_p$ |
| Rural, colinas | 3.33 | $t_b = 4.33 * t_p$ |
| Rural, pendientes suaves | 5.5 | $t_b = 6.5 * t_p$ |
| Rural, muy plano | 12 | $t_b = 13 * t_p$ |

Fuente: SCS. Wanielista, 1997 en, Sánchez. J, 2016

El análisis granulométrico según (Rosario, Nadia, Michel, & Alejandra, 2012) es la medición y gradación que se lleva a cabo de los granos de una formación sedimentaria, de los materiales sedimentarios y de los suelos con objeto de realizar análisis, tanto de origen como de sus propiedades mecánicas y el cálculo de abundancia de cada uno de los tamaños previstos en la escala granulométrica. De manera general la granulometría por tamizado es un proceso mecánico mediante el cual son separadas las partículas en sus diferentes tamaños cuyo procedimiento indica el uso de los tamices en orden decreciente.

A partir de este análisis granulométrico es posible efectuar la clasificación mediante sistemas como AASHTO o USCS y su importancia radica en los criterios de aceptación de suelos que son requeridos en bases, bases de carreteras, presas de tierra, diques, drenajes, entre otros. (Jaramillo, 2006).

En función de la muestra, la ejecución del cuarteo y la obtención de la muestra a tamizar es posible determinar la clasificación de las partículas (ver tabla 5) según el tamaño que estas presenten.

Tabla 5. Numeración y abertura de los tamices / tipo de suelo

| Tamiz (ASTM) | Tamiz (Nch) (mm) | Abertura real (mm) | Tipo de suelo |
|--------------|------------------|--------------------|---------------|
| 3" | 80 | 76.12 | GRAVA |
| 2" | 50 | 50.8 | |
| 1 1/2" | 40 | 38.1 | |
| 1" | 25 | 25.4 | |
| 3/4" | 20 | 19.05 | |
| 3/8" | 10 | 9.52 | |
| N° 4 | 5 | 4.76 | ARENA GRUESA |
| N°10 | 2 | 2 | ARENA MEDIA |
| N°20 | 0.9 | 0.84 | |
| N°40 | 0.5 | 0.42 | |
| N°60 | 0.3 | 0.25 | ARENA FINA |
| N°140 | 0.1 | 0.105 | |
| N°200 | 0.08 | 0.074 | |

Fuente: Espinace. R, 1979. en Jaramillo. 2006.

En otro apartado, se tiene que la hidráulica fluvial trata en su estructura la morfología fluvial considerando la clasificación de los ríos, su morfología y características; además de la clasificación del transporte de sedimentos y el caudal sólido. No obstante, según (Ibáñez. L, 2016) se denomina sedimento a las partículas procedentes de las rocas o suelos y que son acarreadas por las aguas que escurren. Todos estos materiales, después de cierto acarreo finalmente son depositados a lo largo de los propios cauces, en lagos, en presas de almacenamiento, en la planicie y hasta en el mar.

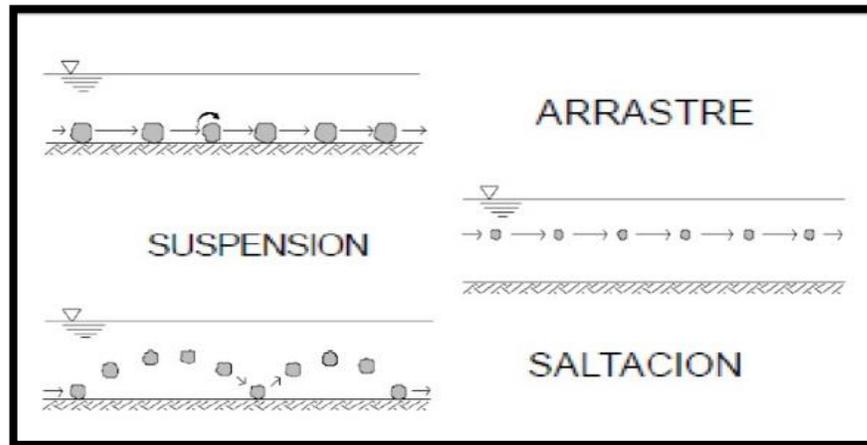
Estos sedimentos pueden proceder de una fuente principal como es el caso de los suelos y las rocas que se encuentran en la cuenca, siendo los principales agentes de erosión y transporte el agua y el viento. Por consiguiente, las fuentes fuertemente pronunciadas son las fuentes naturales y artificiales. Las primeras se refieren a la erosión de la superficie del terreno, erosión del cauce principal y sus tributarios y deslizamientos naturales, siendo los segundos los que corresponden a la destrucción de la vegetación, sitios de construcción (vías de comunicación, ciudades, etc), explotación de minas, desechos urbanos e industriales, entre otros.

El material transportado en el caso de los canales el flujo está formado sólo por agua, mientras que en los ríos este flujo refiere a la combinación de una fase líquida o caudal líquido y una fase sólida o caudal sólido cuya diferencia radica en que los ríos interactúan con el ecosistema en el que se encuentran vinculados.

De forma general los flujos en ríos y canales suelen ir acompañados por el transporte de sedimentos, el cual puede ser en suspensión y transporte de depósitos arrastrados por la corriente, donde este último es dado en el área cercana al fondo y es un factor importante en la modelación del lecho de un río. En aguas de corrientes naturales, los procesos de erosión y sedimentación se alternan constantemente y caracterizan lo que corresponde al balance de escombros del tramo de lecho de río objeto de estudio.

Según Puig. J, 2006, en convenio 996 del 2005, Unicauca (2006) el caudal sólido transportado por una misma corriente se puede clasificar en función de 2 criterios: Según el modo de transporte y según el origen del material. Por el modo de transporte de una partícula (Imagen 4) puede ser transportada en suspensión (soportada por la turbulencia del flujo), o transportada por el fondo, rodando, saltando o deslizándose. Cuando mayor es la energía del flujo mayor será el diámetro que puede ser transportado en suspensión.

Imagen 4. Formas de transporte del sedimento.

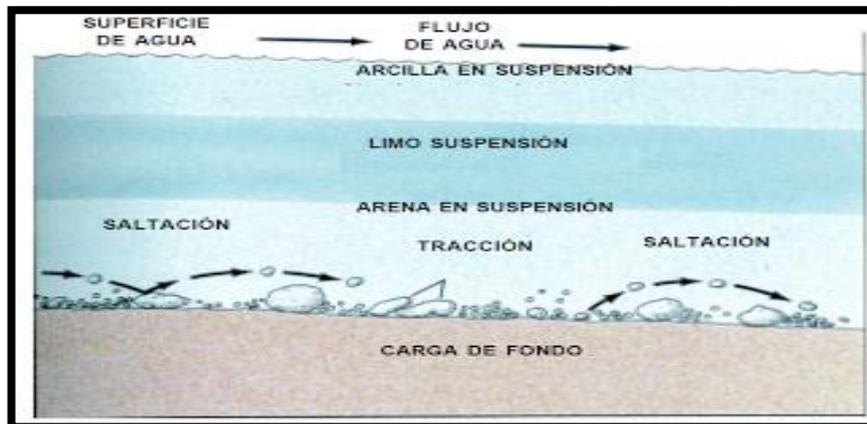


Fuente: Narváez, E. 2011.

Para EOI, (2007) en boletín 68 de la FAO una partícula del lecho puede ser arrancada cuando se supera su umbral movimiento y ser transportada por el fondo hasta el momento en el que, si la energía del flujo se eleva lo suficiente, pueda pasar a ser transportada en suspensión.

Por lo que respecta al origen del material, éste puede proceder del propio lecho del cauce, como ya se ha indicado, o proceder del lavado de las laderas de la cuenca vertiente al cauce. (Imagen 5). En este último caso el material es más fino y se transporta habitualmente en suspensión.

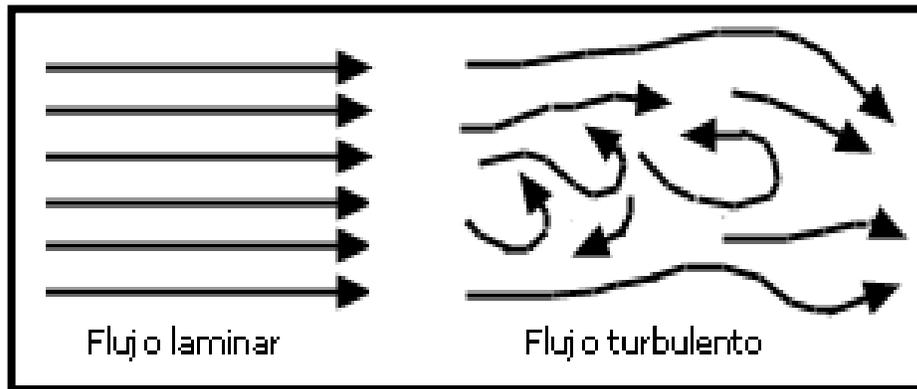
Imagen 5. Formas de transporte del sedimento según el origen del material.



Fuente: Ingeominas, 2001

Por otra parte, Yopez, (2016) dentro de las formas de transporte debe incluirse las dadas según el tipo de flujo: Laminar, turbulento o casi-laminar. (Imagen 6).

Imagen 6. Formas de transporte del sedimento según el tipo de flujo.



Fuente: (Yepez, 2016), 2016.

Sin embargo, EOI, (2007) considera que para el comportamiento de desagüe en canales, el transporte de depósitos arrastrados por la corriente es el componente fundamental. Los sedimentos que se depositan (sedimentación) o transportan (erosión o formación de socavación) pueden, por ejemplo: modificar la sección transversal por la que pasa el flujo o los perfiles de la superficie del agua. Además, se sabe que el transporte de sedimentos modifica la estructura del fondo (formación de ripples o dunas, modificación de la rugosidad).

Así mismo, los sedimentos transportados como materias en suspensión solo son relevantes para el equilibrio de transporte, cuando se depositan y contribuyen a la sedimentación EOI (2007), p.ej., en aguas que fluyen muy despacio o están estancadas. “Los granos de sedimentos que se encuentran en el suelo se ponen en movimiento cuando se excede la tensión de corte crítica del fondo. Se diferencia entre tres posibilidades: Exceso frecuente o permanente: formación de ripples o dunas en el fondo, Exceso solo en casos extremos como marejadas o inundaciones: cambio repentino del fondo, Ningún exceso: depósito del material en suspensión, el fondo puede enlodarse a medio plazo.

El transporte en suspensión puede suponer del orden del 90% o más del transporte sólido total de una corriente. Su importancia es notable en la formación de deltas o, por ejemplo, en el aterramiento de embalses. El transporte de fondo, que normalmente no supone más de un 10% del transporte sólido total, sin embargo es el que mayor influencia tiene sobre la morfología de los ríos y por tanto el que tiene un mayor interés para la ingeniería fluvial. (EOI, 2007)

Según la UNESCO (2010), Documento técnico N° 22, los procesos de erosión y depósito que ocurren en el cauce, están asociados al transporte de sedimentos

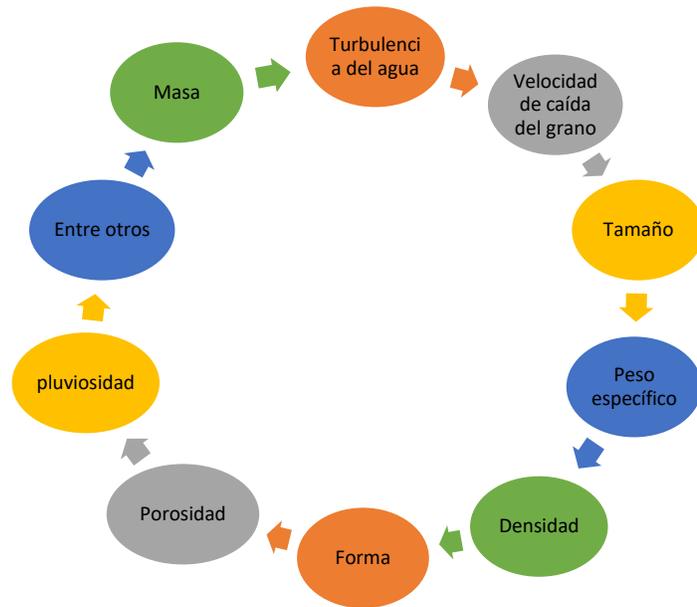
(Ecuación 6) por la acción del flujo, el que puede desarrollarse en forma de arrastre de fondo, en suspensión y como carga de lavado.

$$T_{\text{total}} = T_f + T_s = T_f + T_{sc} + T_{sl} \quad \text{Ecuación 6}$$

Donde, T_{total} = Transporte total, T_f = transporte de fondo, T_s = Transporte en suspensión, T_{sc} = suspensión del cauce, T_{sl} = carga de lavado.

Así mismo, UNESCO (2010) considera que el transporte de fondo es el que está asociado a los cambios morfológicos del lecho. Sin embargo, la forma del transporte del sedimento depende de factores determinantes tales como: tamaño, la masa, la forma del grano y/o la fuerza que actúa. (Ver Gráfico 5)

Gráfico 5. Factores determinantes del transporte de sedimentos.



Fuente: UNESCO, 2010.

La UNESCO (2010), presenta la importancia de las formas del lecho puesto que la velocidad de flujo es un poco más alta que la velocidad crítica, con la que los sedimentos inician movimiento; además, se producen irregularidades en el fondo del canal, estas irregularidades pueden alcanzar una altura aprox. 1/3 de la profundidad de descarga. Existen 3 formas de lecho básicas: ripples, dunas y altidunas.

En la mayoría de los ríos estos discurren sobre lechos granulares en los que dicho material granular fue transportado por la misma corriente del río en el pasado geológico. También puede presentarse el caso en la que los cauces discurren sobre lecho cohesivos, pero en este caso se producen fenómenos erosivos con mayor lentitud. En estos ríos la evolución habitual es hacia un lecho granular.

El material del cauce influye en el transporte de sedimentos por lo cual se consideran dos características importantes: el peso específico y la granulometría.

Cabe destacar el cuarzo, debido a su gran estabilidad, es el mineral que con más frecuencia se presenta en la composición de los sedimentos transportados por el agua. Es por esto que el peso específico relativo de las arenas es similar al del cuarzo $\gamma_s = 2,65 \text{ t/m}^3$. El anterior valor normalmente es empleado en los cálculos ya que varía poco de un cauce a otro.

Por lo que la granulometría se entiende como la distribución de tamaños de las partículas de una muestra. Se evalúan mediante tamizado de la muestra de material y pesando la fracción que pasa un tamiz pero es retenida en el siguiente, más pequeño en tamaño. Cuyo tamaño se refiere a la dimensión D (diámetro), pues se asume una forma de partícula esférica o elipsoidal

De forma general el programa hidrológico Internacional de la UNESCO (2010) para América Latina y el Caribe en su documento técnico N° 22 presenta las principales ecuaciones que son empleadas para realizar el cálculo del transporte de sedimentos no tienen en cuenta la no-uniformidad del material, y han sido comprobadas en diferentes condiciones tanto hidráulicas como sedimentológicas. Algunas de estas ecuaciones son:

La fórmula propuesta por Meyer – Peter y Muller Citado por: UNESCO (2010), en el año de 1948 para el cálculo del transporte de fondo, se obtuvo a partir de un importante número de datos experimentales en un canal de 2 x 2 x 50 metros con material uniforme y mezcla de partículas (los autores usan el diámetro medio aritmético) con diámetros entre 0,4 y 29 mm, pendientes entre 0,0004 y 0,02 y tirantes entre 0,1 y 1,2 metros.

De igual manera, Engelund y Hansen (1967) Citado por: UNESCO (2010), para el cálculo del transporte total se basa en consideraciones teóricas a partir del concepto de balance energético, y verificada con ensayos con sedimentos uniformes, con diámetros entre 0,19 y 0,93 mm.

Van Rijn (1984) Citado por: UNESCO (2010), estimó el transporte de fondo con consideraciones teóricas, asumiendo que el movimiento del material de fondo es dominado por los saltos de las partículas bajo la influencia de las fuerzas hidrodinámicas del flujo y de las fuerzas gravitatorias. Para su verificación se tomaron de la literatura, 130 experimentos en canales de laboratorio con sedimentos uniformes con d_{50} entre 0,2 y 2 mm, profundidades mayores a 0,1 m y números de Froude menores a 0,9. El transporte de fondo por unidad de ancho se define como el producto de la velocidad de las partículas, la altura de los saltos y la concentración de fondo.

Así mismo, Di Silvio (1983) Citado por: UNESCO (2010), obtuvo la relación entre el transporte adimensional con la potencia cúbica de la tensión de corte adimensional, incorporando la ecuación de Strickler-Manning. Fue verificada con datos de campo y laboratorio.

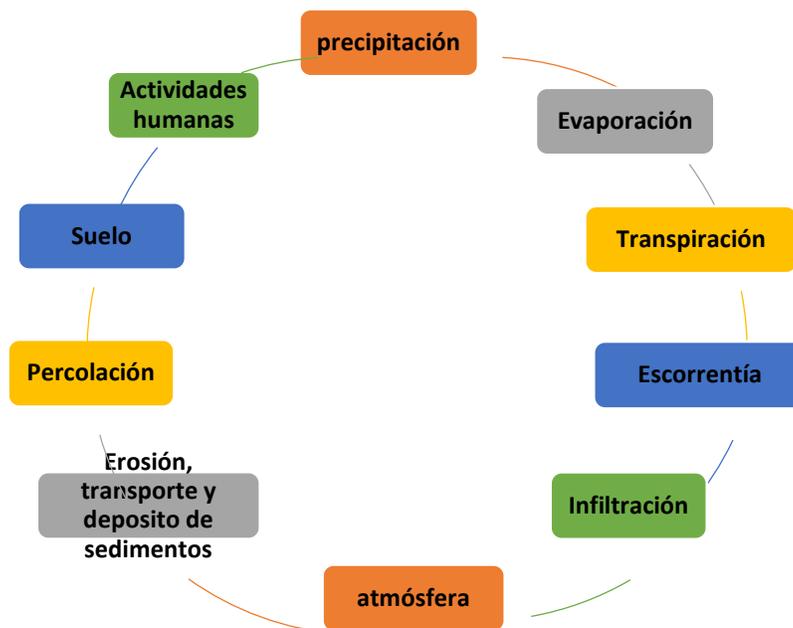
En ríos con pendientes altas, donde los sedimentos presentes en el lecho en general varían entre fracciones de milímetros (arenas finas) y algunos decímetros, las simplificaciones que llevan implícitas las formulaciones tradicionales, son una limitación importante para su aplicación, donde la dinámica morfológica de este tipo de ríos está condicionada por una serie de fenómenos asociados al transporte de la mezcla de sedimentos del lecho (UNESCO, 2010), entre los que pueden destacarse:

- La mayor movilidad intrínseca de las partículas finas, que hace que los sedimentos del lecho sean más gruesos en relación a la composición del material transportado
- El efecto de protección-exposición, que incrementa la movilidad de las partículas más gruesas de la mezcla y disminuye la de las más finas, en relación con la del material uniforme. Este efecto tiende a reducir la diferencia entre la composición del material del lecho y del transportado.
- El efecto de acorazamiento dinámico en la superficie del lecho, produce una protección vertical contra la erosión que puede ser dominante respecto de la protección horizontal indicada antes.
- La infiltración de las partículas finas entre las más gruesas hasta que la porosidad del lecho es saturada.
- La gran variabilidad en las longitudes de “salto” en el transporte de los distintos tamaños de grano.

De manera general el transporte de materiales se presenta en sus diferentes formas de acuerdo a las condiciones y características de la zona de estudio, (Universidad del Cauca. facultad de ingeniería Civil, 2006), por lo tanto, los diferentes procedimientos de muestreo pueden ser clasificados en tres tipos: volumétrico, por área y por malla, también se presentan 2 métodos de análisis de tamaño: frecuencia por peso y frecuencia por número, resultando así 6 posibles formas de muestrear y analizar la distribución de tamaños del material del lecho de un cauce.

La evaluación, cuantificación y modelación numérica de procesos de erosión, transporte y depósito de sedimentos en cuencas deben combinar factores naturales y antrópicos para desarrollar modelos que permitan la evaluación de magnitud y tendencias futuras del transporte fluvial de sedimentos. (Gráfico 6)

Gráfico 6. Factores naturales y antrópicos para los modelos.



Fuente: IDEAM, 2013.

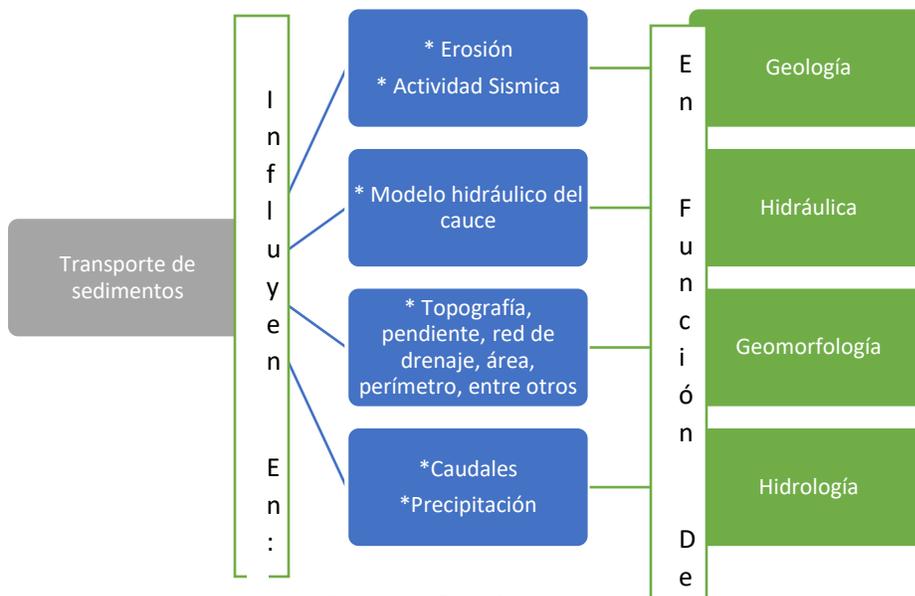
El diseño de obras hidráulicas está sujeto a los procesos hidrodinámicos, morfológicos de la fuente hídrica. Los procesos como la erosión, el transporte y la colmatación de sedimentos son fundamentales puesto que permiten el desarrollo de proyectos de obras hidráulicas o el manejo de las cuencas en los ríos dado que se revisan los factores que generan mayor influencia resultando importante conocer el comportamiento del material producido y transportado por la cuenca. (Brea. J & Spalletti. P, 2012). Según Maza Álvarez & García Flores (1996) en Barbosa (2013), la erosión fluvial se da en las bancas como en el fondo, dependiendo los grados de libertad del cauce. Así mismo, Farias (2003) en Barbosa (2013) considera que la

socavación se produce como consecuencia de la erosión natural del fondo en los cauces naturales producida por un incremento del caudal, ocasionado por crecientes, por lo tanto, el estudio del comportamiento del transporte de sedimentos es de gran importancia en ingeniería ambiental según lo expone Cárdenas (2002) en Barbosa (2013), especialmente para la toma de decisiones en el diseño de obras de cruce a través del cauce, tales como puentes, alcantarillas, bocatomas, obras de protección de márgenes, entre otras.

La socavación general es un proceso físico complejo, cuyas bases teóricas aún no se encuentran bien definidas y no es posible estimar con confianza los cambios en el lecho tras el tránsito de un flujo. Los factores que influyen en la socavación general se pueden agrupar en tres grupos: factores geomorfológicos, de transporte y el tipo de material que conforma el lecho; todos factores únicos para cada río, lo cual dificulta la existencia de una ley general (Melville & Coleman, 2000) en Barbosa (2013). Sin olvidar que el tipo de material que conforma el cauce hace referencia al tamaño del mismo, e investigaciones han demostrado que en ríos aluviales, es decir, aquellos que corren sobre materiales transportados por el propio río en el pasado geológico, la granulometría del material del lecho está directamente relacionada con las características geomorfológicas de un corriente (Autumn & Springer, 2006) en Barbosa (2013).

No obstante, el transporte de sedimentos está influenciado por diversos aspectos (Gráfico 7) como se observa a continuación:

Gráfico 7. Aspectos influyentes en el transporte de sedimentos.

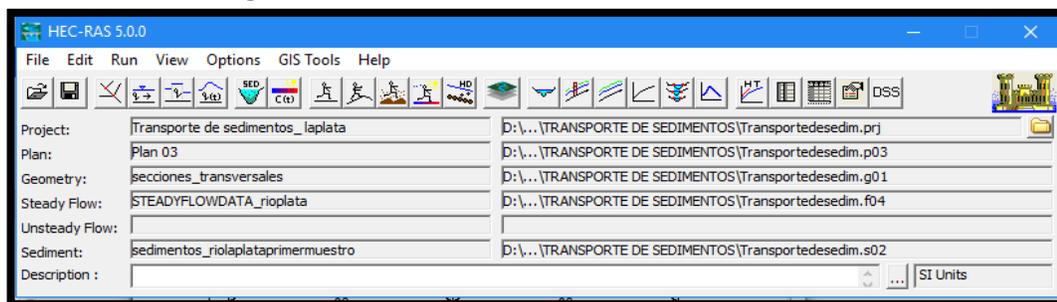


Fuente: García. J, 2010.

Para la modelación del transporte de sedimentos existen diferentes softwares que son usados según los requerimientos que necesiten integrarse; no obstante, en nuestro caso usaremos el HEC – RAS 5.0 para el estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata en la Zona de Influencia de la Cabecera Municipal del municipio de Mutiscua.

El HEC-RAS es un paquete integrado de análisis hidráulico, donde el usuario actúa con el sistema a través del uso de una interface gráfica del usuario (GUI). El sistema es capaz de realizar cálculos de los flujos de la superficie de agua, cálculos de flujo uniforme e incluirá Flujo variado, transporte de sedimentos, etc. (ver imagen 7)

Imagen 7. Pantalla inicial del Software Hec-Ras V 5.0

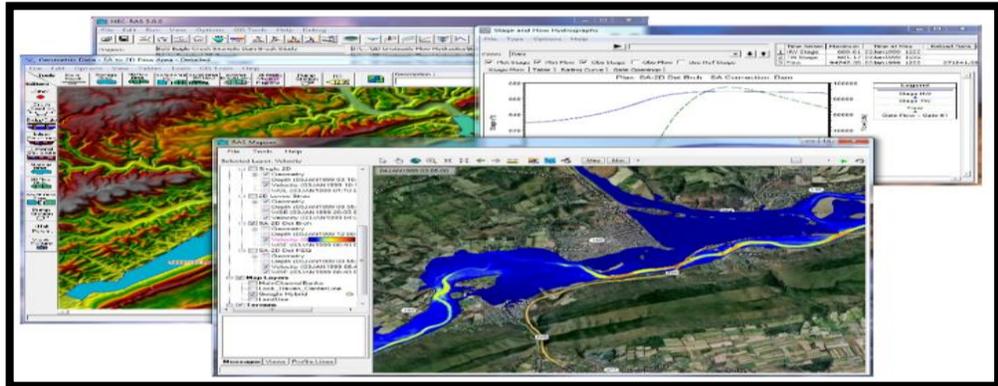


Fuente: HEC-RAS 5.0, 2016.

Los términos que emplea el HEC-RAS, en un proyecto constituyen un juego de archivos de datos asociados con un sistema de un río en particular, donde el modelador puede realizar diferentes tipos de análisis; dentro de los archivos de datos requeridos para un proyecto estos se pueden categorizar como: datos de planta, datos geométricos, datos de flujo uniforme, datos de flujo variado, datos de sedimentos y los datos de diseño hidráulico. Después de que las simulaciones son hechas para los diferentes escenarios pueden realizarse las comparaciones de forma simultánea entre la forma tabular y gráfica.

El centro de Ingeniería Hidrológica (HEC-CEIWR) y el sistema de análisis de río (HEC-RAS), presenta el software como la herramienta que le permite al usuario realizar flujo constante de una o dos dimensiones, cálculos de flujo no estacionario, transporte de sedimentos, cálculos de lecho móvil, temperatura del agua y modelización de la calidad del agua. (Imagen 8)

Imagen 8. Interfaz HEC-RAS 5.0



Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

HEC-RAS está diseñado para llevar a cabo una y dos dimensiones cálculos hidráulicos para una red completa de canales naturales y construidos. La siguiente es una descripción de las principales capacidades de HEC-RAS.

El usuario interactúa con HEC-RAS a través de una interfaz gráfica de usuario (GUI). El objetivo principal en el diseño de la interfaz era para hacer más fácil el uso del software, mientras que todavía mantiene un alto nivel de eficiencia para el usuario. La interfaz proporciona para las siguientes funciones:

- Gestión de archivos
- Entrada de datos y edición
- Los análisis hidráulicos
- Tabulación y representaciones gráficas de Entrada y Salida de Datos
- cartografía de las inundaciones y las animaciones de la propagación de agua
- Instalaciones de informes
- Ayuda sensible al contexto

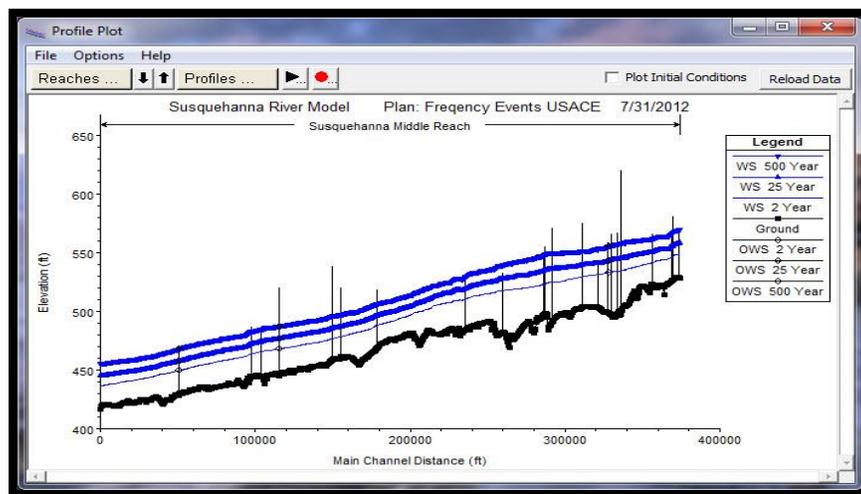
El sistema El HEC-RAS contiene varios componentes de análisis - río para: (1) los cálculos perfil de la superficie del agua flujo constante; (2) la simulación de flujo inestable de uno y de dos dimensiones; (3) cálculos de transporte móvil límite de sedimentos; y (4) el análisis de la calidad del agua. Un elemento clave es, que los cuatro componentes utilizan una representación de datos geométrico común y rutinas de cálculo de geométricas e hidráulicas comunes. Además de estos componentes de análisis de río, el sistema contiene varias características de diseño hidráulicos que se pueden invocar una vez que los perfiles de la superficie de agua básicos se calculan. (HEC-CEIWR, 2016)

- Perfiles de flujo en flujo constante

- Simulación de flujo no estacionario de una y dos dimensiones
- Transporte de Sedimentos / móviles de frontera Cómputos
- Análisis de la Calidad del Agua

Así pues, los perfiles de flujo son un componente del sistema de modelado se destina para el cálculo de perfiles de la superficie del agua para el constante flujo de variación gradual. El sistema puede manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico, o un solo tramo de río. El componente de flujo constante es capaz de subcrítico modelado, supercrítico, y los regímenes de flujo perfiles de la superficie del agua mezclada-. En la Imagen 9 se presenta un ejemplo del perfil de flujo de una modelación.

Imagen 9. Perfiles de flujo.



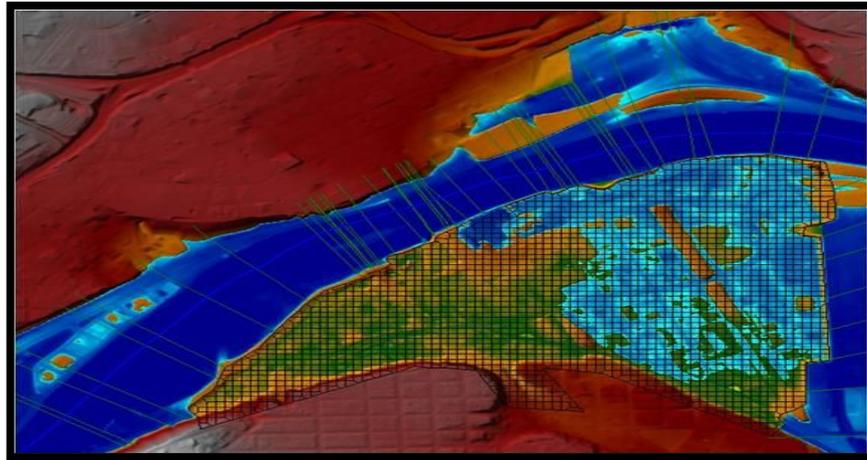
Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

El procedimiento de cálculo de base para la realización de los perfiles de flujo parte de la ecuación de energía unidimensional. Las pérdidas de energía son evaluados por fricción (la ecuación de Manning) y la contracción / expansión (coeficiente multiplicado por el cambio en la altura de velocidad). La ecuación de impulso se puede usar en situaciones en que el perfil de la superficie del agua es rápidamente variada. Estas situaciones incluyen cálculos mixtos régimen de flujo (es decir, saltos hidráulicos), el sistema hidráulico de puentes, y los perfiles que evalúan en el río confluencias (Uniones de trasmisión) (HEC-CEIWR, 2016.)

Por otra parte, la simulación del flujo en una o dos dimensiones (inestable) es un componente del sistema de modelado de HEC-RAS es capaz de simular flujo de forma: unidimensional; bidimensional; y flujo combinado inestable en uno / dos dimensiones a través de una red completa de canales abiertos, llanuras de

inundación, y aluviales aficionados (HEC-CEIWR, 2016). La imagen 10 permite observar un ejemplo del modelamiento del flujo en el software. .

Imagen 10. Pantallazo del modelamiento de flujo inestable de una o dos dimensiones.



Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

El componente de flujo no permanente se puede utilizar para realizarse subcrítico, supercrítico, y el régimen de flujo mixto (subcrítico, supercrítico, saltos hidráulicos, y dibujar bajadas) cálculos en el módulo de cálculos de flujo no estacionario.

Los cálculos hidráulicos para secciones transversales, puentes, alcantarillas, y otras estructuras hidráulicas que se han desarrollado para el componente de flujo constante se incorporaron en el módulo de flujo inestable. Las características especiales del componente de flujo inestable incluyen: amplias capacidades de la estructura hidráulica de la presa rompen análisis; Saltos de diques y el desbordamiento; Estaciones de bombeo; operaciones de la presa de navegación; Los sistemas de tuberías a presión; características de calibración automatizados; Reglas definidas por el usuario; y combinado uno y el modelado de flujo inestable de dos dimensiones. (HEC-CEIWR, 2016)

HEC-CEIWR, 2016 presenta las características del transporte constante / cálculos móviles de frontera donde se efectúan las simulaciones del transporte de sedimentos de una dimensión cálculos límites / móviles resultantes de la erosión y deposición durante periodos de tiempo moderados (normalmente años, aunque son posibles aplicaciones a los eventos de inundación individuales). El potencial de transporte de sedimentos se calcula por la fracción de tamaño de grano, lo que permite la simulación de la clasificación hidráulica y blindaje. Las principales

características incluyen la capacidad de modelar una red completa de los cursos de agua, el dragado de canales, diversas alternativas de diques y la invasión, y el uso de varias ecuaciones diferentes para el cálculo del transporte de sedimentos.

El modelo está diseñado para simular las tendencias a largo plazo de la erosión y deposición en un canal de flujo que pudiera resultar de la modificación de la frecuencia y la duración de la descarga de agua y el escenario, o modificando la geometría del canal. Este sistema puede ser usado para evaluar la deposición en los embalses, las contracciones de los canales de diseño requerido para mantener la profundidad de navegación, predecir la influencia de dragado en la velocidad de deposición, estimación de máxima socavación posible durante grandes eventos de inundación, y evaluar la sedimentación en canales fijos.

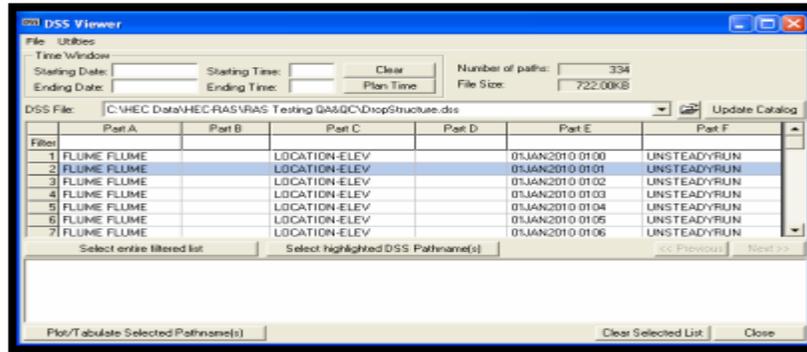
Otro factor determinante es el Análisis de la Calidad del Agua donde el componente en el Software permite al usuario realizar los análisis de calidad de agua fluvial. Mediante el módulo de advección-dispersión se incluye con esta versión de HEC-RAS, añadiendo la capacidad de modelar la temperatura del agua. Este nuevo módulo utiliza el esquema numérico explícito RÁPIDA-último para resolver la ecuación de advección-dispersión unidimensional utilizando un enfoque de volumen de control con un presupuesto de energía de calor aplicado plenamente. Transporte y destino de un conjunto limitado de componentes de calidad del agua es ahora también disponible en HEC-RAS. Los componentes de calidad del agua disponibles en la actualidad son: nitrógeno disuelto (NO₃-N, N-NO₂, NH₄-N y Org-N); Disuelto fósforo (PO₄-P y Org-P); Algas; El oxígeno disuelto (OD); y carbonosas demanda biológica de oxígeno (CBOD).

De manera continua se tiene el almacenamiento de datos y gestión de los datos de almacenamiento (Imagen 11) se logra a través del uso de archivos "planos" (ASCII y binario), la HEC-DSS (Sistema de almacenamiento de datos), y HDF5 (Formato de datos jerárquicos). Los datos de entrada del usuario se almacenan en archivos planos en categorías separadas del proyecto, el plan, la geometría, el flujo constante, el flujo no permanente, el flujo casi constante, los datos de sedimentos, y la información de calidad del agua. Los datos de salida se almacena principalmente en archivos binarios separados (HEC) y HDF5. Los datos pueden ser transferidos entre HEC-RAS y otros programas mediante la utilización de la HEC-DSS.

La gestión de datos (HEC-CEIWR, 2016) se lleva a cabo a través de la interfaz de usuario. Se solicita al modelador para introducir un único nombre de archivo del proyecto que se está desarrollando. Una vez que se introduce el nombre de archivo del proyecto, todos los demás archivos se crean y

se nombran por la interfaz, según sea necesario de forma automática. La interfaz proporciona el cambio de nombre, mover y eliminación de archivos en una base de proyecto por proyecto.

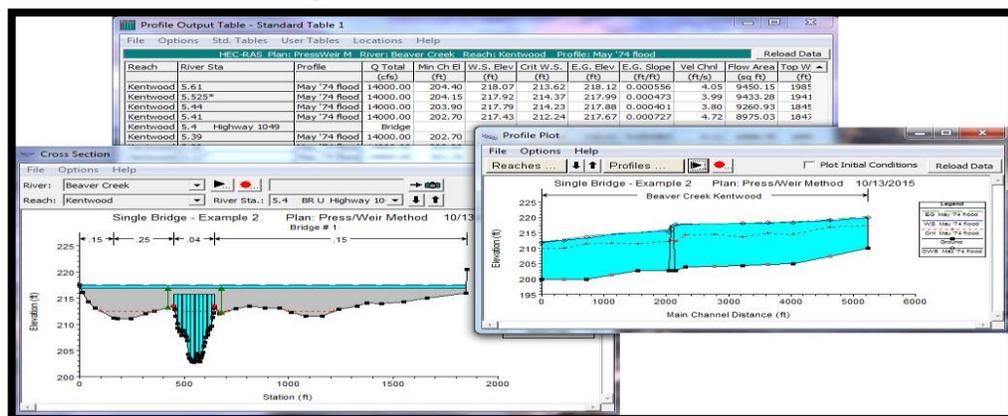
Imagen 11. Presentación del almacenamiento de datos.



Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

Los gráficos e informes finales incluyen: gráficos XY sistema fluvial esquemático, secciones transversales, perfiles, curvas de gasto, hidrogramas, y cartografía de inundaciones. También se proporciona un gráfico tridimensional de múltiples secciones transversales. Cartografía de inundaciones se lleva a cabo en la porción de HEC-RAS Mapper del software. Mapas de inundaciones también pueden ser animados, y contienen múltiples capas de fondo (terreno, la fotografía aérea, etc.). Los resultados tabulares están disponible como se observan en la imagen 12.

Imagen 12. Gráficos e información final.

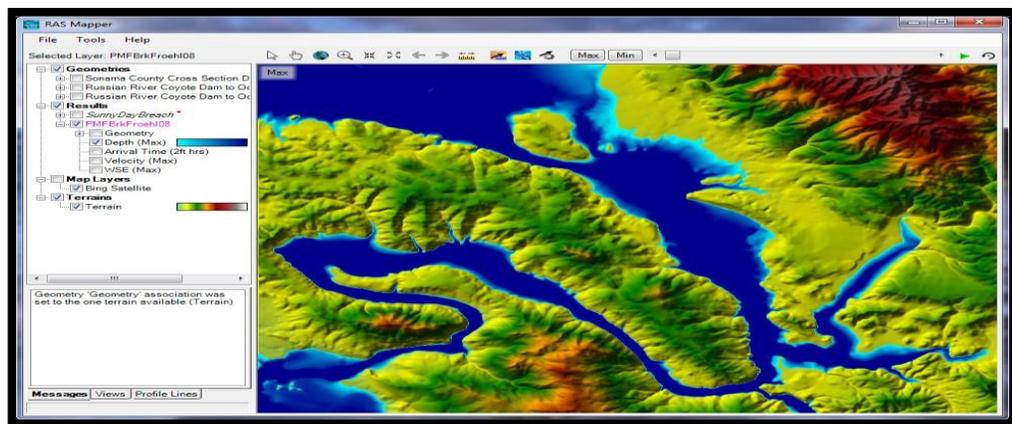


Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

Los usuarios pueden ser seleccionados a partir de tablas predefinidas o desarrollar sus propias tablas personalizadas. Toda la salida de gráficos y tablas se puede visualizar en la pantalla, enviado directamente a una impresora (o trazador), o pasa a través del portapapeles de Windows a otro software, como por ejemplo un procesador de textos u hoja de cálculo. Instalaciones de Información permiten la salida impresa de los datos de entrada así como datos de salida. Los informes se pueden personalizar en cuanto a la cantidad y tipo de información deseada.

HEC-RAS tiene la capacidad de realizar la asignación de inundación de los resultados del perfil de la superficie del agua directamente de HEC-RAS. El uso de la geometría de HEC-RAS y perfiles de flujos calculados, la profundidad de la inundación y la llanura aluvial conjuntos de datos de contorno se crean a través de la RAS Mapper. Datos geospaciales adicionales se pueden generar para el análisis de la velocidad, tensión de corte, potencia corriente, el espesor del hielo, y los datos de Cauce Mayor. Con el fin de utilizar el RAS Mapper para el análisis, debe tener un modelo de terreno en el formato de coma flotante de trama binaria (.flt). La rejilla de profundidad resultante se almacena en el formato .flt, mientras que el conjunto de datos límite es la tienda en formato Shapefile de ESRI para su uso con el software geoespacial. (Imagen 13).

Imagen 13. Ras mapper.



Fuente: HEC-CEIWR, 2016.

Para el caso del transporte de sedimentos en Hec-Ras se emplean una serie de ecuaciones empíricas las cuales describen el movimiento de las partículas en el fluido y a su vez son estas las que permiten la modelización de los cauces; a partir de estas se selecciona la que mejor se adapte a las características de la zona de estudio. (García. R, 2012)

En la tabla 6 son presentados los principales datos requeridos para el desarrollo de las ecuaciones que describen el movimiento de las partículas cuya variación entre ecuación y ecuación corresponde al diámetro máximo de la partícula.

Tabla 6. Datos requeridos para la ecuación 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 canal | B |
| Gravedad específica del sedimento | S |

Fuente: García. R, 2012.

La ecuación de Ackers & 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 (Ver tabla 7) que posteriormente se reemplazan en las ecuaciones 7 a 12.

$$G = Yw * Q * X \quad \text{Ecuación 7}$$

$$X = \frac{Ggr * Sdsi}{D * \left[\left(\frac{Ustar}{V} \right)^n \right]} \quad \text{Ecuación 8}$$

$$Ggr = C * \left(\left(\frac{Fgr}{A} \right) - 1 \right)^m \quad \text{Ecuación 9}$$

$$Fgr = HF * Fgr \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Ustar = (g * D * S)^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ecuación 11}$$

$$D_{gr} = D_{si} \left[\frac{g^*(s-1)}{v^2} \right]^{1/3} \quad \text{Ecuación 12}$$

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.

Por su parte Engelund & Hansen (1967) presentaron la ecuación de 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 d_{84} . Recomendada principalmente para sistemas arenosos por sus características. En la tabla 8 se presentan los principales datos que se requieren para efectuar su cálculo variando en su efecto el diámetro máximo de la partícula que para este caso corresponde a d_{84} :

$$T_o = Y_w * D * S \quad \text{Ecuación 13}$$

$$g_s = 0.05 * s * (v^2) * [(df/g * (s - 1))^{1/2}] * [T_o / ((\gamma_w * s - \gamma_w) * df)]^{3/2} * [B] \quad \text{Ecuación 14}$$

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

Así pues, la ecuación de carga total de Laursen (1968) se basó en aforadores y finalmente fue ampliada por Madden quien incluyó datos del Río Arkansas. Como tal es una función del exceso de esfuerzo cortante y la relación dada entre la velocidad de corte y la de caída. Posteriormente Copeland (1989) generalizó la ecuación para el transporte de gravas y le dio la posibilidad de ser ecuación 15 empleada para lechos graduados. En la tabla 8 se presentan los datos requeridos (d_{84}).

$$G_s = 0.432 * Y_w * Q * RRP * TFP * \Psi \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde, G_s = Caudal sólido (ton/día), RRP = esfuerzo cortante con el tamaño de la partícula, TFP = parámetro de la movilidad de esfuerzo cortante, Ψ = parámetro de la relación de velocidad de la partícula.

Por otra parte, una de las ecuaciones más empleadas en el transporte de sedimentos es la de Meyer, Peter & Müller (1948) (ecuación 16 -17) puesto que relaciona el exceso de fuerza cortante, su ecuación de carga de lecho se basó en

datos de aforos para arenas y gravas bajo condiciones de lecho plano. Este método es sugerido para cálculo de gravas puesto que tiende a subestimar el transporte de materiales finos. Los datos requeridos se relacionan en la tabla 8 cuya variación corresponde al diámetro máximo de la partícula que en este caso será el d90.

$$G_s = \left(\left[\left(\frac{RKR}{11.24} \right)^{3/2} * Y_w * D * S - 0.047 * (Y_w * S - Y_w) * d_{Si} \right] / \left(0.25 * \left(\frac{Y_w}{g} \right)^{1/3} * \left(\frac{Y_w * S - Y_w}{Y_w * S} \right)^{2/3} \right)^{3/2} * B \right) \quad \text{Ecuación 16}$$

$$RKR = \left(\frac{f'}{8} \right)^{1/2} * \left(\frac{V}{g * D * S} \right)^{1/2} \quad \text{Ecuación 17}$$

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. Está función es considerada para ríos largos y no se ve influenciada por la velocidad de corte ni esfuerzo cortante en el lecho, si no que se basa en regresiones de temperatura y un exponente empírico que describe la relación entre los sedimentos y las características hidráulicas. Variación en la tabla 8 se toma diámetro máximo de la partícula d_{65} . Ecuación 18.

$$G = g_{si} * B \quad \text{Ecuación 18}$$

Los datos requeridos en la ecuación 18 son provenientes de los procesos dados en las ecuaciones 19, 20, 21, 22 y 23 presentadas a continuación:

$$g_{si} = g_{sbi} + g_{sLi} + g_{sMi} + g_{sUi} \quad \text{Ecuación 19}$$

$$g_{sbi} = M_t * (2 * d_{st})^{1 + n_y - 0.756 * z_i} \quad \text{Ecuación 20}$$

$$g_{sLi} = M_t * \left[\left(\frac{R}{11.24} \right)^{1 + n_y - 0.756 * z_i} - (2 * d_{si})^{1 + n_y - 0.756 * z_i} \right] / (1 + n_y - 0.756 * z_i) \quad \text{Ecuación 21}$$

$$g_{sMi} = M_i * \left[\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.244 * z_i} * \left[\left(\frac{R}{2.5} \right)^{1 + n_v - z_i} - \left(\frac{R}{11.24} \right)^{1 + n_v - z_i} \right] \right] / (1 + n_v - z_i) \quad \text{Ecuación 22}$$

$$g_{sUi} = M_i * \left[\left(\frac{R}{11.24} \right)^{0.244 * z_i} * \left(\frac{R}{2.5} \right)^{0.5 * z_i} * \left[\left(\frac{R}{11.24} \right)^{1 + n_v - 1.5 * z_i} - \left(\frac{R}{2.5} \right)^{1 + n_v - 1.5 * z_i} \right] \right] / (1 + n_v - 1.5 * z_i) \quad \text{Ecuación 23}$$

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 24 de Yang (1973 – 1984) en función de la concentración (ecuación 25) 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} .

$$[G = (\gamma_w * Q * C_t^{0.4536}) / (1000000)] \text{ Ecuación 24}$$

$$C_t = 10^{(\log(ct))} \text{ Ecuación 25}$$

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 26) 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.

$$\tau^*m = 0.021 + 0.015e^{-20FS} \text{ Ecuación 26}$$

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

7. METODOLOGÍA

7.1. TOPOGRAFÍA

El desarrollo de proyectos de este ámbito parten de la topografía de la zona, en este caso la limitante se constituye en que la topografía es detallada pero no precisa puesto que para la modelación se hace necesario emplear nivel de detalle y precisión de aproximadamente 1 metro, por lo cual se opta por realizar el levantamiento topográfico del tramo a estudiar del cauce principal empleando GPS para posteriormente desde google Earth generar el gráfico de perfil; este proceso se efectuó mediante equipos manuales de baja precisión y levantamiento de las secciones transversales en el tramo de estudio empleando cinta métrica y reglilla. Las secciones se levantaron cada 4 y 6 metros para un total de 237 secciones en campo (Ver fotografía 1).

Fotografía 1. Levantamiento de las secciones transversales



Fuente: Suarez, 2016.

7.2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO DE SEDIMENTOS

El establecimiento e identificación de los puntos de muestreo, se efectuó mediante la visita de campo a la zona (Fotografía 2) donde se pudo observar de manera general los sedimentos, la forma y las estructuras hidráulicas en el cauce del río La Plata, para de esta manera lograr su ubicación con GPSmap 76 CSx (Fotografía 3).

A partir de las consideraciones de: fácil acceso, sedimentos colmatados o depositados en el margen, sedimentos de fácil recolección en el cauce y representatividad en la zona a analizar se obtuvieron 5 puntos de muestreo de sedimento (Imagen 17); además, 2 de aforo, 1 para revisar niveles (cm) de la sección transversal y finalmente 2 puntos de muestreo de calidad de agua.

Fotografía 2. Sedimentos, forma y estructuras hidráulicas en el cauce.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 3. GPSmap 76CSx usado en el levantamiento de información.



Fuente: Suarez, 2016

Para el caso, las muestras de sedimento se recolectan en cada punto material del cauce y del margen se pesan in situ y se realiza el cuarteo, de este proceso se toma $\frac{1}{4}$ se coloca en una bolsa plástica previamente rotulada, se pesa nuevamente y

posteriormente se transporta hasta el lugar dispuesto para su secado; una vez secas las muestras se procede a nuevo peso y ya están listas para realizar granulometría del sedimento.

7.3. CRITERIOS DE SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE AFORO PARA DETERMINACION DEL CAUDAL

El proceso de establecimiento de los puntos para el aforo se parte de 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. Así pues se establecen 2 puntos para el aforo uno corresponde al punto 3 (muestreo de sedimentos) en el molino Monarca coordenadas (N 1146770 W 1299045 Z 2613) y el siguiente punto en coordenadas N 1146911 W 1299662 Z 2564) aguas arriba del vertimiento municipal

Como soporte se implementa un punto a 2576 msnm para medir el nivel de agua, el cual es seleccionado mediante revisión de la zona; haciéndose necesario el levantamiento de la sección transversal y el diseño y construcción de una reglilla numerada en centímetros (cm) (Fotografía 4). El registro de esta información es de tipo diario, 3 veces al día 7 am, 12 medio día y 6 pm.

Fotografía 4. Reglilla para medición de nivel de agua (Cm).



Fuente: Suarez, 2016

7.4. OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE INSUMOS DE PRECIPITACION PARA LA DETERMINACIÓN DE LAS CURVAS IDF, HIETOGRAMAS, HIDROGRAMAS Y LOS ELEMENTOS NECESARIOS PARA EL MODELAMIENTO.

En primera medida se solicitan los datos al IDEAM de la estación LA CALDERA incluida en la zona, seguidamente se incluyen los datos faltantes empleando la estimación por la razón de los valores normales con la misma estación, para el

registro pluviométrico de 40 años desde 1976 hasta el 2015, obteniendo así mismo la información del mes de mayor precipitación y la máxima precipitación (mm) para los cálculos de precipitaciones máximas diarias probables para distintas frecuencias.

Partiendo del hecho de que las curvas IDF influyen en el comportamiento de los caudales y en su defecto generan influencia en el transporte de sedimentos, se empleó el proceso que incluye la distribución de probabilidades pluviométricas mediante la distribución de Gumbel (Valores extremos), teniendo en cuenta la precipitación máxima probable en 24 horas. Bajo el empleo de los coeficientes de duraciones que van desde 1 a 24 horas establecidos por Campos (1978); además, se determina la precipitación máxima (mm) y la intensidad de la lluvia (mm/h) para periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

La duración de la tormenta influye en el transporte de sedimentos por el aumento o disminución del caudal y modificación del flujo por ende el desarrollo de los hietogramas muestra la precipitaciones máxima en 30 minutos para tal caso se efectúa a partir de la información básica del cauce (longitud y pendiente); además, implica el tiempo de concentración, tiempo de duración de la tormenta y la ecuación característica de las curvas IDF para la intensidad de precipitación con duración de 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 50, 45, 50, 55 y 60 minutos y periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años para posteriormente determinar la precipitación acumulada (mm), precipitación diferida, intensidad parcial, precipitación alternada y la parcial alterna que finalmente permiten obtener las gráficas de barras correspondientes a hietograma y distribución de intensidades de precipitación.(Oliveros, 2014)

Las variaciones que presenta el caudal se encuentran directamente relacionadas con la precipitación; dichas variaciones influyen a su vez en el transporte de sedimentos para lo cual se hace necesario generar los Hidrogramas. Estos son determinados a partir de la longitud del cauce principal, la pendiente, el área de estudio y la precipitación dada por el hietograma para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años con lo que se calcula el volumen total y por ende el Q total (m^3/s)

En lo concerniente a las muestras de calidad de agua se hacen 2 muestreos cuyos puntos se seleccionaron teniendo en cuenta las recomendaciones dadas por el manual de instrucciones para la toma, preservación y transporte de muestras de agua, instituto nacional de salud– INS (2011).

La información correspondiente a la calidad de agua se inicia con muestreo en el cauce del río La Plata aguas arriba y aguas abajo del vertimiento municipal realizándose 2 muestreos que incluyen parámetros fisicoquímicos (Color, turbidez y pH), microbiológicos (Coliformes totales, Escherichia Coli) y pruebas complementarias (Conductividad, Dureza total, alcalinidad y Cloruros) llevadas a cabo por EMPOPAMPLONA y un punto adicional comparativo ubicado en el puente Los Salados. Finalmente se realizan los análisis necesarios en función de la normativa legal vigente que incluye la resolución 2115 del 2007, el decreto 1594 de 1984 e información de la FAO para calidad de agua ya sea para cultivos o estaciones piscícolas.

Para efectos del proceso de la investigación geológica en primera instancia se revisa el mapa H13 de INGEOMINAS seguido de la información contenida en el Plan Básico de Ordenamiento Territorial del Municipio de Mutiscua y los mapas de suelo del IGAC y la FAO, posteriormente en la visita de campo se ejecuta la verificación de las características de la zona (Rocas, cortes, disposición, depósitos o formaciones) haciendo énfasis en las particularidades marcadas en la región objeto de estudio.

7.5. CARACTERIZACIÓN GRANULOMÉTRICA DE SEDIMENTOS EN LOS PUNTOS DE MUESTREO

En función de la caracterización granulométrica se tiene para el tramo de estudio la recolección de 10 muestras en los 5 puntos establecidos en cada sesión para un total de 30 muestras que implican muestreo en el cauce y en el margen (Fotografía 5), rotuladas y cuarteadas en campo (Fotografía 6). Seguidamente fueron secadas (Fotografía 7) para segundo cuarteo y tamizado en laboratorio empleando la serie de tamices 4, 16, 30, 40, 60, 100 y 200 de ensayo estándar ASTM E-11 NTC 32 2002 (Fotografía 8a). Por último, se calcula el porcentaje retenido y porcentaje que pasa (Fotografía 8b & 8c) para obtener la curva granulométrica y por ende la clasificación de las partículas en función de sus diámetros.

Para efectos de información se colocan 3 muestreadores artesanales, en el punto 1 y 2 de tipo cuadrado (90 x 114) cm en el margen (Fotografía 9a) y en el punto 3 un muestreador cilíndrico (Fotografía 9b) de diseño propio cuyas dimensiones son: diámetro 23 cm y longitud 35 cm con 2 aberturas (27 x 7 cm) y una sección de agujeros gruesos y finos (27 x 13cm) aproximadamente, con el material recolectado (Fotografía 10) se procede a pesado y posterior secado para finalmente efectuar la granulometría correspondiente.

Fotografía 5. Sedimentos presentes en el cauce (izquierda) y canal de recolección de muestra de sedimento fino en el margen (derecha).



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 6. Cuarteo en campo de los sedimentos.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 7. Secado de las muestras de sedimento.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 8. Serie de tamices / sedimentos tamizados.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 9. Muestreadores artesanales margen y cauce.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 10. Recolección de material retenido en los muestreadores.



Fuente: Suarez, 2016

7.6. MODELAMIENTO EN EL SOFTWARE HEC-RAS V 5.0

La modelación de la cuenca en Hec-Ras 5.0 parte del levantamiento de las secciones transversales y elaboración de la planta y perfil del cauce, seguido del paso de datos al Software Hec-Ras junto con la información adicional de las condiciones, características de flujo, tamaño de los sedimentos (información de granulometría) y empleo de las fórmulas que se encuentran incluidas en el mismo determinando cual se adapta mejor a las características propias de la zona de estudio.

Las principales características de la zona de estudio provienen de la información proporcionada por el DEM 12 metros del municipio de Mutiscua se efectúa la caracterización física y morfométrica de la cuenca en ArcGis 10.2 en coordenadas MAGNA Colombia Bogotá a partir de su digitalización y modificación. Cuyo proceso implica la generación de las curvas de nivel a partir del modelo de elevación digital (DEM) junto con delimitación de la cuenca usando la herramienta arctoolbox en el ítem Spatial Analyst Tools en el módulo de hidrología.

Así mismo a partir de las curvas de nivel se genera el TIN (Triangulated Irregular Network) de la zona de estudio siendo este el inicio del trabajo con la herramienta Hec- GeoRas en ArcGis que incluye 2 íconos fundamentales que son: RAS Geometry y RAS Mapper; el primero se emplea para el diseño y trazo de la geometría principal del cauce mediante la creación del Layer en Stream Centerline (cauce), los

bancos izquierdo o derecho en Banks links y los XS Cut Lines que corresponden a la capa de secciones indicando la dirección del flujo mediante la herramienta Flow Path Centerlines; una vez creada la geometría se procede a efectuar el proceso de generación de atributos tanto para el cauce principal como para las XS Cut Lines que permiten la observación de la topología, elevaciones e información adicional del terreno que se exporta a Hec-Ras. El segundo ícono corresponde al preprocesamiento de la información que se extrae posteriormente de Hec-Ras para mejorar la interpretación de la información.

En Hec-Ras se crea el proyecto tomando como ejemplo la información de (Villón, 2009) y (Ramos, 2012). En nuestro caso se trabaja el transporte de sedimentos donde se requiere en primera instancia la creación de la geometría, esta se importa desde el trabajo efectuado en ArcGis seguidamente se incluyen las secciones transversales levantadas en campo para mejorar la precisión del modelo y complemento del proyecto puesto que las secciones son la conexión entre el sistema que da lugar al río; a su vez en este espacio se pueden realizar interpolaciones que son importantes porque permiten definir mejor dicha geometría. El río debe ser identificado con su nombre al igual que los afluentes que se conectan al mismo mediante la función Junction o unión cuyos nombres y calificativos asignados deben ser los propios y de fácil reconocimiento; lo anterior se hace desde Geometric Data.

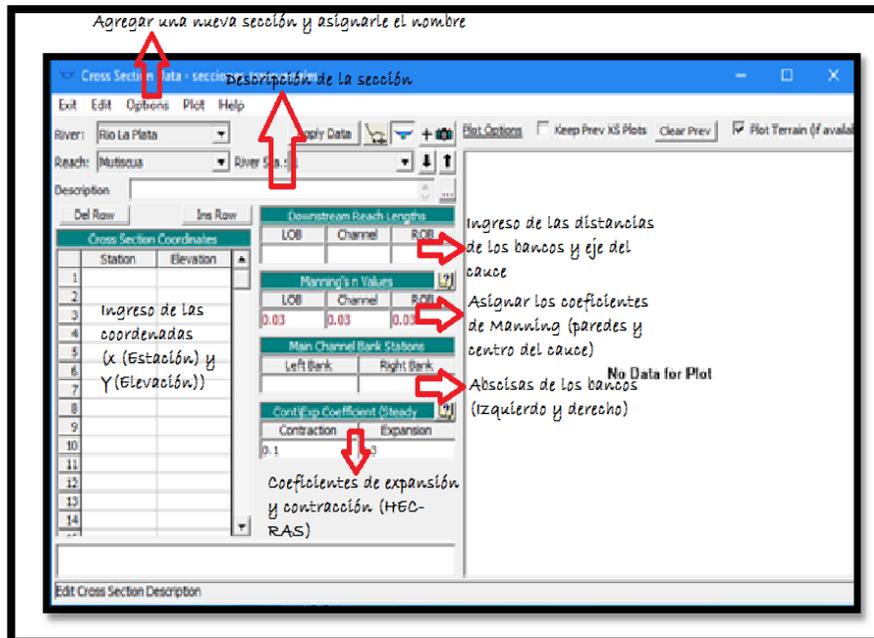
El ingreso de la información requerida para las secciones transversales se realiza desde Geometric Data en Cross section (Imagen 14) asignando en primera instancia el nombre de la sección, seguidamente se elige el río, se realiza la descripción de la sección si así se cree conveniente, inclusión de la localización mediante sistema de coordenadas (Station, Elevation), además de las distancias a los bancos y al cauce desde la sección anterior hasta la nueva, también, se incluye el valor de Manning para cada sección o desde la tabla en la pantalla inicial, otro dato que se requiere es el coeficiente de expansión o contracción que puede ser tomado por defecto o seleccionado según el criterio del usuario según la tabla 7 del Hec-Ras para la presentación de la información de geometría como se observa en la imagen 15.

Tabla 7. Coeficientes de contracción y expansión según el Hec-Ras.

| Parámetro | Contracción | Expansión |
|------------------------------|-------------|-----------|
| Sin pérdidas por transición | 0.0 | 0.0 |
| Transiciones graduales | 0.1 | 0.3 |
| Secciones típicas de puentes | 0.3 | 0.5 |
| Transiciones abruptas | 0.6 | 0.8 |

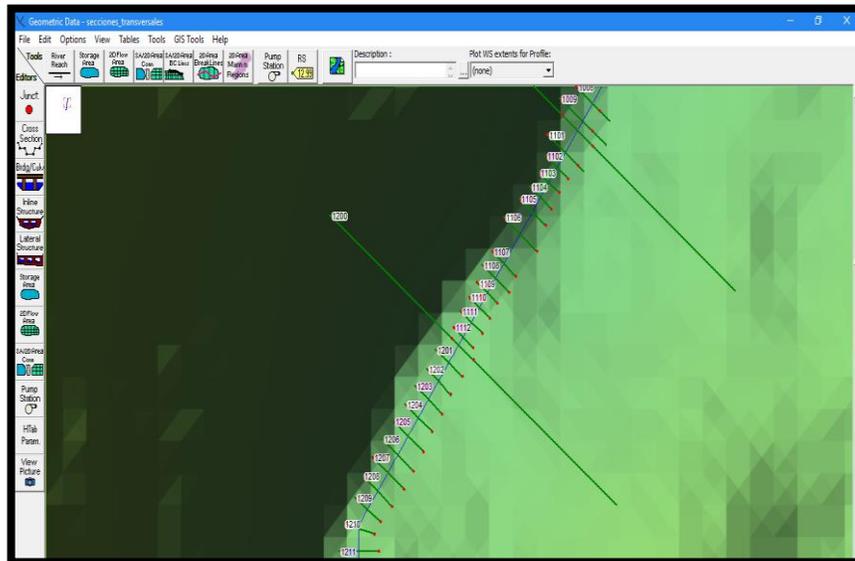
Fuente: HEC-RAS V 5.0, 2016

Imagen 14. Datos requeridos para dibujar una sección transversal.



Fuente: Suarez, 2016

Imagen 15. Geometría en Hec-Ras.



Fuente: Suarez, 2016

De igual manera, en Geometric Data se presenta el ícono para incluir los puentes que se encuentran en la zona (5 puentes) en el área de influencia de la cabecera municipal donde se requiere la localización del mismo, el ancho, alto, largo, número

de pilas y espesor; además, de la definición de las áreas inefectivas que estos generan.

En este caso se incluye los archivos de sedimentos que son dos específicamente: el primer archivo es el de condiciones iniciales y parámetros de transporte y el segundo corresponde a las condiciones de contorno. Para la primera parte se indica el nombre del tramo, la función de transporte, método de clasificación, método de velocidad y la granulometría del sedimento para cada sección y en cuanto a las condiciones de contorno se tiene curvas de descarga, series de carga de sedimento y cargas de equilibrio. Así pues, la granulometría se ingresa desde Sediment data, Define / Edit Bed Gradation en New Bed Gradation y en la principal de sediment data se incluyen los bancos, la profundidad máxima de igual manera las condiciones de borde que a su vez se seleccionan y llevan a una nueva pantalla que muestra la información que solicita para su correcto funcionamiento.

En cuanto a las características de flujo para el análisis de transporte de sedimentos se requiere específicamente se haga con el flujo cuasi – no permanente que se aproxima a un Hidrograma de series de flujo en función de la duración. Sin embargo, en primera medida se hace una modelación con la geometría empleando datos de flujo constante. Finalmente en Hec – Ras se procede a efectuar la corrida o el plan de la información incluida. Nota: En la modelación de los sedimentos no se corre esta con flujo turbulento debido a la no existencia de estaciones hidrometeorológicas que permitan la obtención de la curva de gasto que representen los caudales en el tramo de estudio por lo que la modelación se desarrolla con steady flow data y Quasi Unsteady flow.

7.7. MAPAS

Los mapas se generaron en ArcGis 10.2 tomando como punto de partida el modelo digital de terreno MDT 12 metros en coordenadas MAGNA Colombia Bogotá obteniendo de esta manera la información resumida. Los mapas obtenidos son: mapa de ubicación general del proyecto (Anexo 1), mapa de elevaciones (Anexo 2), mapa de los drenajes (Anexo 3), mapa de orden de la cuenca (Anexo 4), Mapa de información generalizada de la cuenca (Anexo 5), Mapa de puntos de muestreo de sedimentos (Anexo 6), mapa de aforo, calidad de agua y nivel (Anexo 7), mapa de altura de la superficie de agua en función de los sedimentos (Anexo 8). El mapa de puntos de muestreo de sedimentos y el de aforo, caudales y niveles se digitalizaron en a escala 1:5.000 para mejor visualización, los demás mapas se presentan a escala 1:25.000.

8. RESULTADOS

Siguiendo la metodología planteada para efectuar el Estudio del comportamiento del transporte de sedimentos en el río La Plata, Municipio de Mutiscua, Norte de Santander – Zona de influencia de la cabecera municipal, se obtuvieron los siguientes resultados:

8.1. MORFOMETRÍA DE LA CUENCA

Uno de los principales afluentes de la cuenca del río El Zulia, es el río La Plata; La zona analizada parte de la Laguna La Plata (fotografía 11) hasta el vertimiento municipal; sus características morfométricas se presentan en la Tabla 8 y los tiempos de concentración se referencian en la tabla 9. En la zona se destaca que las laderas aferentes al cauce y los alrededores del municipio están condicionados por pendientes de relieve que va desde pronunciadas a muy fuertes.

Fotografía 11. Laguna La Plata.



Fuente: Suarez. Y, 2016.

Tabla 8. Características morfométricas de Microcuenca- río La Plata.

| Parámetros | Símbolo | Valor | Unidad |
|---------------------------|-----------|-----------|--------|
| Área cuenca total | Ac | 265.00 | Km2 |
| Perímetro cuenta total | Pc | 99.49 | Km |
| Área Zona de estudio | A | 7.39 | Km2 |
| perímetro Zona de estudio | p | 46.93 | km |
| Longitud Max | Long máx. | 10.711153 | km |

| | | | |
|--|-----------------|-----------|--------------|
| Longitud cauce principal | Long.c.p | 15.297369 | km |
| Ancho promedio teórico | Anch.prom.t | 0.6897 | km |
| Ancho máx. medido | anch.max.medido | 12.582287 | km |
| Factor forma | Ff | 0.1768 | adimensional |
| Coefficiente de compacidad | Kc | 5.5669 | adimensional |
| Coefficiente de masividad | Km | 448.9774 | adimensional |
| Orden | Orden | 3 | adimensional |
| Desnivel altitudinal | aprox | 1429 | msnm |
| Índice de alargamiento | la | 0.8513 | adimensional |
| Índice de homogeneidad | lh | 0.0420 | adimensional |
| % pendiente promedio de la zona de estudio | %mcauce | 23.72 | % |
| pendiente del cauce | mcp | 0.0934 | grados |
| clasificación- destino final de las aguas | | exorreica | |

Fuente: Suarez, 2016.

Tabla 9. Tiempos de concentración de la Microcuenca- río La Plata

| Parámetros | Símbolo | Valor | Unidad |
|-------------------------|-----------------------------|-----------|---------|
| Tiempo de concentración | Kirpich | 58.045122 | minutos |
| | California Culvert Practice | 80.030889 | minutos |
| | Temez | 188.06563 | minutos |
| | Brandys-Williams | 250.43964 | minutos |
| | Giandoti | 40.410038 | minutos |
| | Clarck | 86.03378 | minutos |
| | Pasini | 58.843955 | minutos |

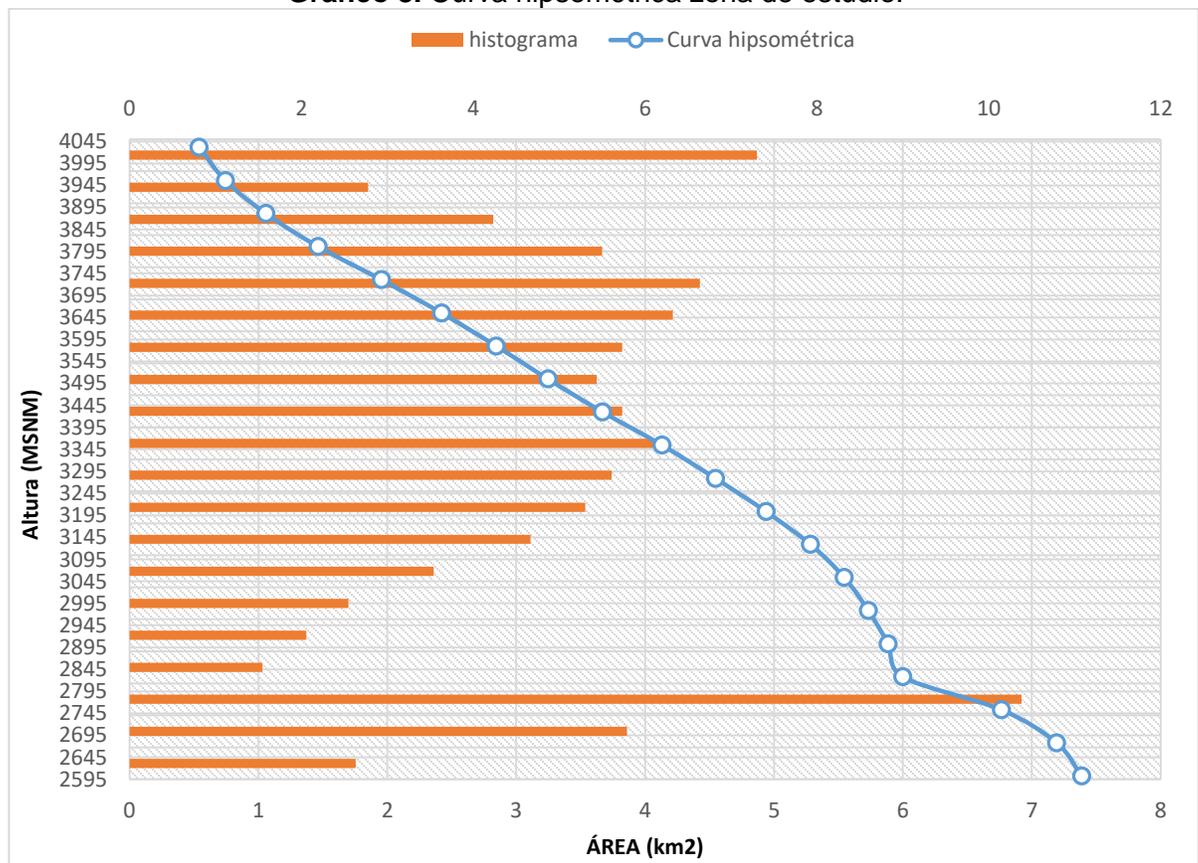
Fuente: Suarez, 2016.

En la tabla 8 se observa que la cuenca cuenta con una superficie de 265 Km² que permite que se clasifique como Microcuenca grande según (Carrion, 2014), su perímetro corresponde a 99.49 Km, siendo el área de estudio de aproximadamente 2.13% del área total. Por otra parte, según el factor de forma es muy poco achatada y con respecto al coeficiente de compacidad o índice de Gravelius se determina que su forma es oval oblonga a rectangular oblonga; además, presenta un orden tres (3), según las condiciones de Henao (1998) su grado estructural es medio generando mayor energía, mayor control estructural y de manera general indica mayor erosión, el desnivel altitudinal está determinado como tipo medio permitiéndose evidenciar variabilidad climática y ecológica en la zona, su coeficiente de masividad lo proyecta de característica predominante montañosa, no obstante, la pendiente es moderada cuyo destino final de las aguas es exorreica – perenne siendo el drenaje de tipo subparalelo.

De acuerdo a los métodos de Kirpich, California Culvert Practice, Giandotti y Pasini (Tabla 9) el tiempo de concentración promedio (T_c) obtenido es de 59.33 minutos permitiendo que este sea clasificado como de tipo moderado según lo dicho por Henao 1998, Londoño 2001 & en Gaspari. F et al, 2013.

La curva hipsométrica (Gráfico 8) para la zona de estudio del río La Plata permite observar que está tiende a estar en fase de equilibrio (madurez); de acuerdo con Racca. J (2007). También, es posible evidenciar cierta variación en función de la teoría por la presencia de un punto de inflexión que puede estar relacionado con controles tectónicos o litológicos, es decir, por la geomorfología del municipio.

Gráfico 8. Curva hipsométrica zona de estudio.

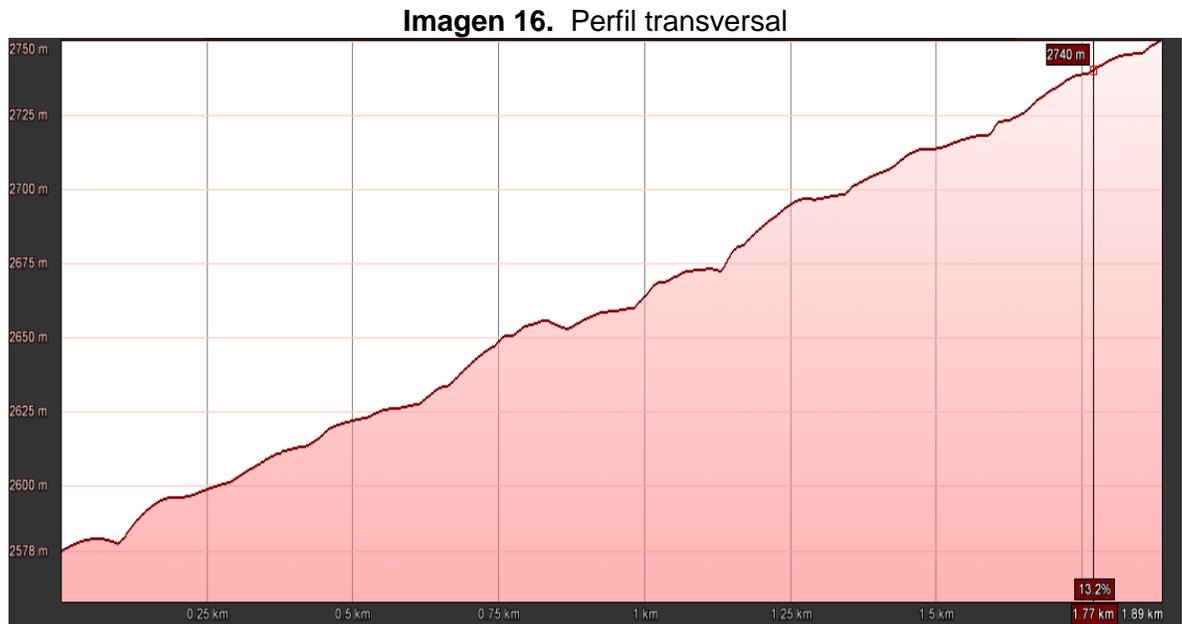


Fuente: Suarez, 2016

8.2. TOPOGRAFÍA

El perfil del tramo del cauce a analizar parte de la cota 2757 msnm y finaliza en el vertimiento municipal cota 2565 msnm, en la imagen 16 es posible observar la

variación que presenta el mismo, cuya pendiente media se encuentra entre el rango del 10 al 4.7%.



Fuente: Google Earth. Editado por: Suarez, 2016

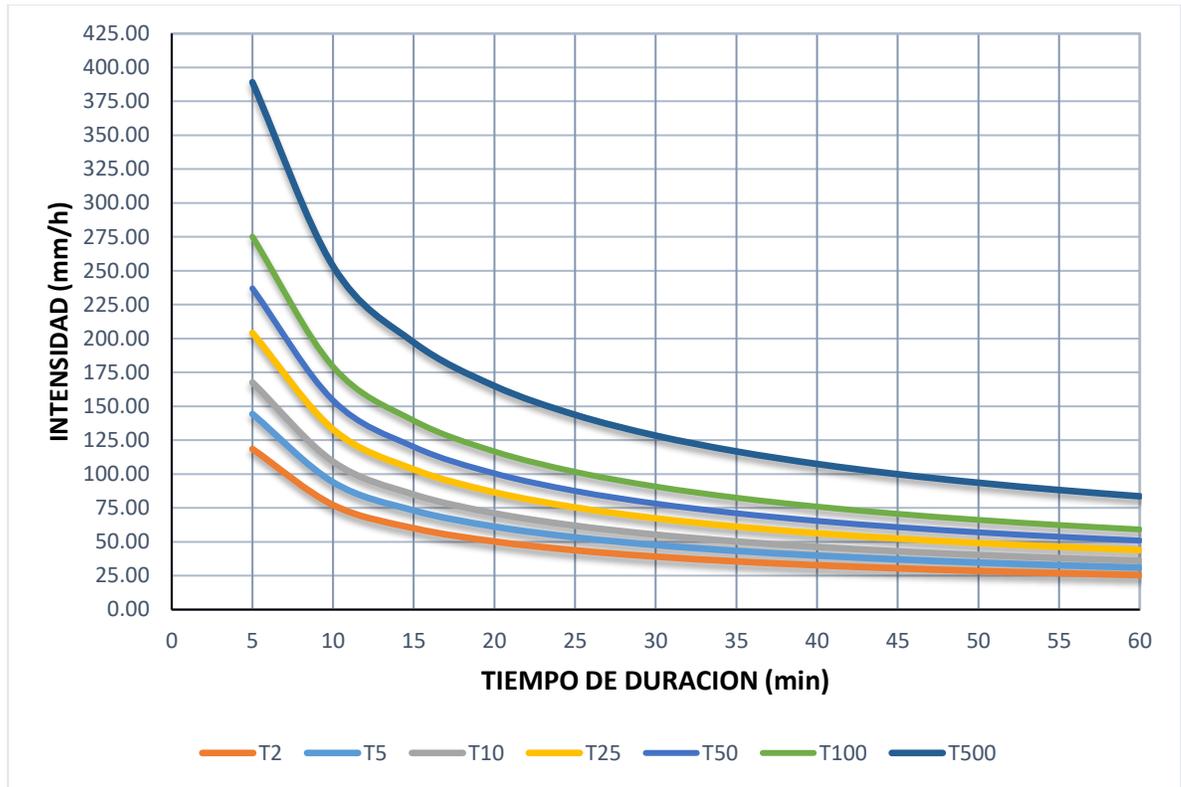
8.3. ANÁLISIS HIDROLÓGICO

- **CURVAS IDF, HIETOGRAMAS E HIDROGRAMAS**

Para el proceso de elaboración de las curvas IDF se tomaron los datos de precipitación máxima en 24 horas de la estación La Caldera corriente Sulasquilla existente en la jurisdicción del municipio, esta información fue suministrada por el IDEAM para la serie (1976 -2015). Continuamente se determinan los valores faltantes (3 datos) mediante la estimación por razón de los valores normales con la misma estación. Cabe resaltar que efectuar la elección del método es un trabajo complejo requiriéndose evaluar con anterioridad las alternativas.

Para continuidad del proceso se obtienen las precipitaciones máximas y posteriormente empleando regresión potencial de intensidad, duración y frecuencia se obtiene el coeficiente de regresión – 0.6188 y los valores de k y m cuyos valores son 276.3233 y 0.215335 respectivamente para los periodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años como se observa en la gráfico 9.

Gráfico 9 Curva IDF, Estación La Caldera – Mutiscua, Río La Plata.

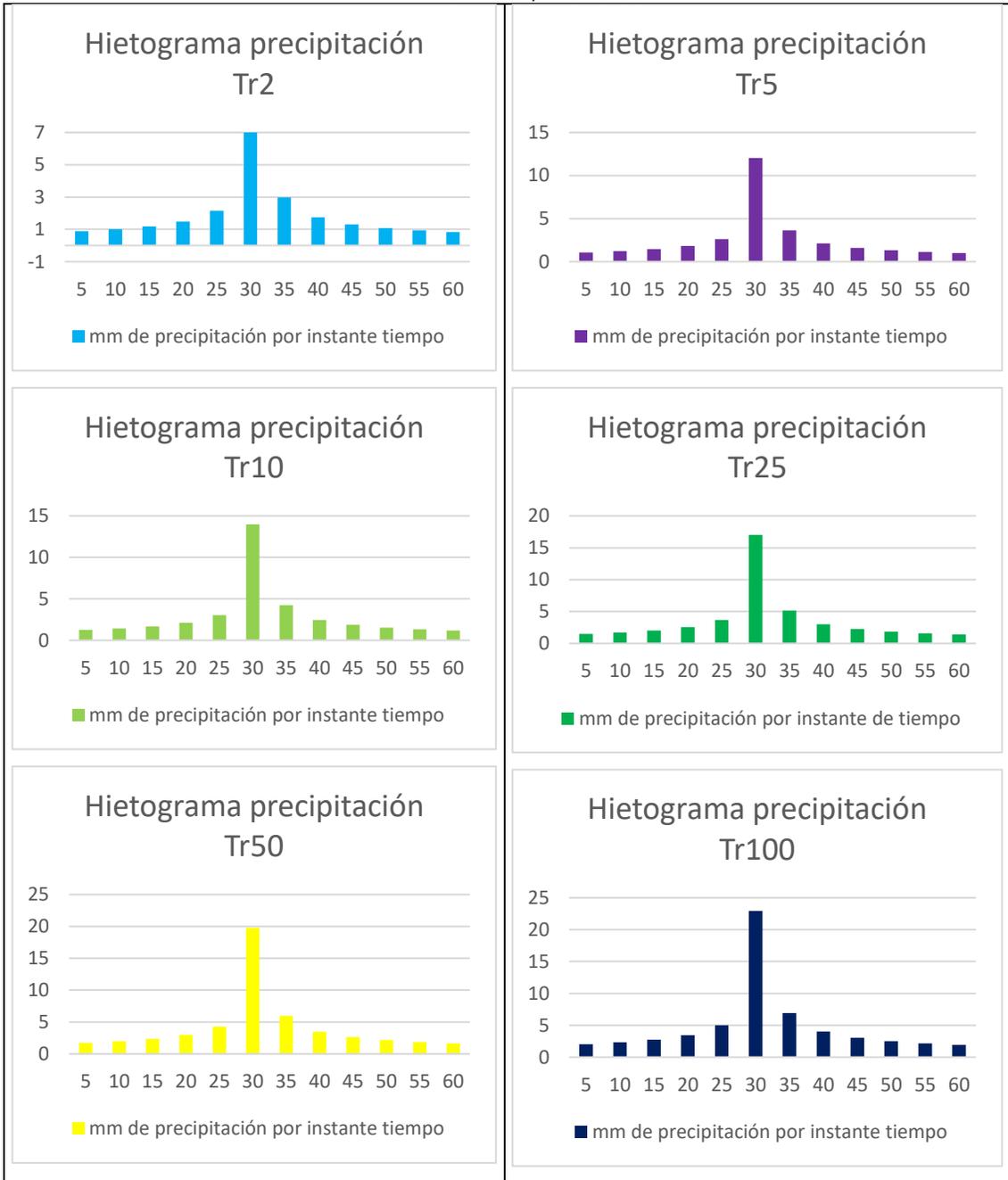


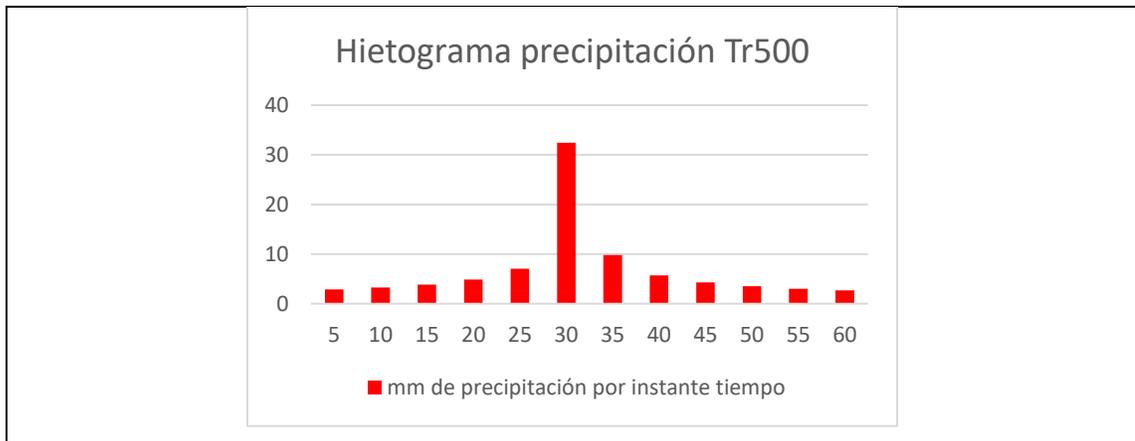
Fuente: Suarez, 2016

Según Chow et al (1994) y Aparicio (1997) debe revisarse que efectivamente muestran el comportamiento característico de las tormentas; de manera general se evidencia lo anterior y se presentan para el periodo de retorno de 2 años intensidades que van desde 118.49 mm/h en 5 minutos hasta 25.46 mm/h en 60 minutos (1 hora) y para un periodo de retorno de 100 años se tiene intensidades en 5 minutos de 275.13 mm/h y 59.11 mm/h en una

Analizando los hietogramas (Gráfico 10) en función del tiempo de concentración principalmente la fórmula de Kirpich y sus variables se determinan que la duración de la tormenta en horas (1 hora) y la intensidad de la lluvia para los periodos de retorno evaluados en las curvas IDF 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años.

Gráfico 10. Hietogramas para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años del río La Plata, Mutiscua.



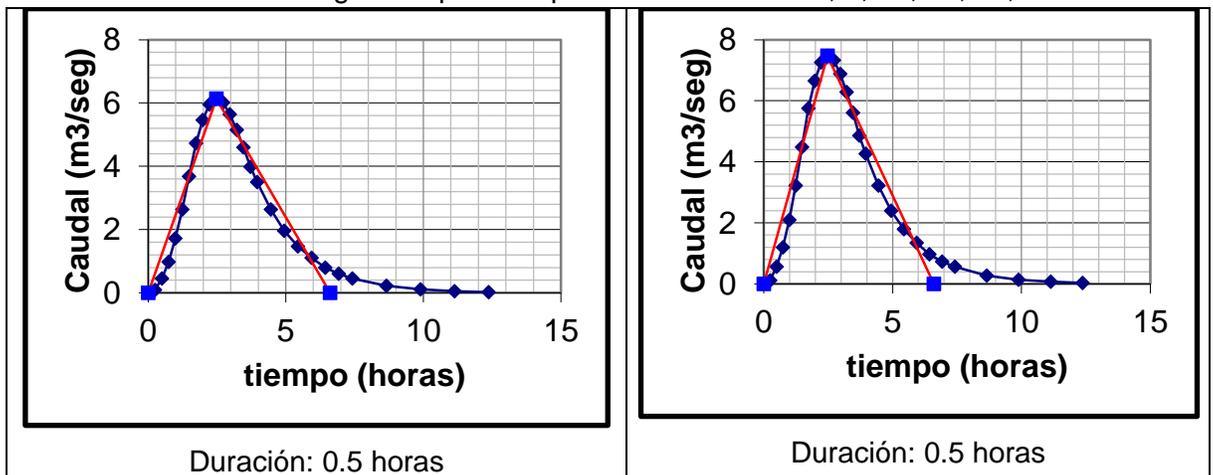


Fuente: HidrojING. Editado por: Suarez, 2016

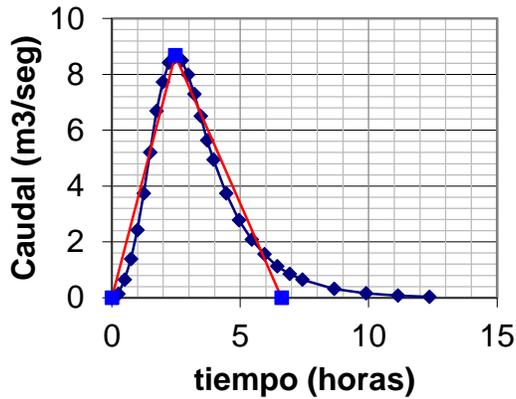
Los hietogramas referenciados anteriormente permiten observar el comportamiento de la precipitación en los periodos de retorno para el caso se registra un aumento en el transcurso de estos. La máxima precipitación es alcanzada durante los 30 minutos más lluviosos, en un segundo plano se tiene el intervalo con más precipitación a la derecha y a su izquierda se registra el tercer intervalo más lluvioso y así de forma continua hasta alcanzar 60 minutos a partir de lo descrito por Chow et al 1994.

En los Hidrogramas obtenidos (Gráfico 11) para los diferentes periodos de retorno, muestra el caudal de punta para determinada precipitación neta. En forma general se observa un ligero aumento en los caudales para el tiempo de duración de 0.5 horas o 30 minutos donde la precipitación varía desde 9.87 a 32.42 mm teniendo caudales totales Q_t de 40.5218 y 94.1405 m^3/seg para los periodos de retorno de 2 y 100 años respectivamente.

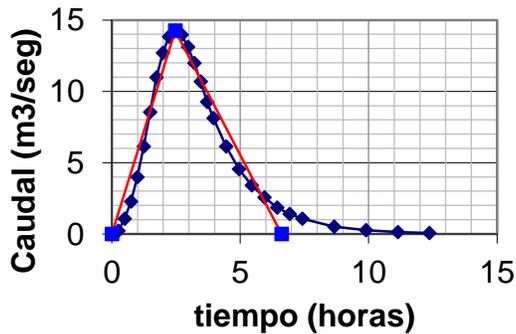
Gráfico 11. Hidrogramas para los periodos de retorno 2, 5, 10, 25, 50, 100.



Tiempo de retorno: 2 años
 Precipitación=9.87 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 72999 m³
 Qpunta= 6.14 m³/seg
 Qt= 40.5218 m³/seg



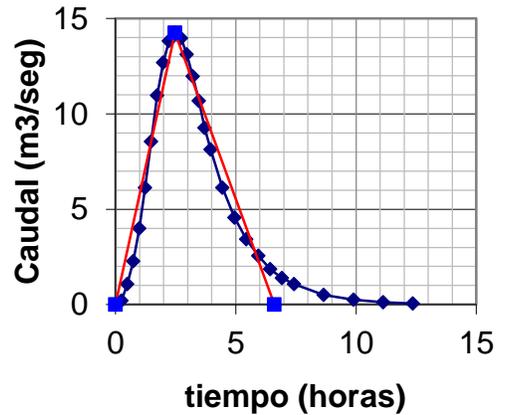
Duración: 0.5 horas
 Tiempo de retorno: 10 años
 Precipitación=13.96 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 103164 m³
 Qpunta= 8.68 m³/seg
 Qt= 57.3136 m³/seg



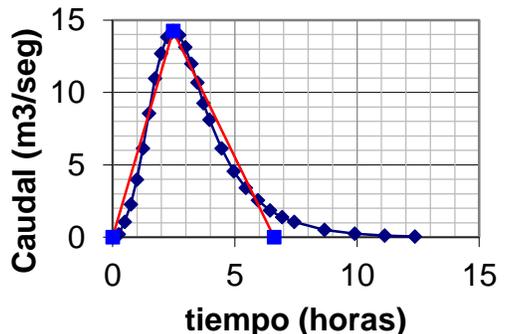
Duración: 0.5 horas
 Tiempo de retorno: 50 años
 Precipitación= 19.75 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 145953 m³
 Qpunta= 12.28 m³/seg
 Qt= 81.0847 m³/seg



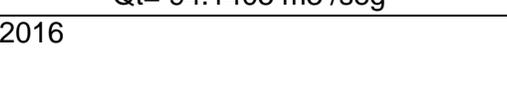
Tiempo de retorno: 5 años
 Precipitación=12.03 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 88902 m³
 Qpunta= 7.48 m³/seg
 Qt= 49.3898 m³/seg



Duración: 0.5 horas
 Tiempo de retorno: 25 años
 Precipitación=17.01 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 125704 m³
 Qpunta= 10.57 m³/seg
 Qt= 69.8355 m³/seg



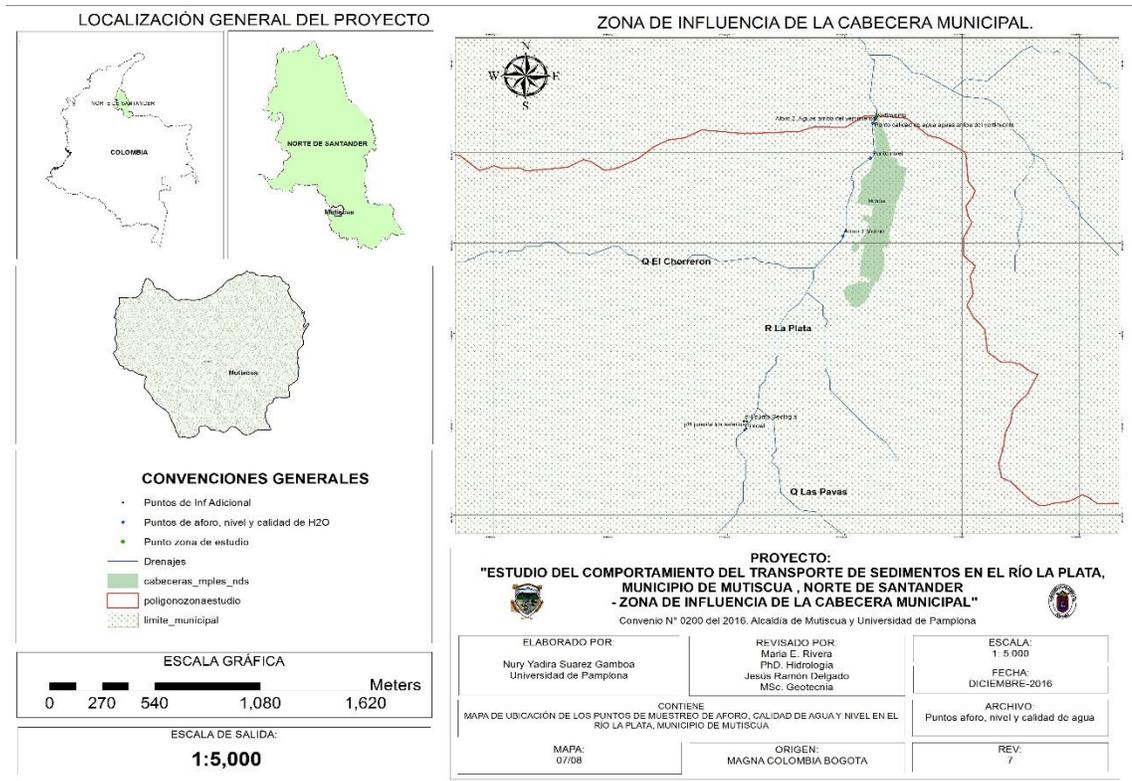
Duración: 0.5 horas
 Tiempo de retorno: 100 años
 Precipitación=22.93 mm
 Vt por área bajo el Hidrograma=
 169453 m³
 Qpunta= 14.25 m³/seg
 Qt= 94.1405 m³/seg



- **PUNTOS DE AFORO, NIVEL, CALIDAD DE AGUA**

En la imagen 17 se presentan los puntos seleccionados para los aforos, el muestreo de calidad, el punto de nivel de agua, así mismo se muestra información adicional que complementa este estudio.

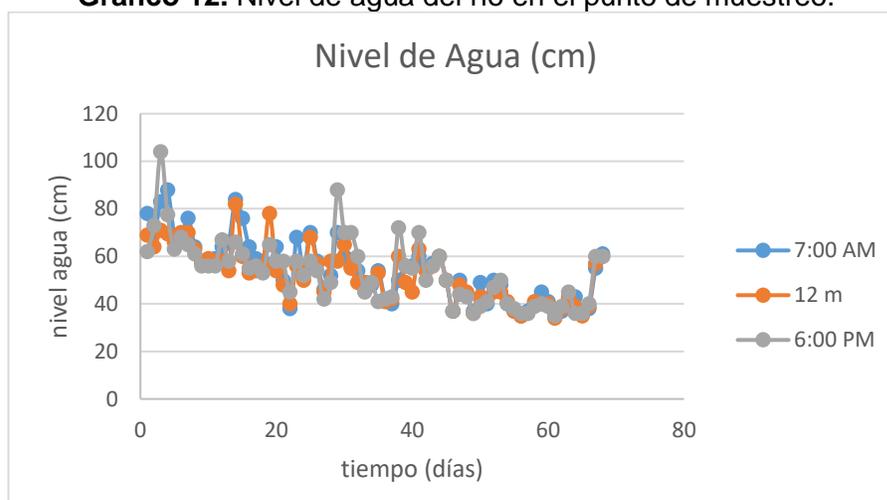
Imagen 16. Ubicación de los punto de aforo, nivel y muestro de calidad de agua.



Fuente: Suarez, 2016

Para el análisis del comportamiento del nivel de agua en el río La Plata se consideró una sección en la zona de estudio, primero se identificó el posible lugar seguido del levantamiento de la sección transversal cuyos resultados se presentan en el gráfico 12.

Gráfico 12. Nivel de agua del río en el punto de muestreo.



Fuente: Suarez, 2016

Del gráfico 12 se observa una variación en el tiempo asociada en mayor parte por las altas y bajas precipitaciones que se presentaron en el punto de estudio.

La relación entre la calidad de agua y los sedimentos está dada por los contaminantes físicos y los efectos que producen; así pues, altas cantidades de sedimento conllevan a generar mayor turbiedad impidiendo la entrada de luz solar en la columna de agua lo que genera el no crecimiento en las algas y plantas acuáticas o el desove de los peces (modificación del ecosistema acuático). FAO, 1997. En cuestión del tramo de estudio los sedimentos en época seca no influyen drásticamente en la turbiedad como lo harán en la época de altas precipitaciones que se observan ligeros aumentos en la turbiedad del cauce. La sedimentación en altos niveles en el cauce produce perturbación física y modificación de las características hidráulicas cuyos efectos son reflejados en la reducción de la profundidad, reducción de la capacidad de flujo y favorece las inundaciones, entre otros.

En la tabla 10 se observan los caudales obtenidos en los 2 puntos estratégicos.

Tabla 10. Aforos en Microcuenca - río La Plata.

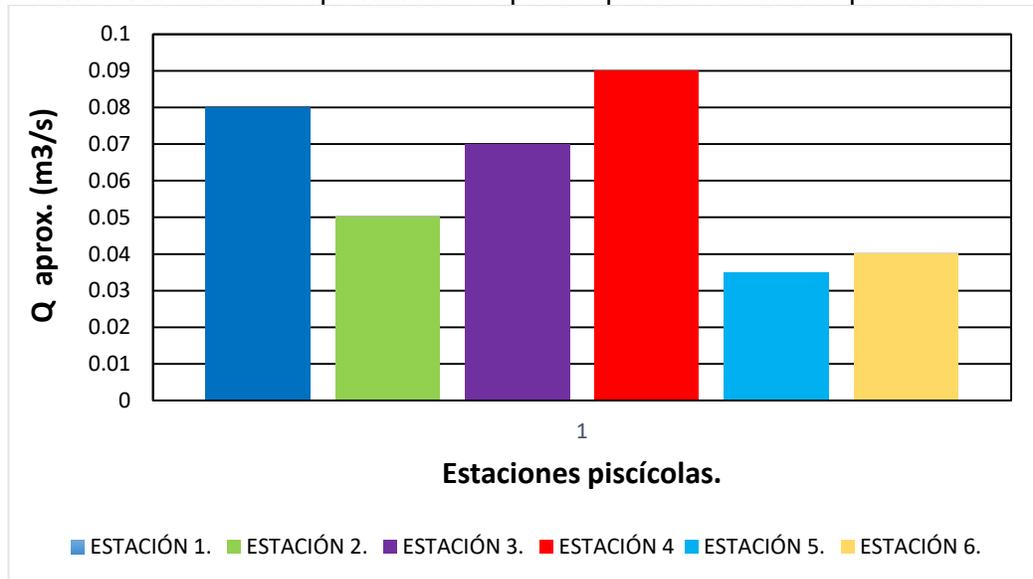
| Aforo | Lugar | Q (m ³ /s) | Q Molino - vertimiento/ (m ³ /s) |
|-------|--------------------------|-----------------------|---|
| 1 | Molino Monarca | 1.6768 | 0.1409 |
| | Aguas Arriba Vertimiento | 1.5359 | |
| 2 | Molino Monarca | 1.1754 | 0.4363 |
| | Aguas Arriba Vertimiento | 0.7391 | |

Fuente: Suarez, 2016

En la tabla anterior se observa una leve disminución de forma general entre el primer aforo y el segundo; sin embargo, cabe destacar que en el aforo efectuado en el punto correspondiente al molino Monarca o molinera Herrán se presentó un caudal (Q) mayor comparado con el aforo realizado aguas arriba del vertimiento cuyo decrecimiento se relaciona con las bajas precipitaciones y las captaciones de las estaciones piscícolas, Q captado aumenta de 0.1409 a 0.4363 m³/s aproximadamente.

Así pues, en el gráfico 13 se muestran los caudales aproximados que son captados por las estaciones piscícolas en las zona de influencia de la cabecera municipal – Río La Plata dichos caudales son los permitidos por las concesiones.

Gráfico 13. Caudales aproximados captados por las estaciones piscícolas.



Fuente: Suarez, 2016

Se describe en el gráfico 13 de manera general los caudales captados en mayor o menor proporción en función del tamaño de la estación piscícola siendo 0.09 m³/s y 0.035 m³/s los caudales captados respectivamente, además, se precisa que dichos caudales captados en su totalidad son 0.365 m³/s aprox., los cuales son devueltos a la fuente hídrica garantizándose el caudal ecológico pero disminuyendo la calidad del cauce aguas abajo puesto que de manera continua este recurso se capta en la estación se realiza el proceso y se devuelve y así sucesivamente a su paso.

En las tablas 11 y 12 se presentan los resultados del análisis fisicoquímico, microbiológico y pruebas complementarias de tipo básico para revisión de la calidad del agua que presenta el río La Plata del municipio de Mutiscua; este proceso se

efectúa en función de lo referenciado en el apartado 5.3 que relaciona la metodología para obtener información sobre la calidad de agua.

Tabla 11. Calidad de agua – muestra 1

| # de muestreo | Tipo de análisis | Parámetro | Aguas arriba del vertimiento | Aguas abajo del vertimiento | Puente los Salados |
|---------------|-------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 1 | Fisicoquímico | Color U Pt-Co | 20 | 20 | NA |
| | | Turbidez UNT | 5.89 | 8.74 | NA |
| | | pH | 8.35 | 8.10 | NA |
| | Microbiológico | Coliformes totales UFC/100cm ³ | 2520 | >2800 | NA |
| | | Escherichia Coli UFC/100cm ³ | 1650 | >2800 | NA |
| | Pruebas complementarias | Conductividad μ S/cm | 58.2 | 60.3 | NA |
| | | Dureza total mg/L CaCO ₃ | 23.6 | 26 | NA |
| | | Alcalinidad T mg/L CaCO ₃ | 29.5 | 26.6 | NA |
| | | Cloruros mg/L Cl ⁻ | 17.49 | 15.74 | NA |

NA: No aplica.

Fuente: EMPOPAMPLONA, 2016

Según la revisión de la normatividad colombiana de calidad de agua y en el caso específico la resolución 2115 del 2007 en el artículo 3 se referencian las características físicas, las cuales para el primer muestreo se obtiene que el color aparente se encuentra por encima de 15 UPC que es el valor máximo aceptable así mismo la turbiedad que presenta aumento entre el muestreo antes 5.89 y después del vertimiento 8.74 UNT siendo 2 el valor que acepta la norma por lo tanto **no es apta para consumo humano directo**.

Por otra parte la alcalinidad total se encuentra por debajo del valor máximo aceptable (200 mg/L) reflejándose una ligera disminución y la conductividad para los dos puntos aguas arriba y aguas abajo que se encuentran por debajo del valor máximo; sin embargo se evidencia un aumento de 58.2 a 60.3 μ S/cm dado por la cantidad de solidos disueltos en este caso por el mismo vertimiento. Así mismo, la dureza total de valor máximo permisible es de 300 mg/L en donde hay un aumento constituido principalmente por la presencia de jabón principalmente. También, dada la presencia de E- Coli y Coliformes totales tanto aguas arriba del vertimiento como aguas abajo del mismo en menor y mayor proporción respectivamente para consumo humano directo son entes de riesgo para la salud.

Tabla 12. Calidad de agua – muestra 2

| # de muestra | Tipo de análisis | Parámetro | Aguas arriba del vertimiento | Aguas abajo del vertimiento | Puente los Salados |
|--------------|-------------------------|---|------------------------------|-----------------------------|--------------------|
| 2 | Fisicoquímico | Color U Pt-Co | 20 | 20 | 20 |
| | | Turbidez UNT | 7.98 | 10.7 | 5.16 |
| | | pH | 7.69 | 7.55 | 8.08 |
| | Microbiológico | Coliformes totales UFC/100cm ³ | Valor estimado > 2800 | Valor estimado > 2800 | NA |
| | | Escherichia Coli UFC/100cm ³ | Valor estimado > 2800 | Valor estimado > 2800 | NA |
| | Pruebas complementarias | Conductividad \square S/cm | 72.9 | 74.5 | 45.5 |
| | | Dureza total mg/L CaCO ₃ | 40.2 | 35 | 19.7 |
| | | Alcalinidad T mg/L CaCO ₃ | 33.2 | 30 | 19.9 |
| | | Cloruros mg/L Cl ⁻ | 13.99 | 13.99 | 24.48 |

NA: No aplica.

Fuente: EMPOPAMPLONA, 2016

De la tabla 12 se determina que se mantiene el color de 20 Unidades platino-cobalto (U Pt-Co) siendo el valor máximo permisible; por otra parte, el cambio de turbiedad es evidente encontrándose por encima del valor máximo aceptable (2 UNT) incluso en el punto del puente Los Salados cuyo resultado arrojado es 5.16 UNT, así mismo, la turbiedad aguas arriba del vertimiento corresponde a 7.98 UNT y 10.7 UNT aguas abajo del vertimiento variación presentada principalmente por los diferentes aportes y modificaciones de las características a las que es expuesto el recurso hídrico (vertimiento directo y desagüe de las estaciones piscícolas principalmente). De manera general, el pH se encuentra dentro del rango de 6.5 – 9.0 permitiendo que el agua sea de consumo humano pero las características dadas por el análisis microbiológico conllevan a determinar un puntaje de riesgo de 15 por la presencia de Coliformes totales y 25 de acuerdo a la Escherichia Coli constituyendo afectación directa a la salud humana según las consideraciones de la Resolución 2115 de 2007.

La conductividad va en aumento iniciando por 45.5 \square S/cm en el puente los salados, 72.9 aguas arriba del vertimiento y 74.5 aguas abajo del vertimiento variación relacionada con la cantidad de sólidos disueltos que se incorporan al cauce en su transcurso; de igual manera la dureza se ve influenciada por los carbonatos de

calcio incluidos, en cuanto a los cloruros estos se mantienen antes y después del vertimiento y son en mayor proporción los que se observan en la muestra adquirida en el puente.

Así pues, de manera general el decreto 1594 de 1984 relaciona la priorización de los parámetros a evaluar en función de los usos del agua y residuos líquidos siendo como soporte la resolución 2115 de 2007 relacionando los valores máximos aceptables mostrando que la calidad de agua del río La Plata no es apta para consumo humano de manera directa sin previo tratamiento.

El uso del recurso para riego según la adaptación de Ayers y Westcot, 1985 permiten observar que la conductividad se encuentra dentro del rango de 0- 3 dS/cm (decisiemen), así mismo los cloruros entran en el rango de 0- 30 y el pH óptimo de rango normal es de 6.5 a 8.4 siendo esta apta para riego; sin embargo, se destaca que este proceso debe ir acompañado del estudio de suelos específico y revisión de los requerimientos de cada cultivo corroborando lo dicho por la FAO (2006).

Desde el punto de vista de la piscicultura, actividad que se practica en el río La Plata parte del municipio de Mutiscua es necesario mencionar que la turbiedad es inferior a 25 mg/l, por lo cual, la turbidez mineral en su mayor parte es de tipo débil, además otro factor relevante en la producción piscícola es la temperatura del agua para la determinación del tipo de pez según la FAO (2006); no obstante, en el municipio principalmente se tienen en las estaciones piscícolas trucha arcoíris puesto que por sus características se ha adaptado satisfactoriamente a las condiciones de la zona

8.4. GEOLOGÍA

En la cuenca es posible evidenciar depósitos fluviotorrenciales con bloques de esquistos micáceos con granates de la formación Silgará pds (Quebrada El Chorrerón). Por otra parte, se tiene gran cantidad de mármoles incluyendo el mármol caliza con venas de calcita negra (Fotografía 12a), además, se tienen rocas metamórficas como el cuarzo con venas posgenéticas, en la parte baja se observan bloques traídos por corriente torrencial y que posteriormente estos son retenidos por la morfología del cauce (Fotografía 12b); estos se dice que son transportados por su forma subredondeados indicando distancia de transporte.

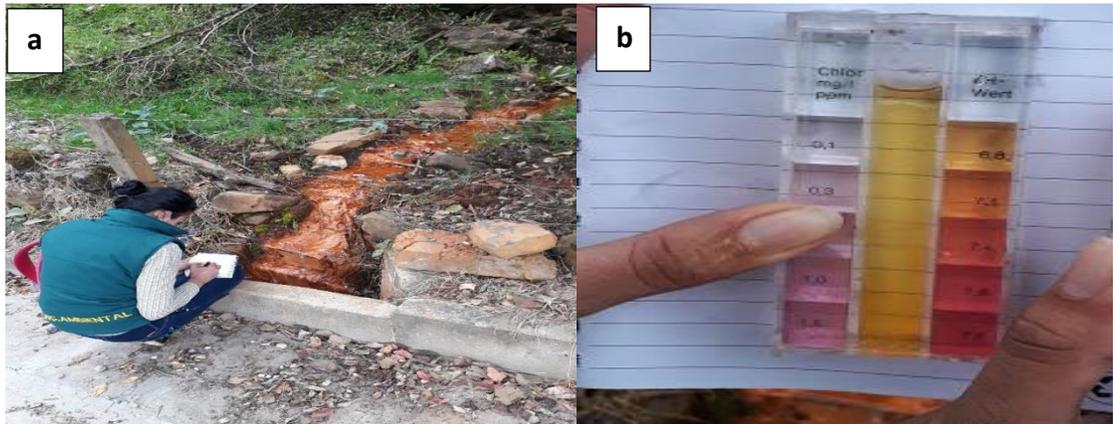
Fotografía 12. Bloques transportados y mármol con venas de calcita.



Fuente: Suarez, 2016

En la parte alta correspondiente a las cercanías del puente Los Salados se tiene coloración rojiza en un afluente pequeño que puede ser presentado según Teton Jacques (2003) por algún tipo de alga (rodofíceas) indicando la existencia de minerales con algún contenido de hierro (Fotografía 13a); por otra parte, el pH es ácido de aproximadamente 6.8 unidades de pH (ver Fotografía 13b). Los pH muy bajos indican que este afluente en su recorrido pasa a través de piritas siendo el agua de tipo acidulado.

Fotografía 13. Minerales con algún contenido de hierro y agua de pH ácido



Fuente: Suarez, 2016

Así mismo, aguas abajo del puente los Salados (coordenadas N 1146297 W 1298016 y Z 2727 msnm) se tienen minerales en el margen izquierdo con presencia de carbonatos (efervescencia). (Fotografía 14).

Fotografía 14. Minerales con presencia de carbonatos.



Fuente: Suarez, 2016

Se resalta que en la zona de estudio de manera general, predominan las rocas metamórficas como: mármoles, esquistos y filitas; las cuales son producto de la transformación de rocas sedimentarias como arcillas y limonitas. Hay buena vegetación que se asocia al clima de la zona.

Otro punto importante es la Geología de la microcuenca del río La Plata a partir de la geomorfología que permite la revisión de las características y rasgos de la superficie; en el caso el área que corresponde al municipio de Mutiscua presenta relieve que va desde zonas moderadamente suave a zonas con relieve abrupto con cerros escarpados. La meteorización es poco intensa en los cerros de Relumbrante y Ventanas pero hacia las pendientes suaves, la meteorización se hace más notoria donde se presentan los afloramientos.

En la zona existe una zona baja que corresponde al río La Plata o el comúnmente denominado valle del Río La Plata siendo su delimitación son dos montañas de lado y lado reflejándose un alto grado de disección causado por el río La Plata. En la mayoría de la zona se tienen unidades geomorfológicas de tipo S (de origen

denudacional – estructural) porque su topografía es ondulada con drenajes predominantemente relacionados a fallas, patrones de esquistosidad y contactos litológicos (Ávila. G & Gómez. S, 2006).

Así mismo, los mapas bases de geología (Pbot del municipio de Mutiscua, 2016) para la zona de estudio permiten observar las fallas de: Mutiscua, La Laguna y Socotá; bajo la formación: Neis de Bucaramanga, Silgara y un deposito glacial en el recorrido del cauce.

Con respecto al transporte de sedimentos que se ha venido presentando a lo largo del tiempo en la zona de estudio se aprecia en las fotografías 15a y 15b la disposición de las rocas en los márgenes del cauce las cuales son isométricas, la primera dispuesta en desorden y la segunda 6b dispuesta de manera horizontal una sobre otra. Así pues en la fotografía 16 se observan algunas formas de las rocas y sus cortes.

Fotografía 15. Disposición de rocas en el margen.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 16. Fracturamiento de roca.



Fuente: Suarez, 2016

De igual manera en la fotografía 17 se puede observar algunas rocas del margen o banco del cauce que presentan desgastes que pueden estar relacionadas con desgaste por la corriente; por consiguiente, en la fotografía 18 se evidencian bloques y rocas de tamaño considerado en el cauce que fueron transportados en algún momento por la corriente torrencial que llego a producirse.

Fotografía 17. Desgaste en rocas por acción de la corriente.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 18. Bloques transportados.

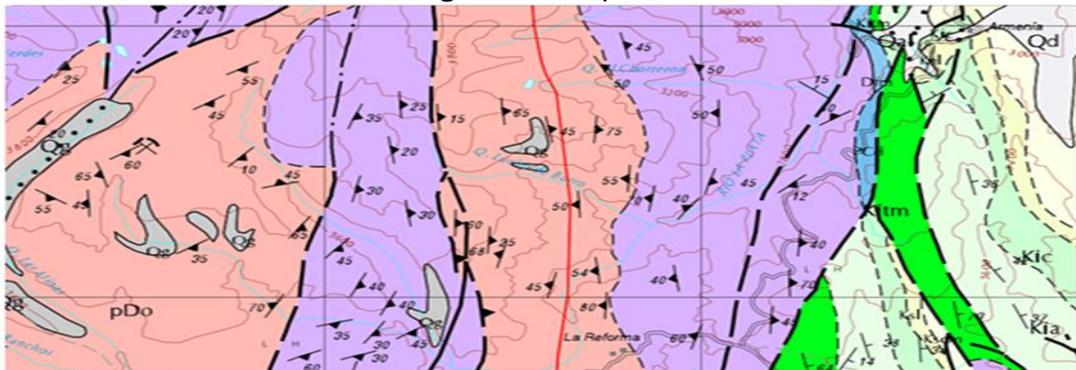


Fuente: Suarez, 2016

La clasificación dada para suelos por INGEOMINAS en su mapa H13 (imagen 18) se tiene en primera instancia sobre el cauce la falla de La Laguna, Socotá y la falla de Mutiscua, así mismo, se presentan rocas estratificadas del depósito glacialico (Qg) del pleistoceno y cuaternario, también, se tienen Rocas ígneas del predevónico, Ortoneis como las pDo: Neis cuarzo, monzonitico y granodionitico, con presencia de pDs con discordancia angular de la formación silgará: Filita, esquistos y Cuarcita la mayoría de grado metamórfico bajo a medio con lo cual se corroboran las observaciones de campo. Por otra parte, la FAO en su mapa (imagen 19 b)

presenta la zona del municipio de Mutiscua la cual se caracteriza por que sus suelos presentan bajos contenidos de bases intercambiables (Cambisoles districos – CMD) y suelos con altos contenidos de materia orgánica (Cambisoles Húmicos – Cmu), asociados con suelos que tienen abundantes fragmentos rocosos (código 15), también, se referencia que son suelos con altos contenidos de materia orgánica y baja saturación de bases intercambiables (Cambisoles Húmicos – Cmu) y suelos con baja saturación de bases intercambiables (Cambisoles distríticos – CMD), con inclusiones de suelos derivados a partir de cenizas volcánicas, algunas con altos contenidos vidrio volcánico (Andosoles vitricos – Anz), y otros con altos contenidos de materia orgánica (Andosoles úmbricos – Anu), texturas medias, pendientes moderadas y fuertes, ubicados en montaña, (referencia código 28). Según el IGAC (1994) en su mapa (Imagen 19 a) el municipio de Mutiscua se caracteriza por tener suelos de paisaje montañoso reflejándose suelos de climas cálidos, secos y húmedos generalmente saturados, sin embargo de forma habitual, son suelos de clima muy fríos, húmedos a muy húmedos, en áreas de páramos, ácidos, desaturados (Humitropepts, Dystropepts, Vitruands, Fulvudans, Troporthents, Tropofibrists, Tropohemists). (Código 1 y 9 respectivamente).

Imagen 17. Mapa H13



Fuente: IGAC, 2016.

Imagen 18. Mapa FAO y mapa IGAC 1994.



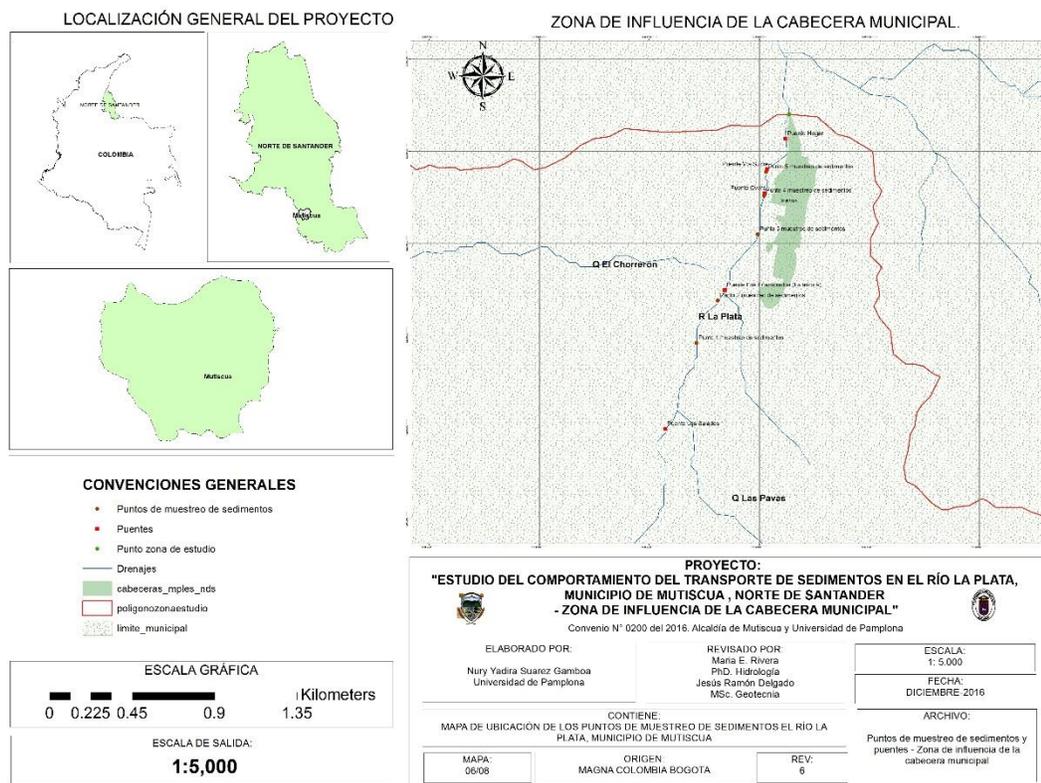
Fuente: Suelos de Colombia, 2016.

8.5. ANALISIS DE SEDIMENTOS

• PUNTOS DE MUESTREO DE SEDIMENTOS

En la imagen 20 se observan los 5 puntos seleccionados para el muestreo de sedimentos, los cuales se definieron mediante visita previa y levantados empleando GPSmap 76CSx; así mismo, en el mapa se pueden visualizar los puntos correspondientes a los puentes que se encuentran en la zona de estudio 2 de ellos son comunicación entre la vía que dirige a la vereda la Plata y otro a la vereda Sucre, San Isidro, Tapagua, Valegrá y Ospina, los otros 3 puentes son el acceso a fincas y al Hogar Juvenil Campesino del municipio.

Imagen 19. Puntos de muestro de sedimentos en el Río La Plata.



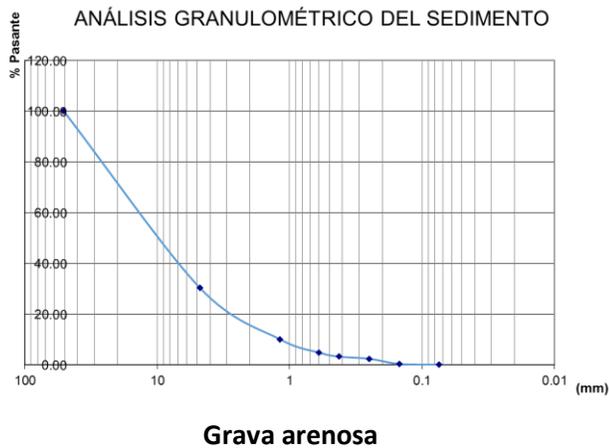
Fuente: Suarez, 2016

• GRANULOMETRÍA DEL SEDIMENTO

Con respecto a la caracterización y granulometría de los sedimentos en los diferentes puntos de medición (gráficos 14 a 23) se observa que la granulometría

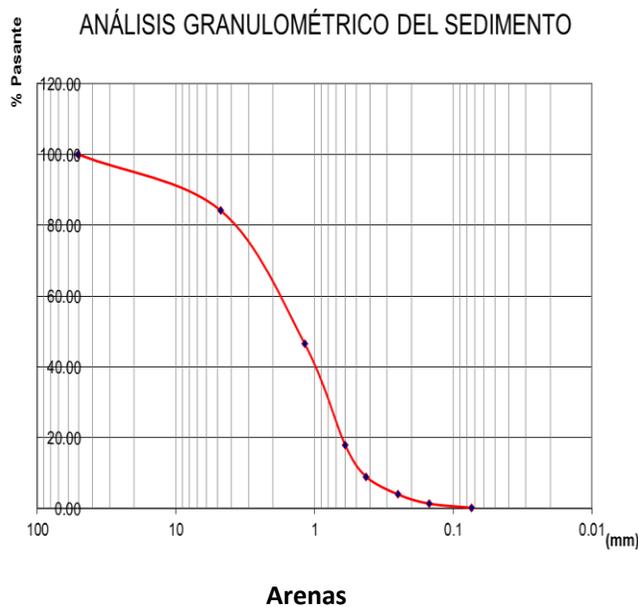
del cauce y su margen de manera general son gravas finas, arenas gruesas, finas y medias en mayor o menor proporción dependiendo del punto de muestreo e influenciado por las precipitaciones del lugar y las características del flujo, con lo cual se corrobora lo dicho por el experto en Geología Jesús Ramón Delgado Rodríguez, es decir, presenta grandes bloques que forman parte de la geología del río La Plata y en su momento pudieron ser arrastradas por corrientes torrenciales para el caso de los bloques transportados.

Gráfico 2. Caracterización granulométrica del punto 1, zona del cauce.



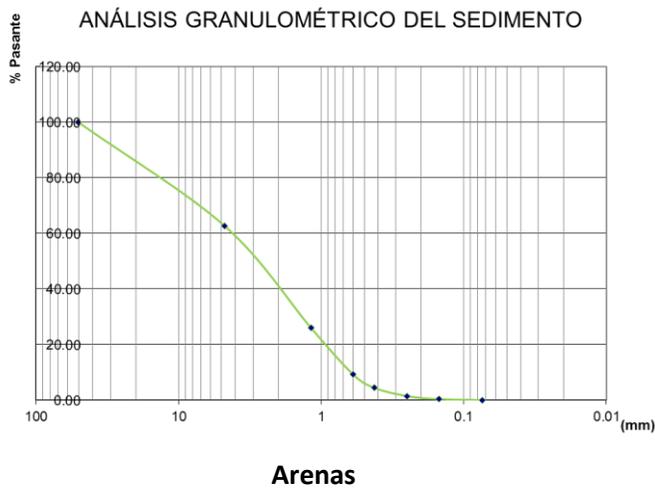
Muestreo 1

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 30.31 | 69.69 |
| Nº16 | 10.04 | 20.27 |
| Nº30 | 4.85 | 5.19 |
| Nº40 | 3.26 | 1.59 |
| Nº60 | 2.42 | 0.84 |
| Nº100 | 0.38 | 2.04 |
| Nº200 | 0.07 | 0.32 |



Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 84.15 | 15.85 |
| Nº16 | 46.52 | 37.63 |
| Nº30 | 17.77 | 28.76 |
| Nº40 | 8.96 | 8.80 |
| Nº60 | 3.96 | 5.00 |
| Nº100 | 1.35 | 2.61 |
| | 0.20 | 1.15 |

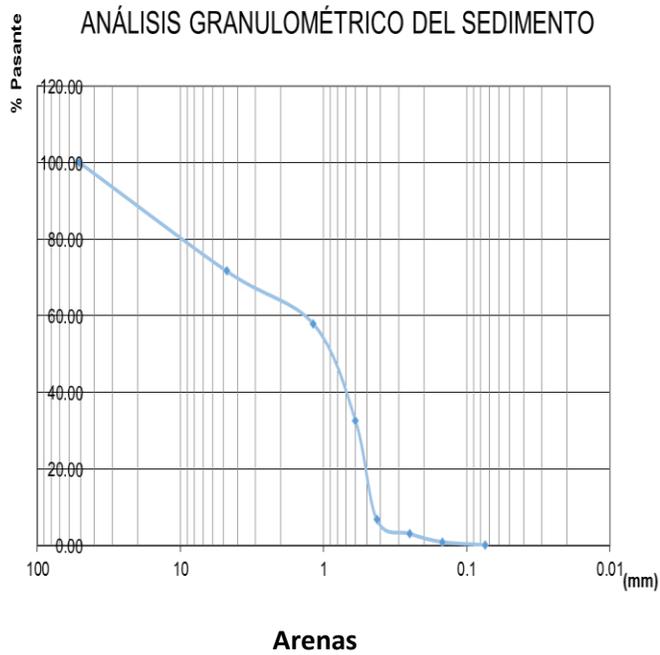


Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 62.62 | 37.38 |
| Nº16 | 25.97 | 36.65 |
| Nº30 | 9.30 | 16.67 |
| Nº40 | 4.42 | 4.88 |
| Nº60 | 1.45 | 2.97 |
| Nº100 | 0.32 | 1.12 |
| Nº200 | 0.02 | 0.30 |

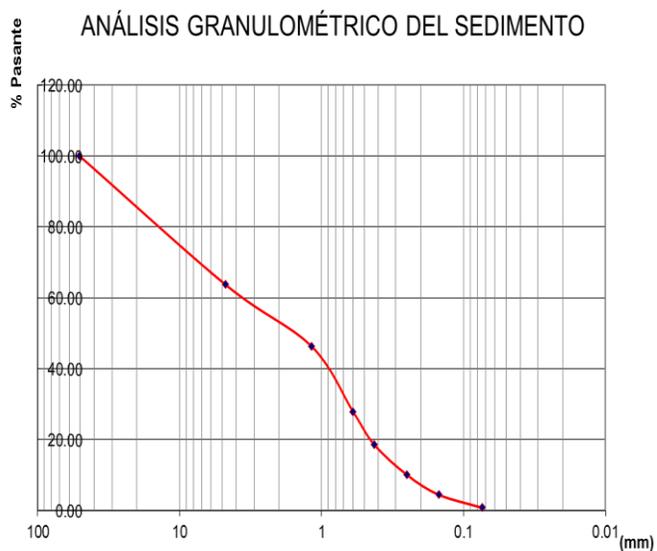
Fuente: Suarez, 2016

Gráfico 3. Caracterización granulométrica del punto 1, zona del margen.



Muestreo 1

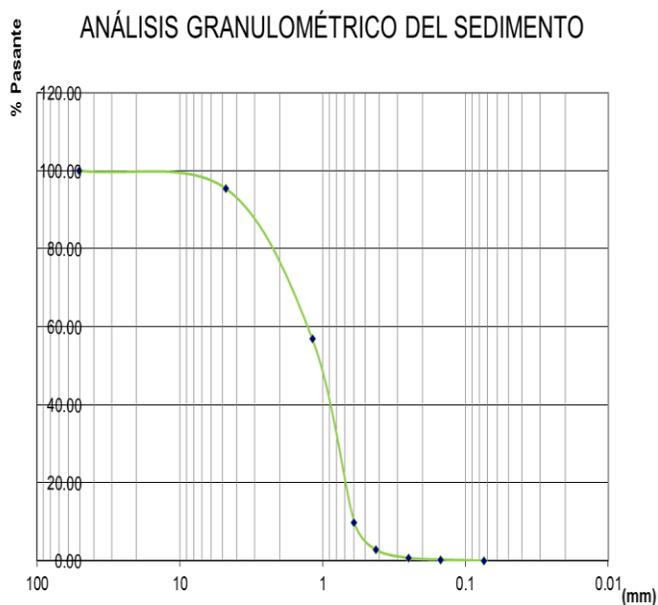
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 71.66 | 28.34 |
| Nº16 | 57.86 | 13.80 |
| Nº30 | 32.67 | 25.19 |
| Nº40 | 6.72 | 25.95 |
| Nº60 | 3.11 | 3.61 |
| Nº100 | 0.97 | 2.14 |
| Nº200 | 0.14 | 0.83 |



Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 63.73 | 36.27 |
| Nº16 | 46.36 | 17.37 |
| Nº30 | 27.87 | 18.49 |
| Nº40 | 18.57 | 9.30 |
| Nº60 | 10.05 | 8.52 |
| Nº100 | 4.47 | 5.58 |
| Nº200 | 0.81 | 3.66 |

Arenas



Muestreo 3

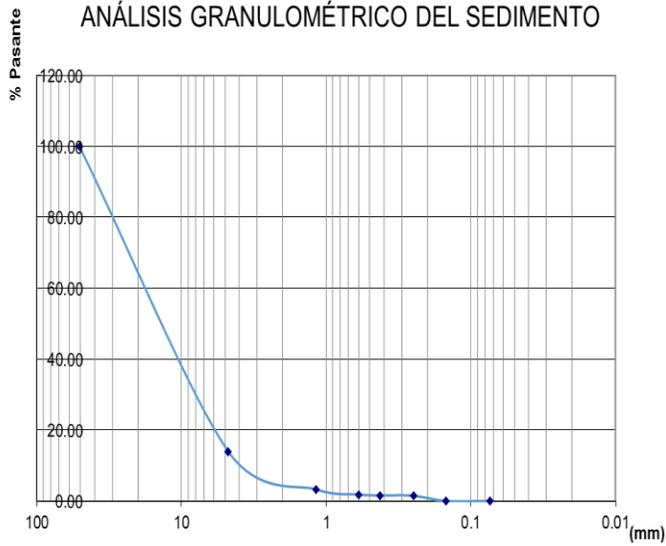
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 95.41 | 4.59 |
| Nº16 | 56.84 | 38.57 |
| Nº30 | 9.88 | 46.96 |
| Nº40 | 2.90 | 6.98 |
| Nº60 | 0.73 | 2.17 |
| Nº100 | 0.31 | 0.42 |
| Nº200 | 0.02 | 0.29 |

Arenas

Fuente: Suarez, 2016

Gráfico 4. Caracterización granulométrica del punto 2, zona del cauce.

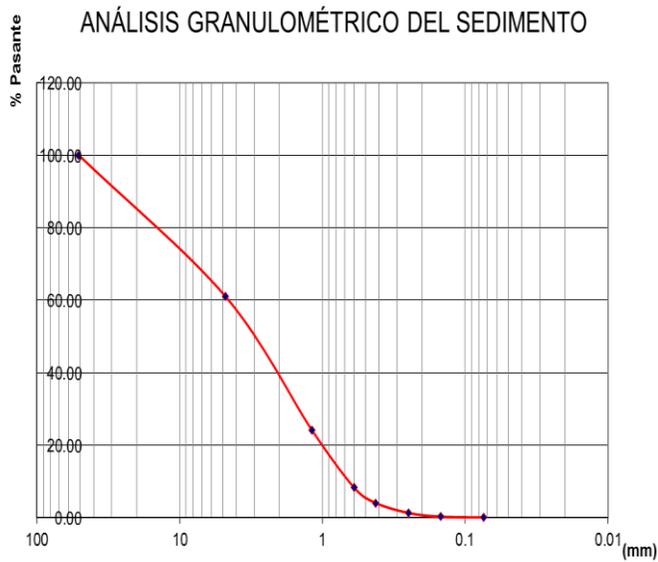
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO



Muestreo 1

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 14.01 | 85.99 |
| Nº16 | 3.32 | 10.70 |
| Nº30 | 1.85 | 1.47 |
| Nº40 | 1.61 | 0.23 |
| Nº60 | 1.51 | 0.10 |
| Nº100 | 0.04 | 1.47 |
| Nº200 | 0.03 | 0.01 |

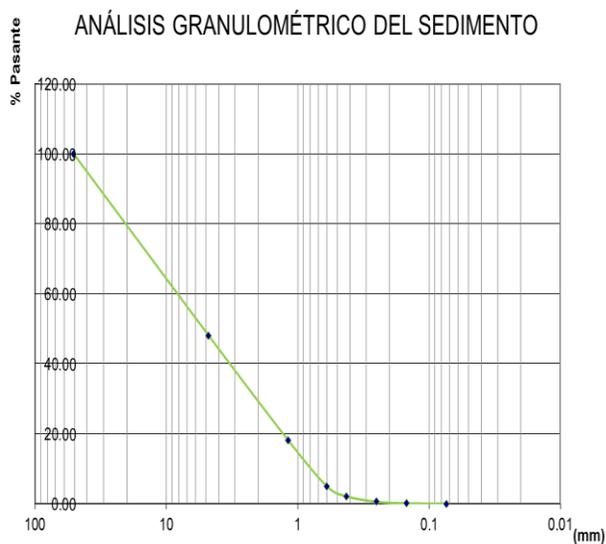
Grava arenosa



Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 60.98 | 39.02 |
| Nº16 | 24.08 | 36.90 |
| Nº30 | 8.34 | 15.73 |
| Nº40 | 4.12 | 4.22 |
| Nº60 | 1.34 | 2.78 |
| Nº100 | 0.32 | 1.02 |
| Nº200 | 0.07 | 0.25 |

Arenas



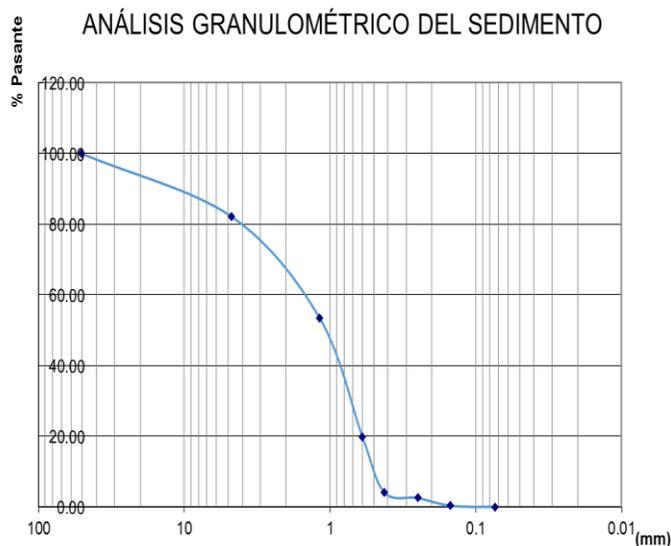
Grava arenosa

Fuente: Suarez, 2016

Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 48.06 | 51.94 |
| Nº16 | 18.13 | 29.93 |
| Nº30 | 5.03 | 13.11 |
| Nº40 | 2.12 | 2.90 |
| Nº60 | 0.56 | 1.56 |
| Nº100 | 0.12 | 0.44 |
| Nº200 | 0.03 | 0.08 |

Gráfico 5. Caracterización granulométrica del punto 2, zona del margen.

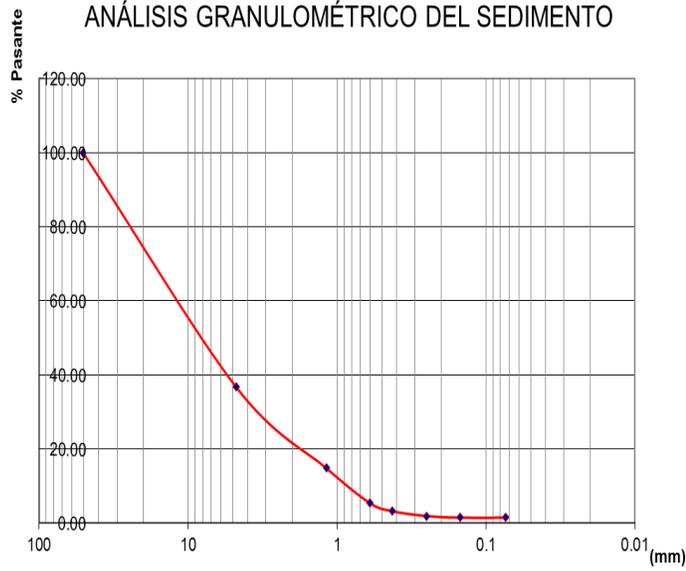


Arenas

Muestreo 1

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 82.21 | 17.79 |
| Nº16 | 53.54 | 28.67 |
| Nº30 | 19.92 | 33.62 |
| Nº40 | 4.19 | 15.73 |
| Nº60 | 2.60 | 1.58 |
| Nº100 | 0.40 | 2.20 |
| Nº200 | 0.04 | 0.36 |

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO

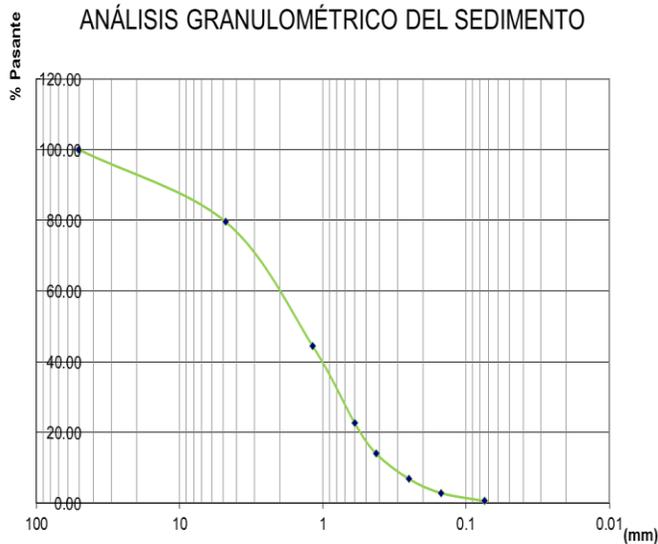


Grava arenosa

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 36.69 | 63.31 |
| Nº16 | 14.80 | 21.89 |
| Nº30 | 5.37 | 9.44 |
| Nº40 | 3.21 | 2.16 |
| Nº60 | 1.90 | 1.31 |
| Nº100 | 1.46 | 0.44 |
| Nº200 | 1.43 | 0.03 |

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO



Arenas

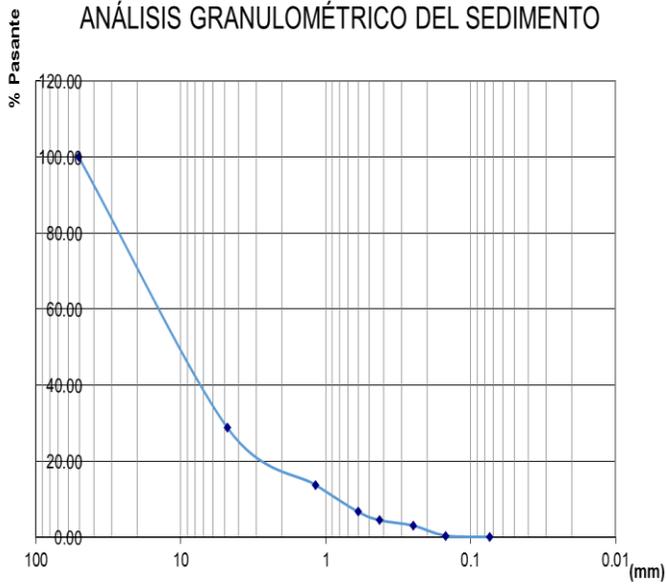
Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 79.53 | 20.47 |
| Nº16 | 44.46 | 35.07 |
| Nº30 | 22.66 | 21.80 |
| Nº40 | 14.02 | 8.64 |
| Nº60 | 6.84 | 7.18 |
| Nº100 | 2.86 | 3.98 |
| Nº200 | 0.60 | 2.26 |

Fuente: Suarez, 2016

Gráfico 6. Caracterización granulométrica del punto 3, zona del cauce.

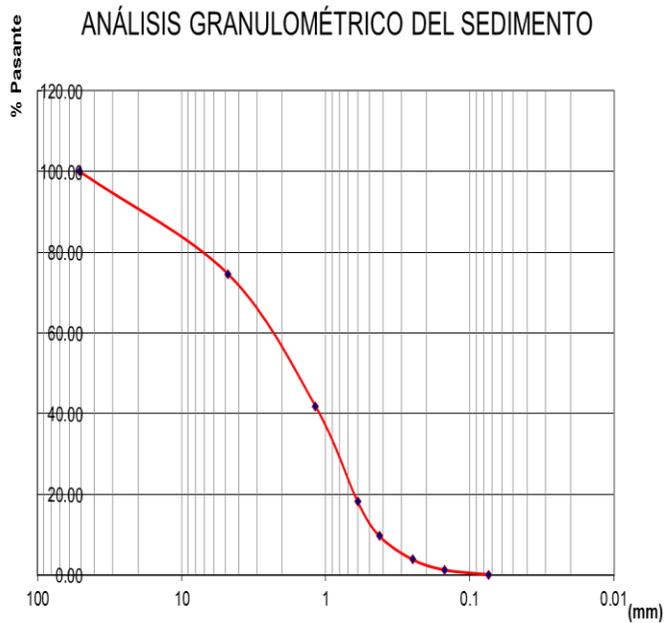
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO



Grava arenosa

Muestreo 1

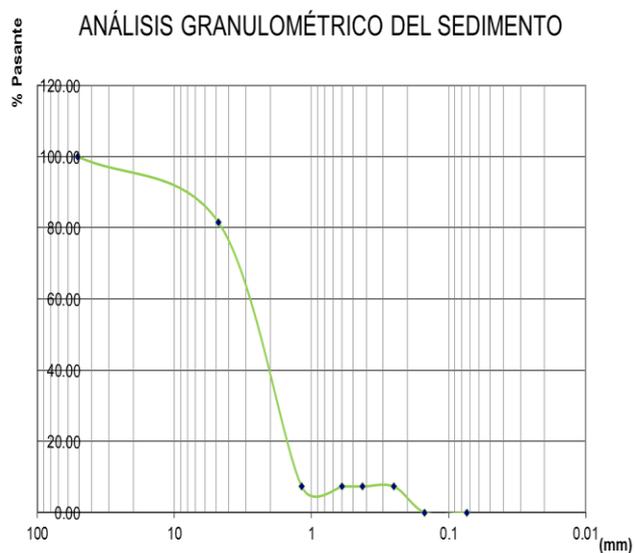
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 28.71 | 71.29 |
| Nº16 | 13.79 | 14.91 |
| Nº30 | 6.73 | 7.07 |
| Nº40 | 4.48 | 2.24 |
| Nº60 | 3.09 | 1.40 |
| Nº100 | 0.42 | 2.66 |
| Nº200 | 0.10 | 0.32 |



Arenas

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 74.63 | 25.37 |
| Nº16 | 41.91 | 32.72 |
| Nº30 | 18.15 | 23.76 |
| Nº40 | 9.68 | 8.46 |
| Nº60 | 3.85 | 5.84 |
| Nº100 | 1.27 | 2.58 |
| Nº200 | 0.12 | 1.15 |



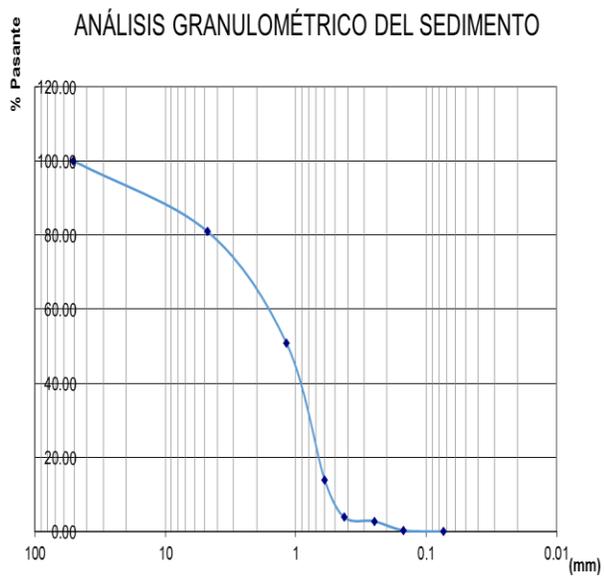
Arenas

Fuente: Suarez, 2016

Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 81.45 | 18.55 |
| Nº16 | 7.33 | 74.12 |
| Nº30 | 7.33 | 0.00 |
| Nº40 | 7.33 | 0.00 |
| Nº60 | 7.33 | 0.00 |
| Nº100 | 0.00 | 7.33 |
| Nº200 | 0.00 | 0.00 |

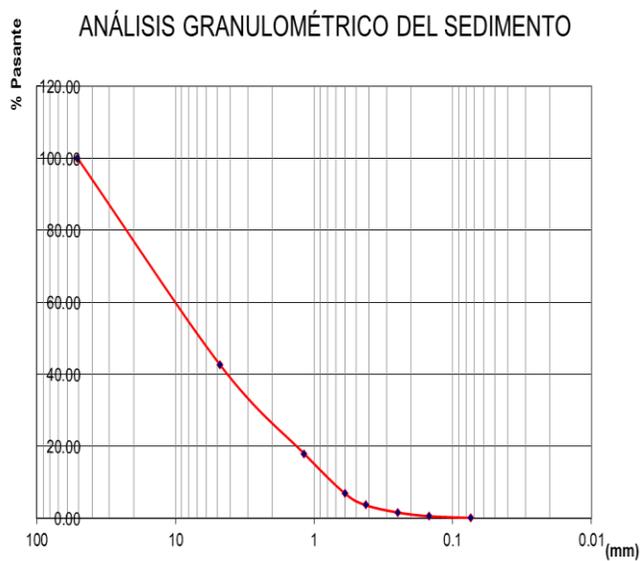
Gráfico 7. Caracterización granulométrica del punto 3, zona del margen.



Arenas

Muestreo 1

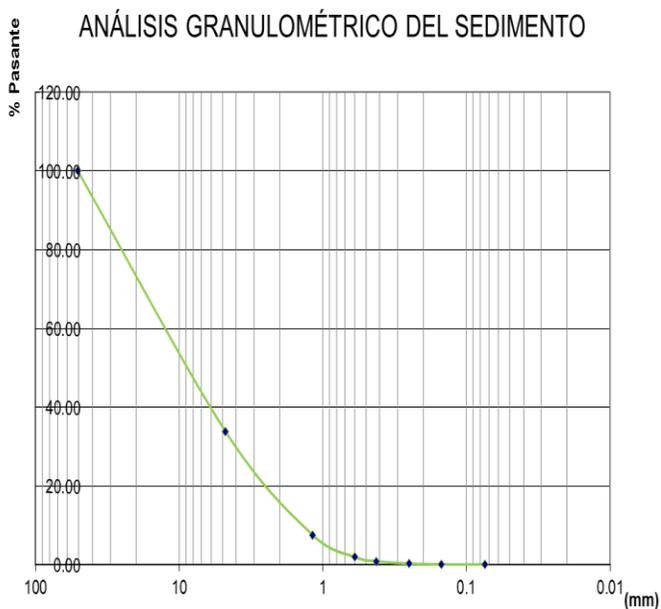
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 80.95 | 19.05 |
| Nº16 | 50.82 | 30.13 |
| Nº30 | 13.83 | 36.98 |
| Nº40 | 3.83 | 10.00 |
| Nº60 | 2.78 | 1.04 |
| Nº100 | 0.31 | 2.47 |
| Nº200 | 0.04 | 0.27 |



Grava arenosa

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 42.58 | 57.42 |
| Nº16 | 17.96 | 24.62 |
| Nº30 | 6.93 | 11.03 |
| Nº40 | 3.68 | 3.26 |
| Nº60 | 1.63 | 2.05 |
| Nº100 | 0.60 | 1.03 |
| Nº200 | 0.09 | 0.51 |



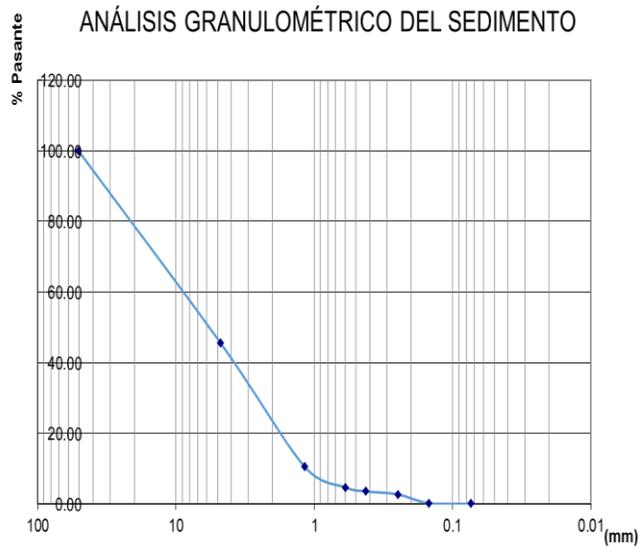
Grava arenosa

Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 33.84 | 66.16 |
| Nº16 | 7.62 | 26.22 |
| Nº30 | 2.00 | 5.62 |
| Nº40 | 0.90 | 1.10 |
| Nº60 | 0.29 | 0.61 |
| Nº100 | 0.10 | 0.19 |
| Nº200 | 0.03 | 0.07 |

Fuente: Suarez, 2016

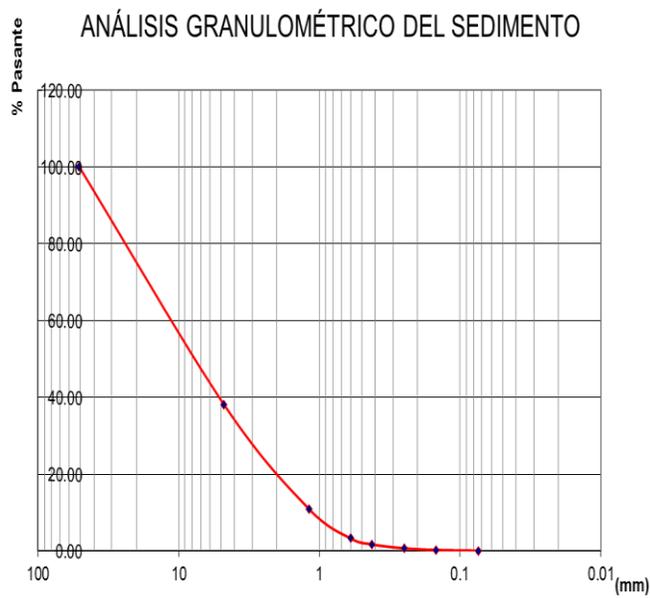
Gráfico 8. Caracterización granulométrica del punto 4, zona del cauce.



Grava arenosa

Muestreo 1

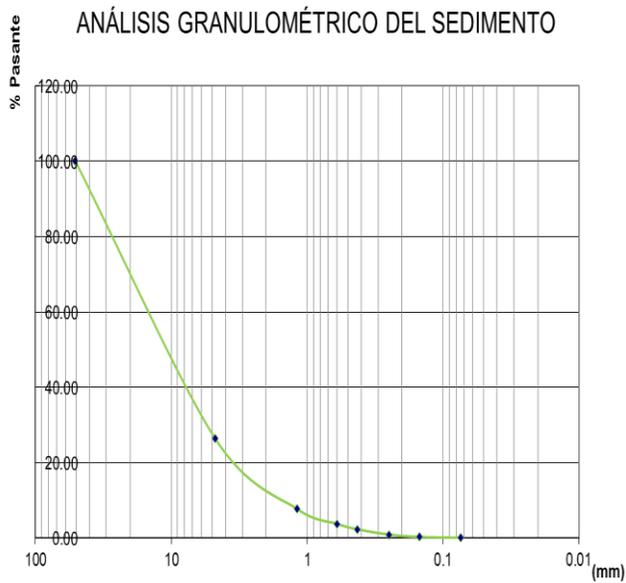
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| N°4 | 45.53 | 54.47 |
| N°16 | 10.62 | 34.91 |
| N°30 | 4.77 | 5.85 |
| N°40 | 3.60 | 1.17 |
| N°60 | 2.77 | 0.84 |
| N°100 | 0.26 | 2.51 |
| N°200 | 0.09 | 0.17 |



Grava arenosa

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| N°4 | 38.09 | 61.91 |
| N°16 | 10.85 | 27.24 |
| N°30 | 3.27 | 7.57 |
| N°40 | 1.72 | 1.56 |
| N°60 | 0.69 | 1.03 |
| N°100 | 0.26 | 0.43 |
| N°200 | 0.07 | 0.19 |



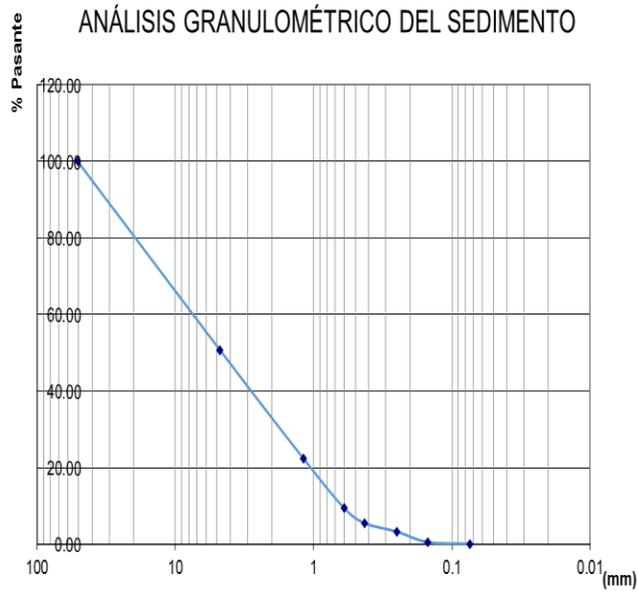
Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 26.44 | 73.56 |
| Nº16 | 7.66 | 18.78 |
| Nº30 | 3.75 | 3.91 |
| Nº40 | 2.31 | 1.44 |
| Nº60 | 0.92 | 1.39 |
| Nº100 | 0.27 | 0.65 |
| Nº200 | 0.05 | 0.22 |

Grava arenosa

Fuente: Suarez, 2016

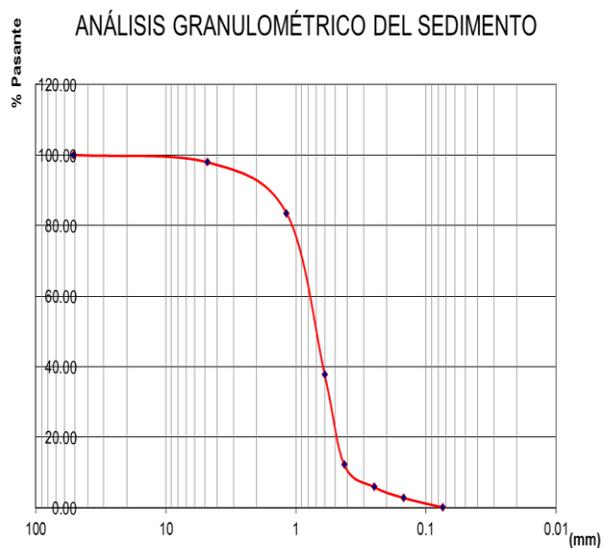
Gráfico 9. Caracterización granulométrica del punto 4, zona del margen.



Muestreo 1

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 50.77 | 49.23 |
| Nº16 | 22.34 | 28.44 |
| Nº30 | 9.43 | 12.90 |
| Nº40 | 5.49 | 3.94 |
| Nº60 | 3.30 | 2.19 |
| Nº100 | 0.55 | 2.75 |
| Nº200 | 0.13 | 0.42 |

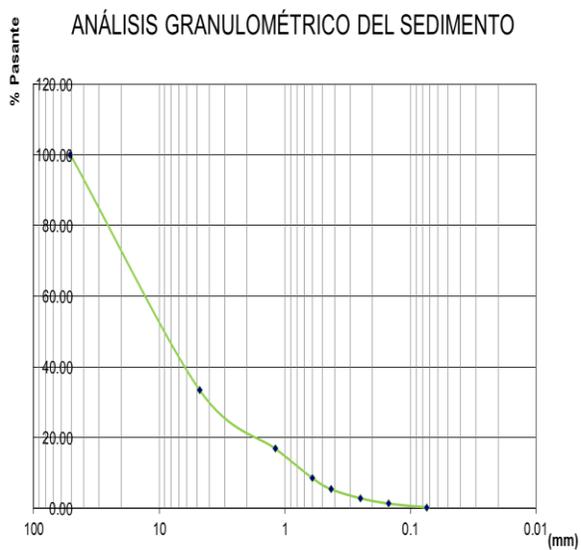
Arenas



Arenas

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 97.91 | 2.09 |
| Nº16 | 83.50 | 14.41 |
| Nº30 | 37.67 | 45.83 |
| Nº40 | 12.19 | 25.48 |
| Nº60 | 5.88 | 6.31 |
| Nº100 | 2.82 | 3.06 |
| Nº200 | 0.10 | 2.71 |



Grava arenosa

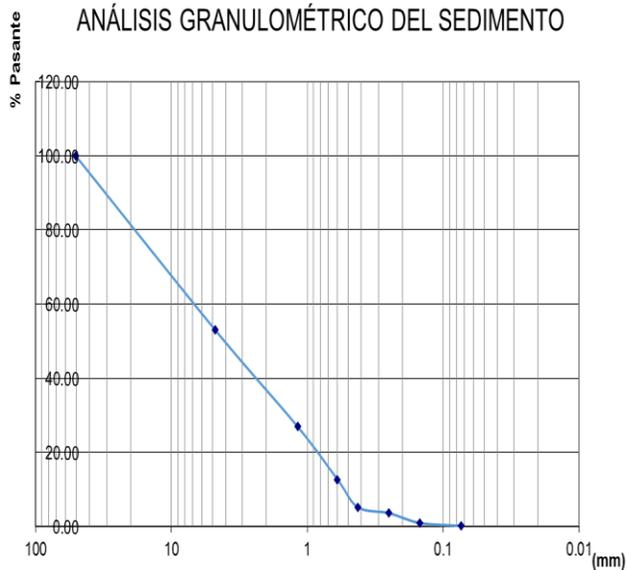
Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 33.47 | 66.53 |
| Nº16 | 16.84 | 16.63 |
| Nº30 | 8.53 | 8.31 |
| Nº40 | 5.39 | 3.14 |
| Nº60 | 2.88 | 2.51 |
| Nº100 | 1.36 | 1.52 |
| Nº200 | 0.29 | 1.07 |

Fuente: Suarez, 2016

Gráfico 10. Caracterización granulométrica del punto 5, zona del cauce.

ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO

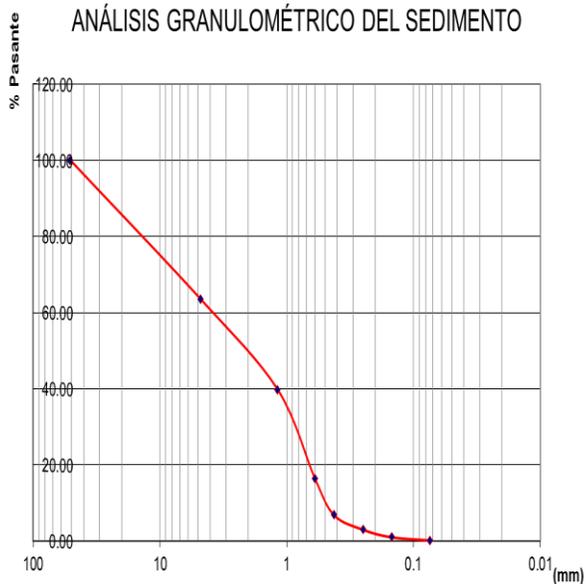


Arenas

Muestreo 1

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| N°4 | 53.00 | 47.00 |
| N°16 | 26.99 | 26.02 |
| N°30 | 12.71 | 14.27 |
| N°40 | 5.26 | 7.45 |
| N°60 | 3.65 | 1.62 |
| N°100 | 1.02 | 2.63 |
| N°200 | 0.19 | 0.83 |

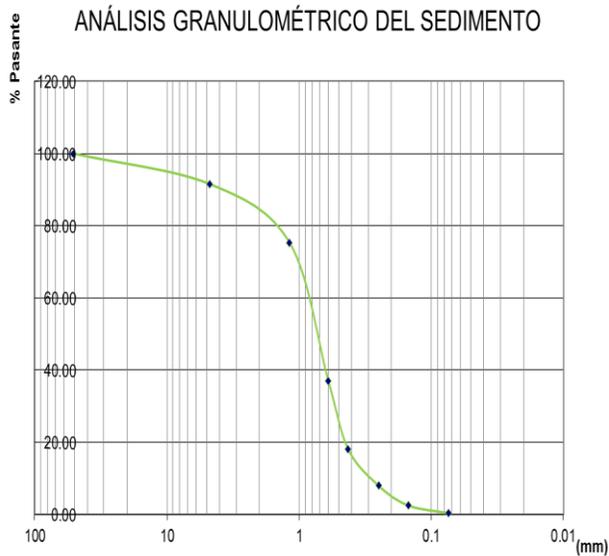
ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DEL SEDIMENTO



Arenas

Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| N°4 | 63.51 | 36.49 |
| N°16 | 39.84 | 23.68 |
| N°30 | 16.50 | 23.34 |
| N°40 | 6.86 | 9.64 |
| N°60 | 2.97 | 3.89 |
| N°100 | 1.00 | 1.97 |
| N°200 | 0.15 | 0.85 |



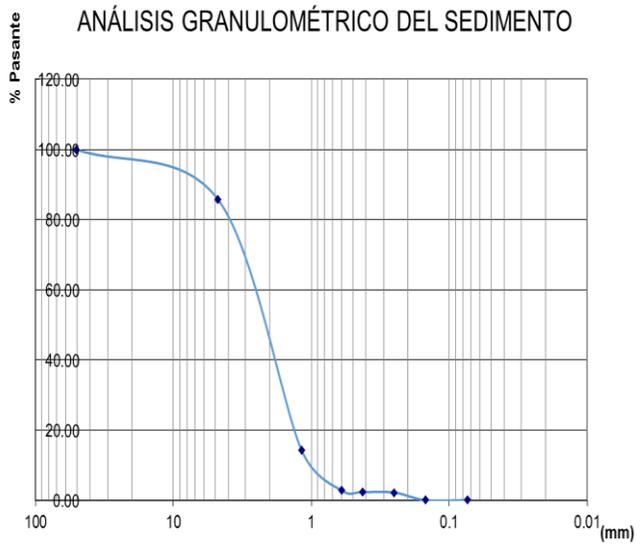
Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 91.57 | 8.43 |
| Nº16 | 75.33 | 16.24 |
| Nº30 | 36.95 | 38.38 |
| Nº40 | 18.07 | 18.88 |
| Nº60 | 7.97 | 10.10 |
| Nº100 | 2.48 | 5.49 |
| Nº200 | 0.35 | 2.13 |

Arenas

Fuente: Suarez, 2016.

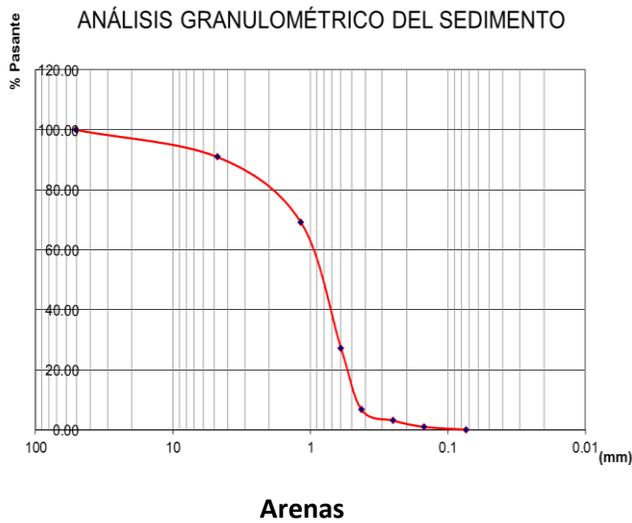
Gráfico 11. Caracterización granulométrica del punto 5, zona del margen.



Muestreo 1

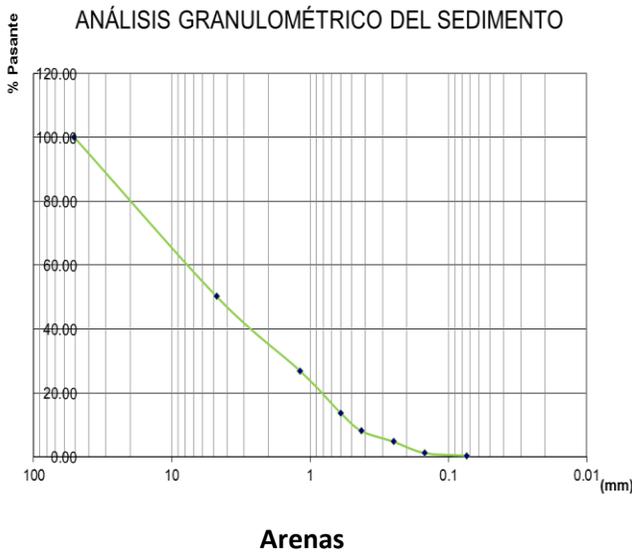
| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 85.78 | 14.22 |
| Nº16 | 14.38 | 71.40 |
| Nº30 | 2.79 | 11.59 |
| Nº40 | 2.39 | 0.39 |
| Nº60 | 2.24 | 0.15 |
| Nº100 | 0.07 | 2.18 |
| Nº200 | 0.07 | 0.00 |

Arenas



Muestreo 2

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 90.96 | 9.04 |
| Nº16 | 69.33 | 21.63 |
| Nº30 | 27.26 | 42.07 |
| Nº40 | 6.72 | 20.54 |
| Nº60 | 3.09 | 3.64 |
| Nº100 | 1.02 | 2.06 |
| Nº200 | 0.08 | 0.94 |



Muestreo 3

| tamaño del tamiz | Pasante | Retenido |
|------------------|---------|----------|
| 2 | 100.00 | 0.00 |
| Nº4 | 50.22 | 49.78 |
| Nº16 | 26.82 | 23.40 |
| Nº30 | 13.65 | 13.18 |
| Nº40 | 8.08 | 5.57 |
| Nº60 | 4.75 | 3.32 |
| Nº100 | 1.19 | 3.56 |
| Nº200 | 0.38 | 0.82 |

Fuente: Suarez, 2016

En las gráficas 14 – 23 correspondientes al análisis granulométrico se observa su variación dada en función del flujo del cauce, así pues, dependiendo del punto muestreado se presentan dichas variaciones puesto que está influenciado por las características y condiciones de la zona; por ejemplo, en el punto de muestreo 1 (gráfica 13) zona del cauce varía desde grava arenosa para el primer muestreo, arena segundo muestreo y arena casi en las mismas proporciones para el tercer muestreo; no obstante, en la zona del margen (gráfica 14) o sedimentos depositados a su paso, se presentan arenas en los tres muestreos permitiendo que se refleje una continuidad entre los sedimentos entre el primer muestreo y el tercero cuyas

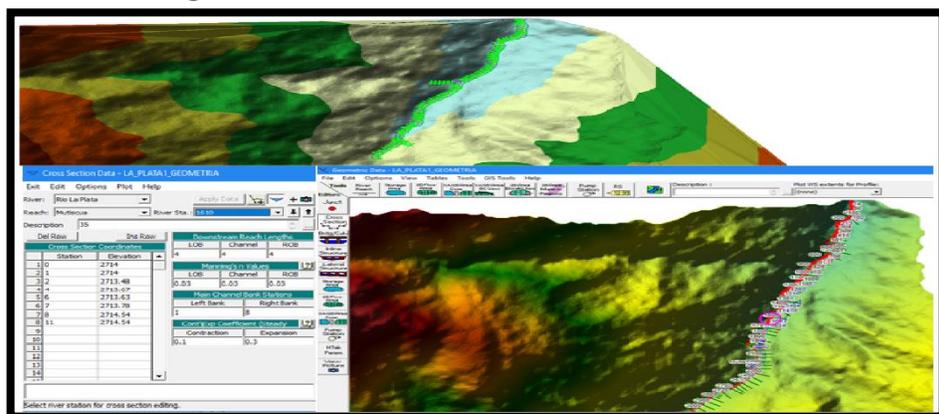
variaciones son mínimas que pueden ser observadas en cuanto a los contenidos de pesos retenidos .

Que para el punto de muestreo 5 (gráfica 21 – 22) se observa que en los 3 muestreos predominan las arenas en el cauce, de igual manera, se evidencia en los muestreos realizados en el margen. Es importante referenciar que las variaciones que pueden llegar a presentar estos sedimentos serán en función de las precipitaciones de la zona y los aumentos o disminuciones de los caudales. Así pues de manera general los principales sedimentos presentados en el cauce del río La Plata en la zona de estudio - área de influencia de la cabecera municipal predominan las arenas en mayor proporción y las gravas arenosas; considerando que el cauce existen bloques de diferentes tamaños que forman parte de la granulometría y que en su momento fueron transportados destacándose de esta forma corrientes torrenciales.

8.6. HEC-RAS

En la hidráulica fluvial el principal inconveniente que se presenta es que parámetros característicos del río no son constantes. (Chacón. J & Pazmiño. E, 2010). No obstante, se poseen las herramientas necesarias para efectuar predicciones sobre el comportamiento de una fuente hídrica; así pues, en la modelación de la cuenca (zona de influencia de la cabecera municipal- Mutiscua) se efectúa como primera medida el levantamiento de la geometría del terreno (Imagen 21) proceso desarrollado en ArcGis seguido del complemento con el ingreso de las secciones transversales tomadas en campo mediante el empleo de Hec-Ras, así mismo, se ingresa la información correspondiente a caudales y granulometría del sedimento.

Imagen 20. Geometría del terreno – zona de estudio.

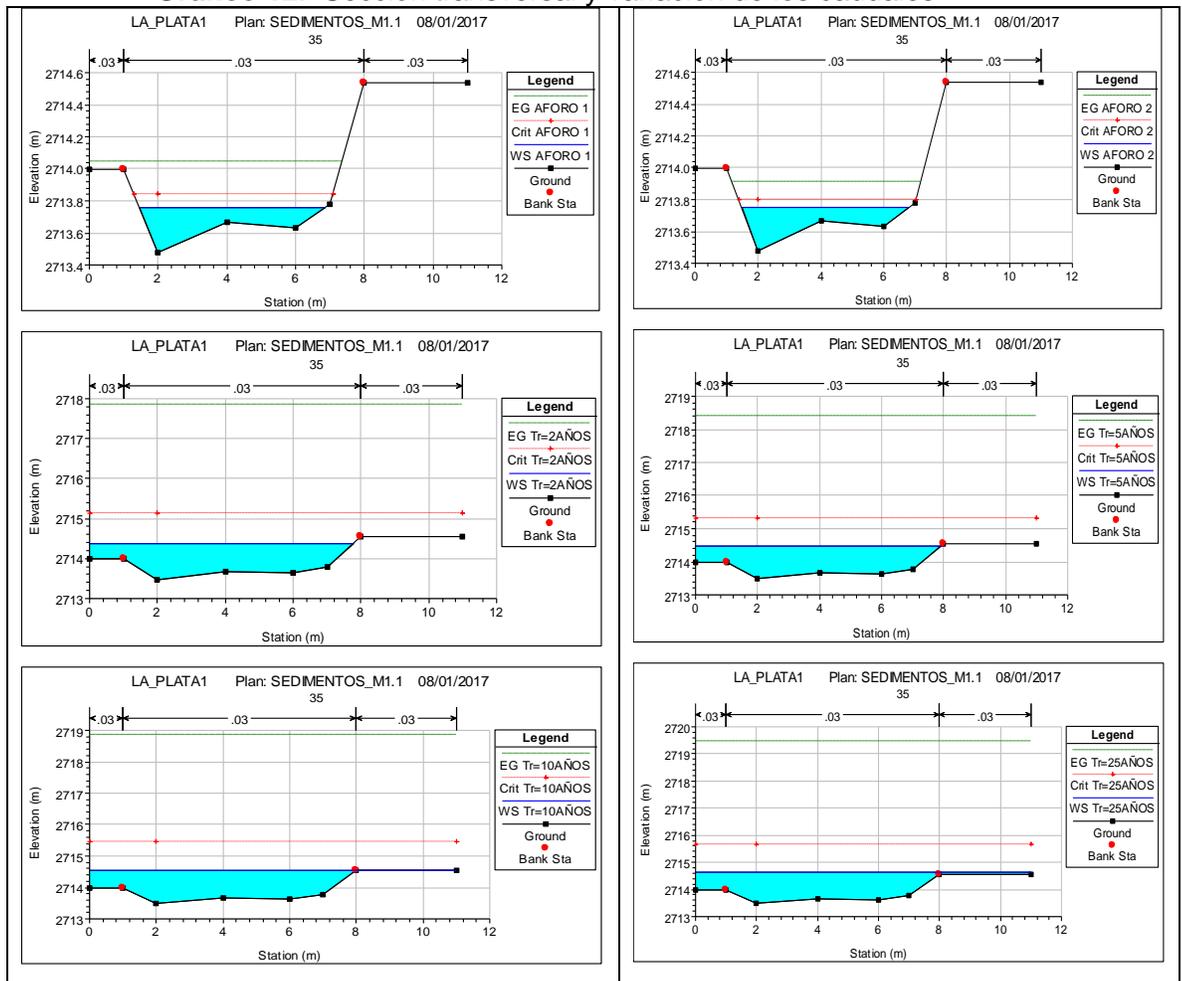


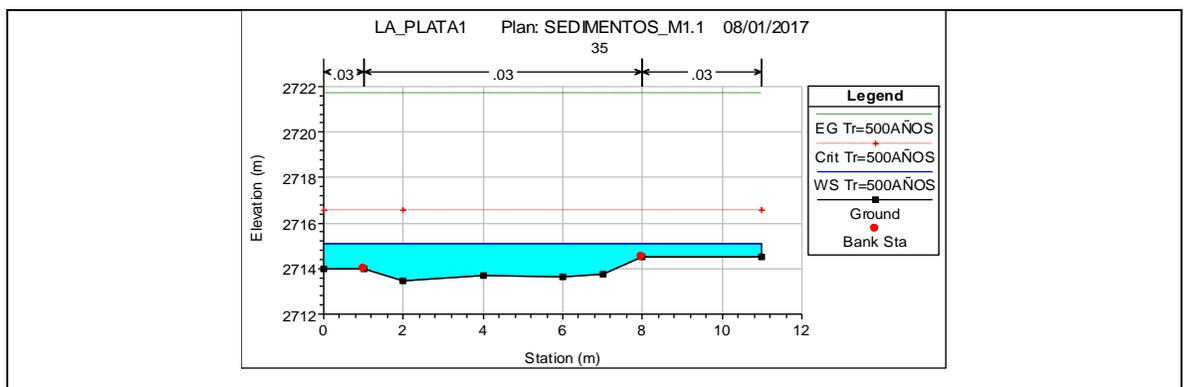
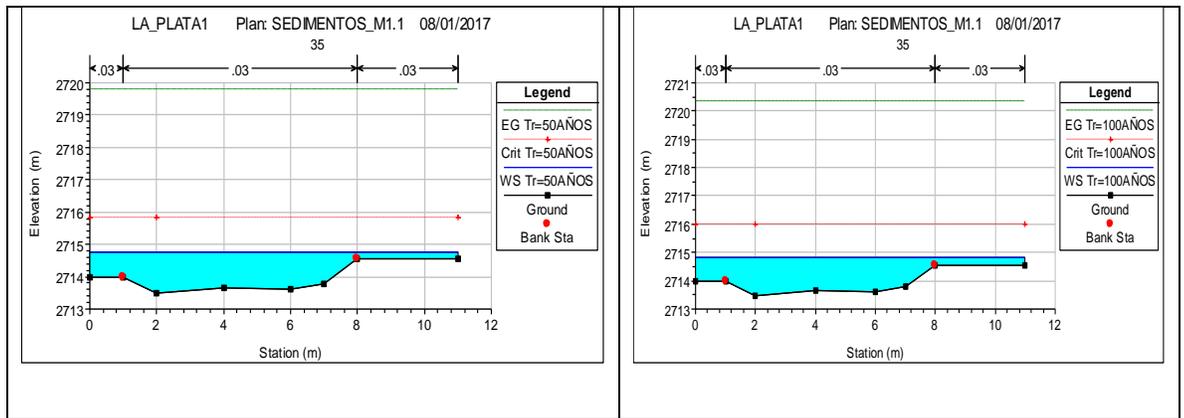
Fuente: Suarez, 2016

Se destaca que hay principalmente 2 formas de transporte: suspensión y arrastre; el fundamental es el dado por arrastre puesto que permite que observemos los aspectos morfológicos de sedimentación y erosión en el cauce. A partir de la definición de la geometría y generado el archivo de sedimentos (sediment data) se efectúan los planes o corridas empleando la opción de flujo permanente o constante (Steady Flow) a partir del ingreso de los caudales (m^3/s) realizándose de esta manera la calibración, corrección de errores y observación del comportamiento del modelo hidráulico para el posterior análisis de sedimentos.

Los resultados se presentan a continuación: el gráfico 24 representa la variación dada en la sección por los cambios de caudales, de igual manera el gráfico 25 permite observar los perfiles del tramo y el gráfico 26 muestra las parcelas de velocidad, flujo, área de flujo, profundidad hidráulica y volumen de los 2 perfiles analizados aforo 1 y tiempo de retorno de 2 años.

Gráfico 12. Sección transversal y variación de los caudales



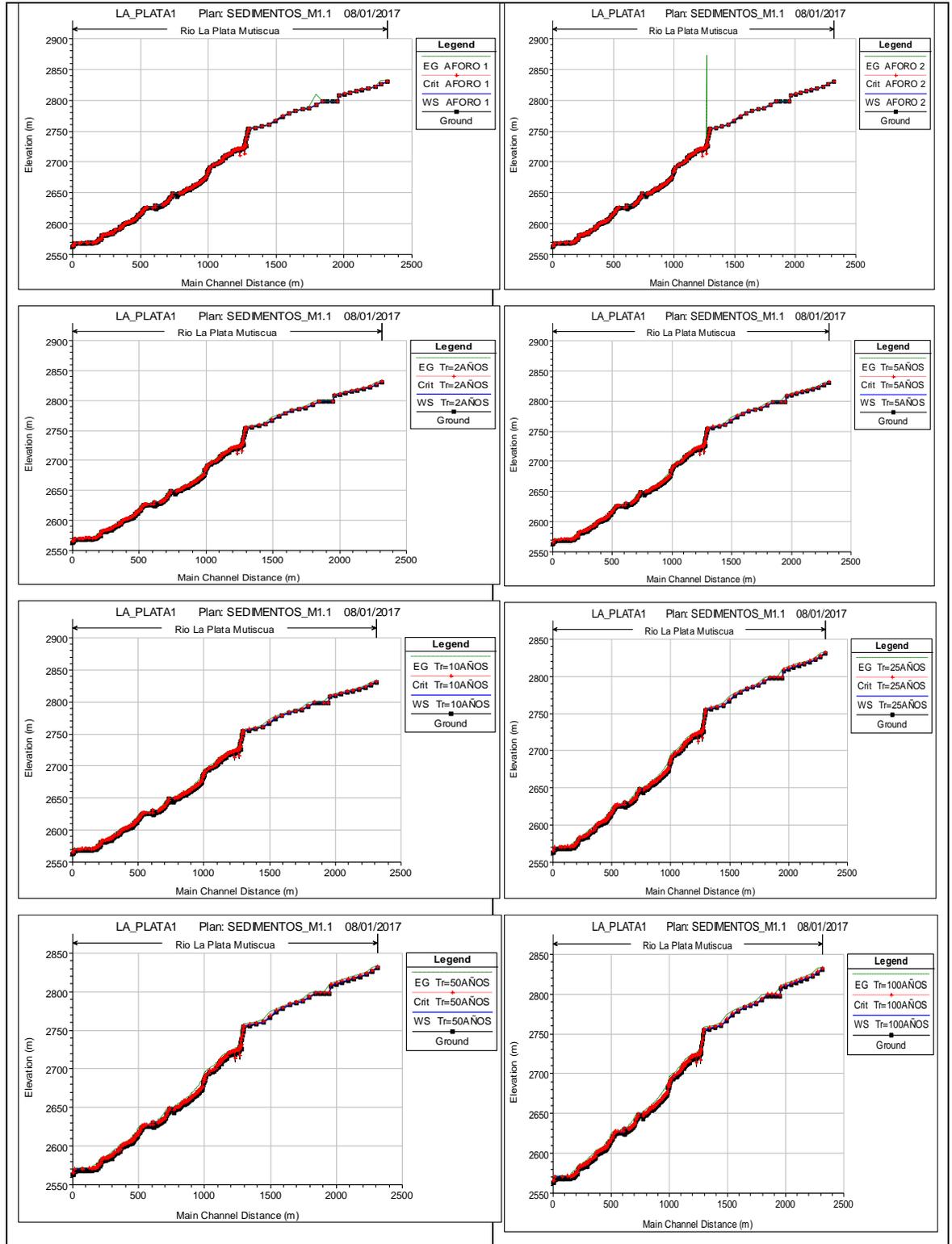


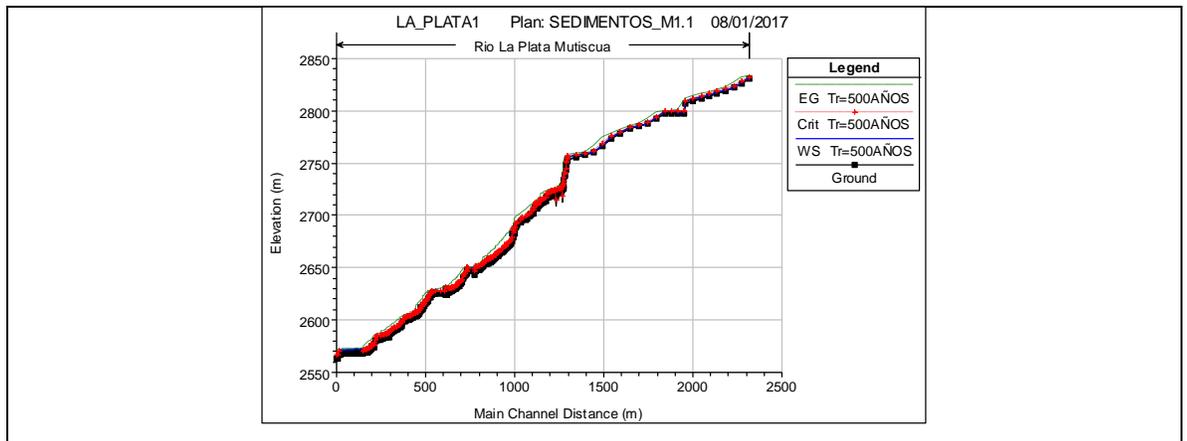
Fuente: Suarez, 2017

Para efectos de visualización se toma una sección del cauce donde se permite observar (Gráfico 24) la variación que esta presenta en función de los caudales suministrados; la línea verde a trazos 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, de esta manera obtenemos una variación significativa en el tiempo en función de los caudales ingresados (m^3/s) que a su vez se encuentran asociados a los aumentos o disminuciones de la precipitación dada para la zona.

De manera general en el grafico 25 se presenta el perfil del tramo del cauce analizado en función de las variaciones de caudal aforo 1 y dos y los caudales provenientes de los Hidrogramas para los tiempos de retorno.

Gráfico 13. Perfil del tramo de estudio en función de los caudales.

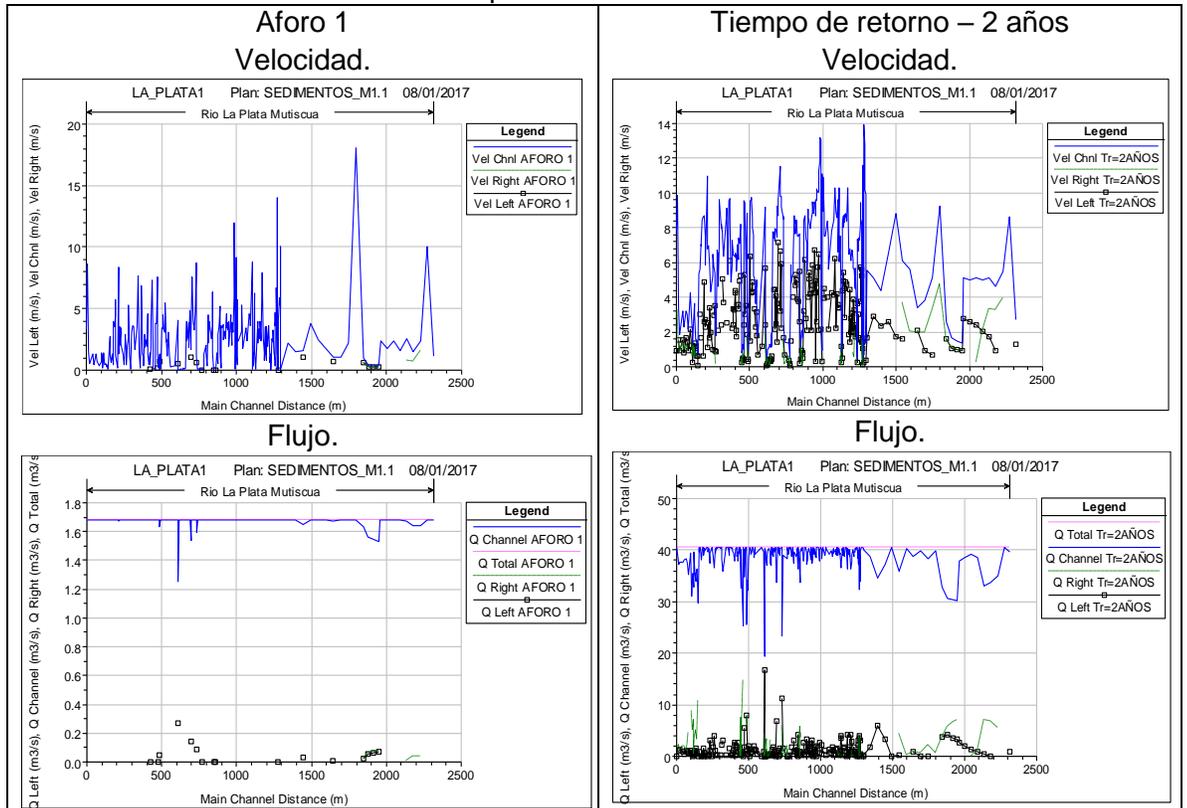


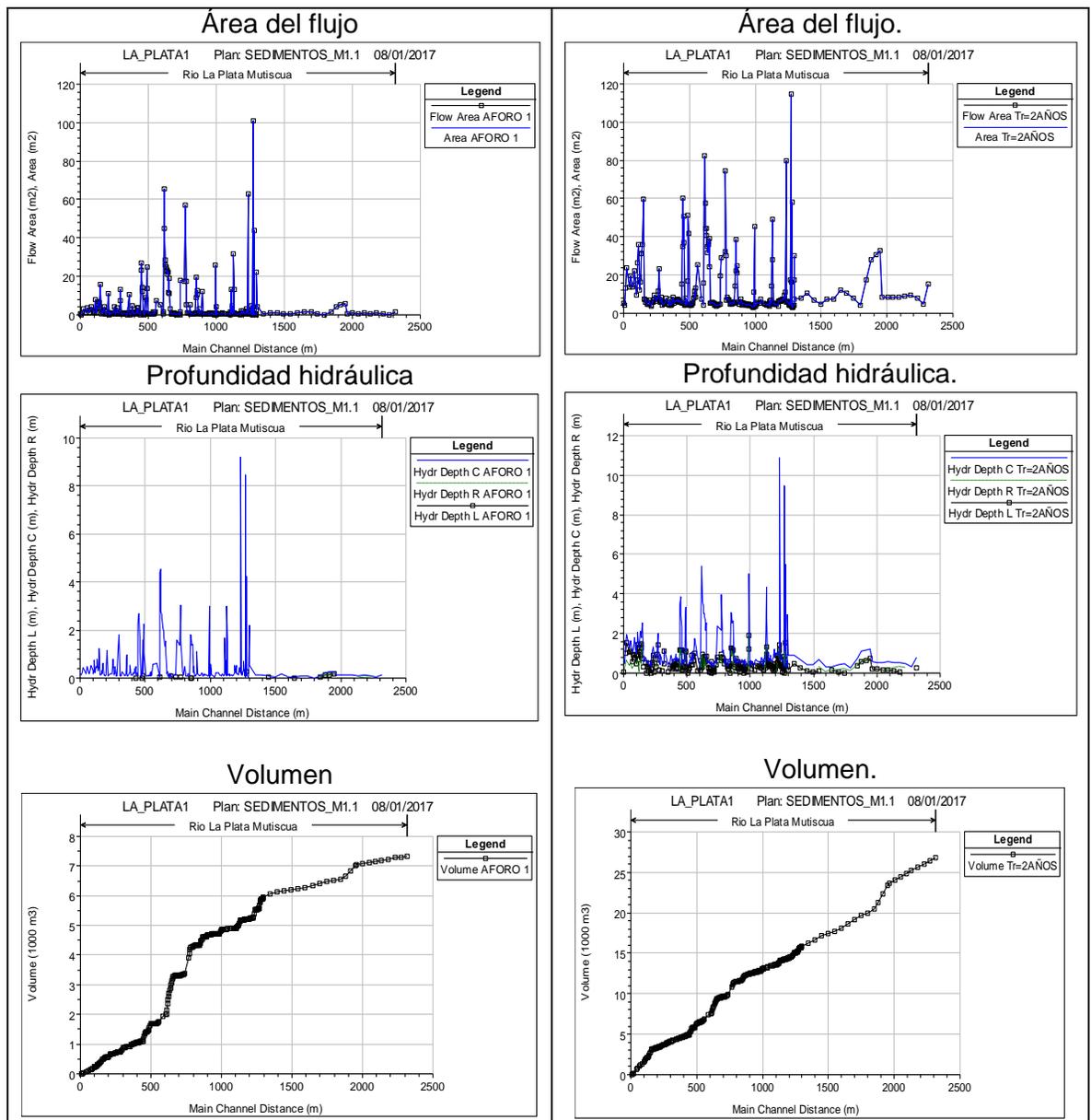


Fuente: Suarez, 2017

En los perfiles del tramo en flujo permanente (grafico 25) se tiene variaciones significativas que se presencian analizando sección a sección y se constituyen en representativas en cuanto a la variación del tiempo por el aumento de la lámina de agua que esta proporcionalmente relacionado con el grado de energía y la profundidad crítica.

Gráfico 14. Parcelas estándar para una sección en función del caudal.

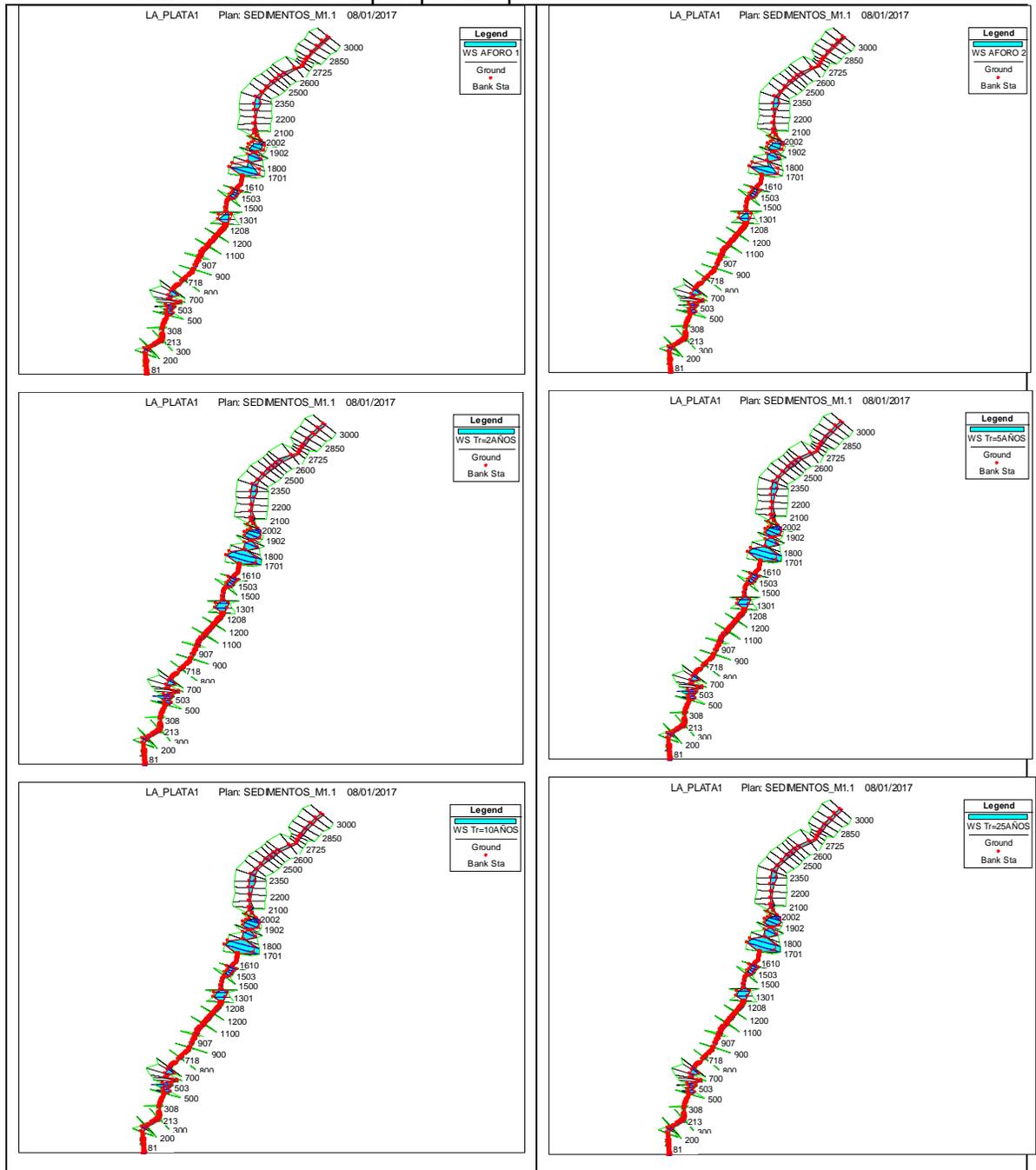


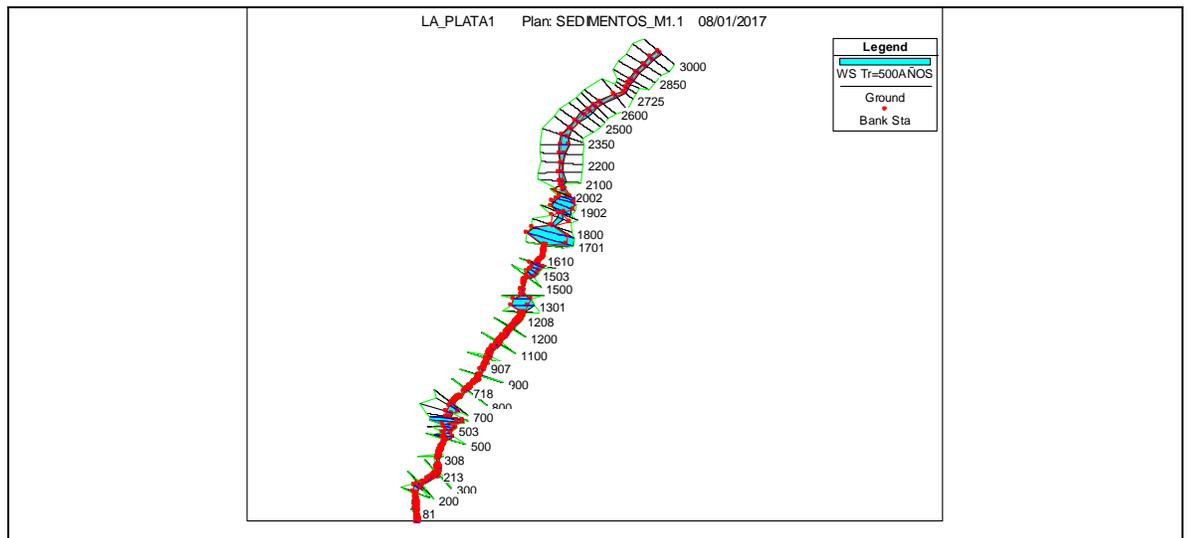
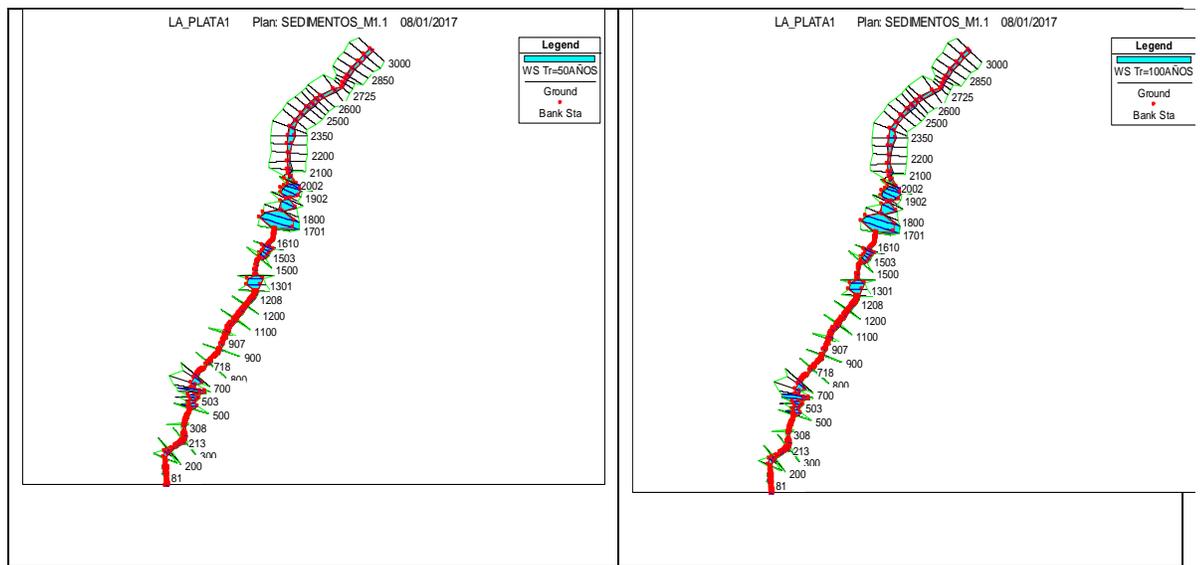


Fuente: Suarez, 2017

En el grafico anterior 26 se tiene las parcelas estándar para flujo permanente que entrega un aumento directamente relacionado con el caudal (Q) ya que la velocidad, flujo, área de flujo, profundidad hidráulica y volumen van en aumento; es decir, del denominado aforo 1 a Tr de 2 años.

Gráfico 15. Tramo en perspectiva para los diferentes caudales.





Fuente: Suarez, 2017

El grafico 27 que muestra las perspectivas de tramo de estudio, referencia y permite observar los sitios claves donde puede presentarse inundación en mayor o menor escala dependiendo de las características de los puntos y las condiciones hidrometeorológicas; de la misma manera constituye un idealización de las zonas que se evidencian con riesgo y en su caso permite dar manejo adecuado dependiendo de la existencia o no de bienes públicos, privados e incluso la protección de vidas para la puesta en marcha de la gestión del riesgo.

Así pues, se tiene zonas con predicción de inundación o vulnerables en las partes de las vegas sobre el cauce fincas o propiedad privada y zonas de riesgo como lo es la Molinera Herrán o molino monarca, 4 estaciones piscícolas (“pesquemos”,

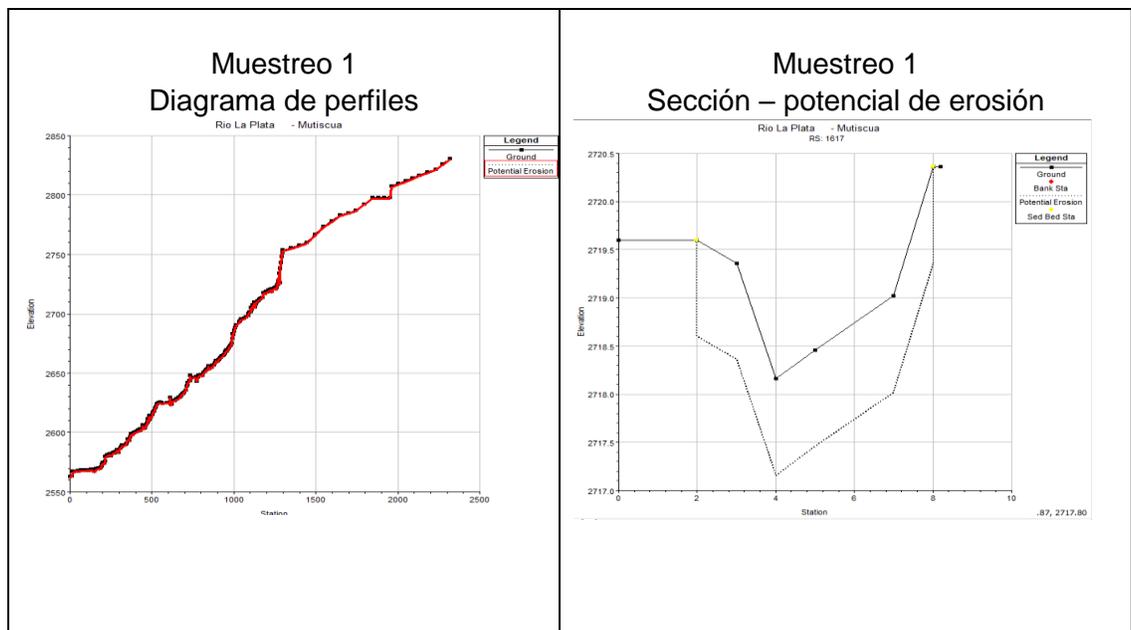
“propiedad del señor Vera”, “propiedad señor Suarez” y HJC), zona de la vía sucre o antigua marmolería, Hogar Juvenil Campesino (HJC) y la zona que se encuentra sobre el margen derecho aguas abajo en lo correspondiente al vertimiento municipal.

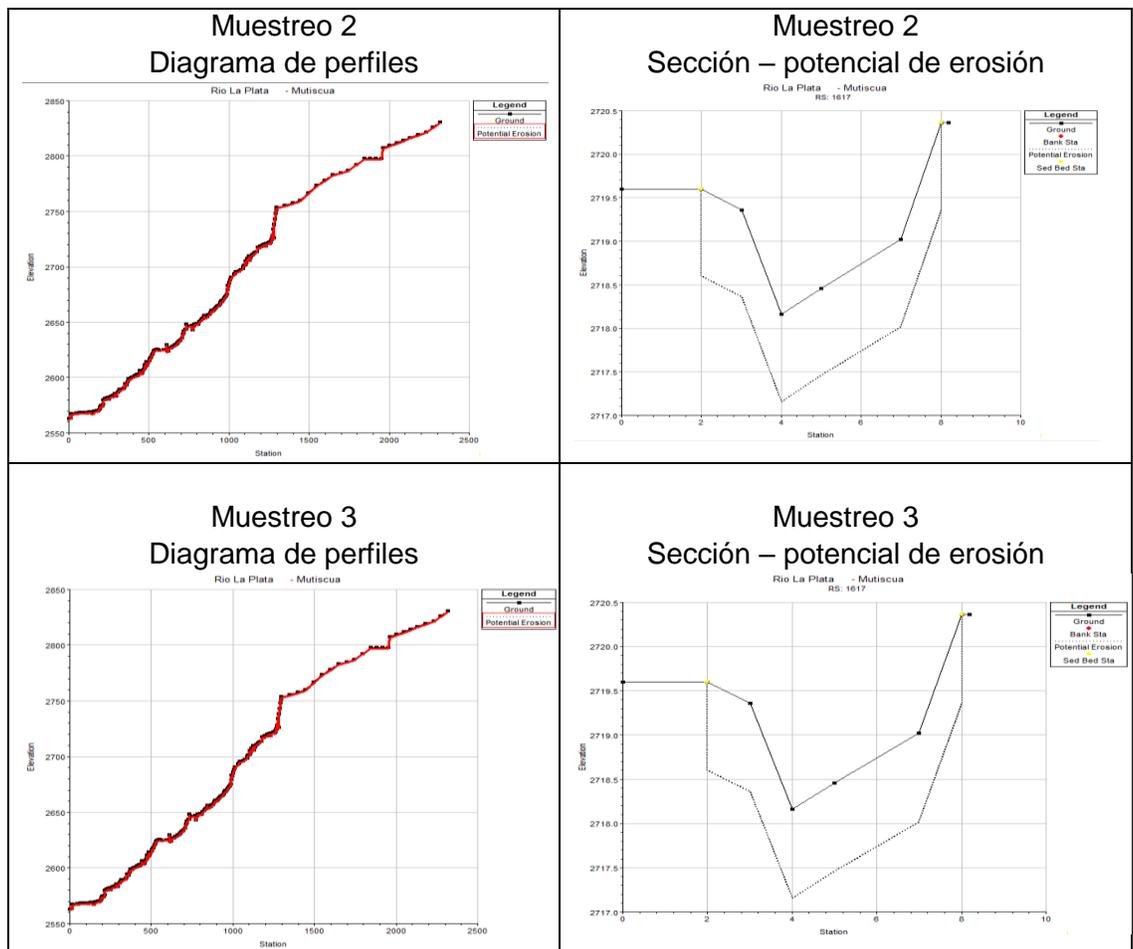
De manera general en el modelo no se presentan picos o comportamientos que alteren el flujo; es decir, los resultados obedecen a las condiciones ingresadas y como esto indica que no se presentan errores que generen inconvenientes en la modelación se da por calibrado el ejercicio y se procede a modelar la misma geometría pero en este caso para el flujo no permanente y transporte de sedimentos.

El análisis del transporte de sedimentos se inicia definiendo la granulometría de los sedimentos o datos de sedimentos para la cama de degradación; así pues, se indica la función de transporte, el método de cálculo de velocidad y método de clasificación lo cual me permite obtener el perfil del cauce y el potencial de erosión (Grafico 28) que puede presentarse en el tramo de estudio.

No obstante, el proceso se acompaña del flujo casi permanente donde se requieren las condiciones de borde tal como la pendiente, la serie de flujos y la temperatura que acompañan dicho análisis. El desarrollo del plan permite obtener el mapa de los sedimentos dados para los flujos ingresados de forma independiente.

Gráfico 16 Diagrama de perfiles para el tramo de estudio y sección – representación del potencial de erosión.





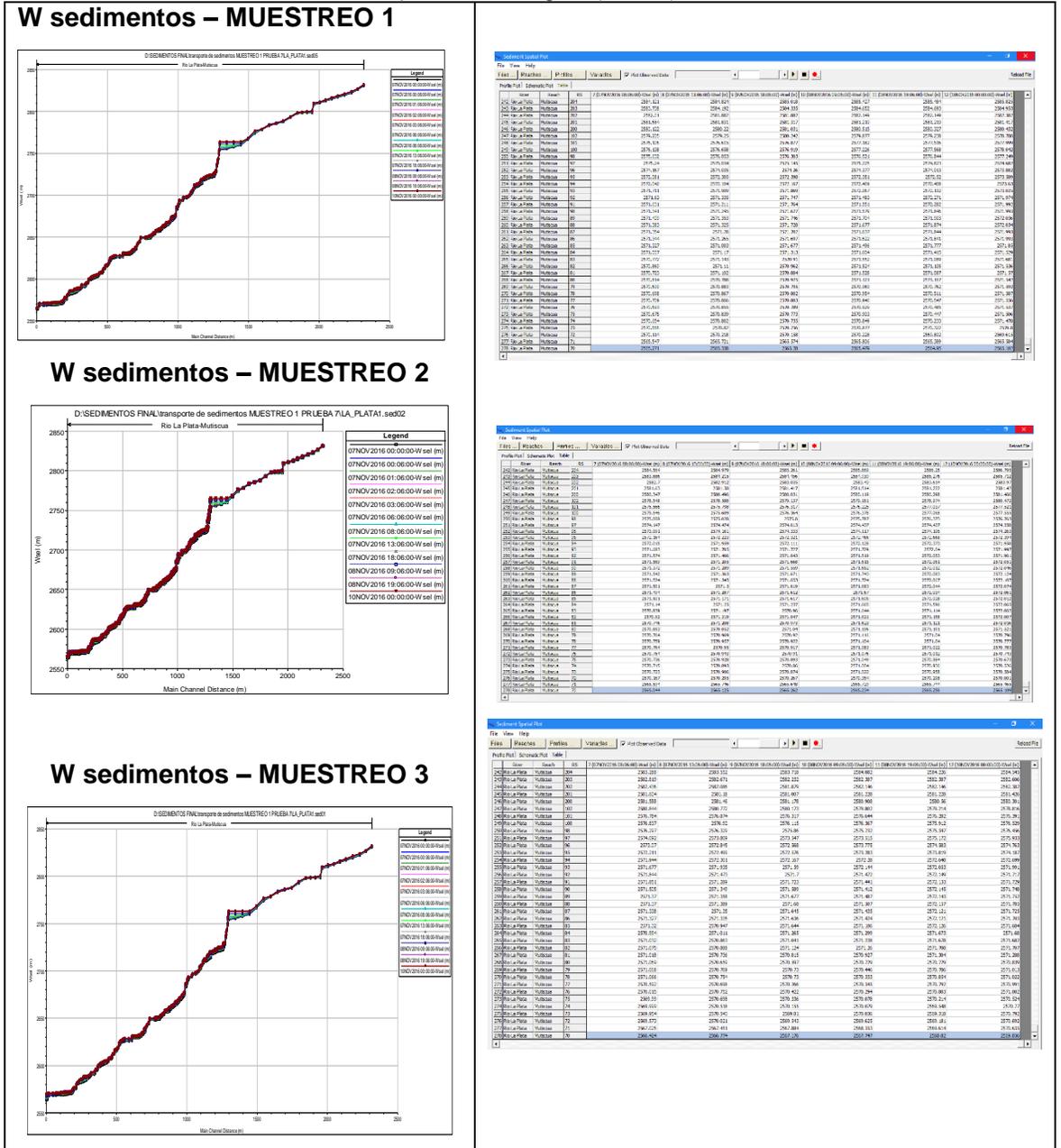
Fuente: Suarez, 2017

En el grafico 28 se observan los perfiles dados para los 3 muestreos donde la variación es pequeña pero de igual forma es representativa, también, en el grafico se tiene una sección que permite revisar la forma de la sección e indica el potencial de erosión al cual puede estar sometida. Para dichos procesos de análisis de sedimentos se empleó la función de transporte de Meyer-Peter Muller que es la ecuación más utilizada donde se relaciona el esfuerzo cortante; además, que principalmente relaciona arenas y gravas pues subestima el transporte de materiales finos, por otro lado se complementa con la función de capacidad de transporte de Toffaleti con gravedad especifica de 2.65 y factor forma de 0.9 considerando que en la zona predominan sedimentos de tipo gravas finas y arenas medias.

El grafico 29 presenta la elevación de la superficie de agua(W_{sel}) en cada paso del tiempo de salida para los 3 muestreos de sedimento realizados lo cual se traduce en el diagrama esquemático (Imagen 22) cuya variación es de tipo mínimo y en la

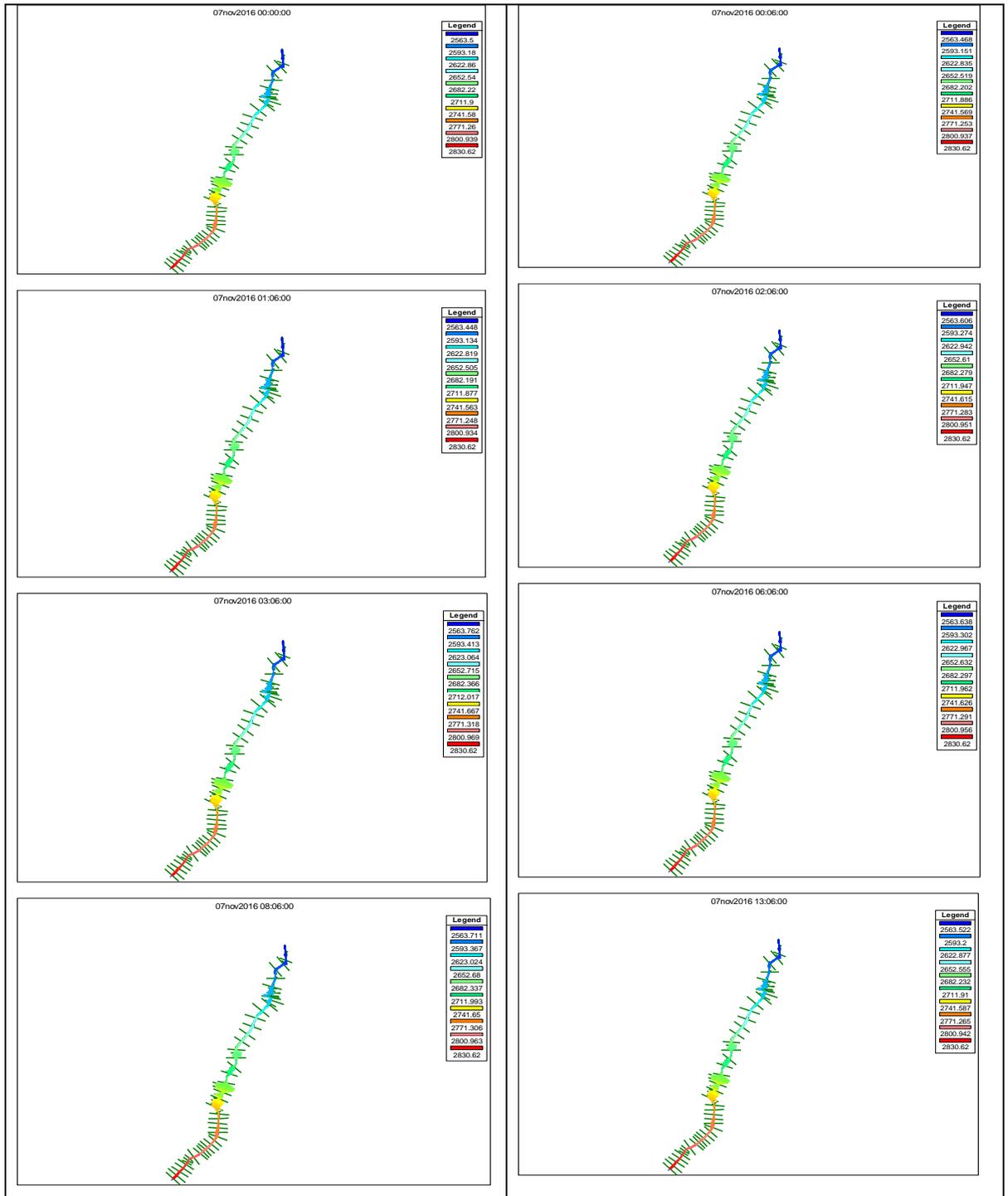
escala visual no se detalla con precisión siendo necesaria la revisión de la tabla de datos en Sediment Spatial Plot, los cambios en el diagrama se presentan por el aumento de caudales relacionándose de manera proporcional aumento de Q conlleva a aumento en el Wsel y viceversa.

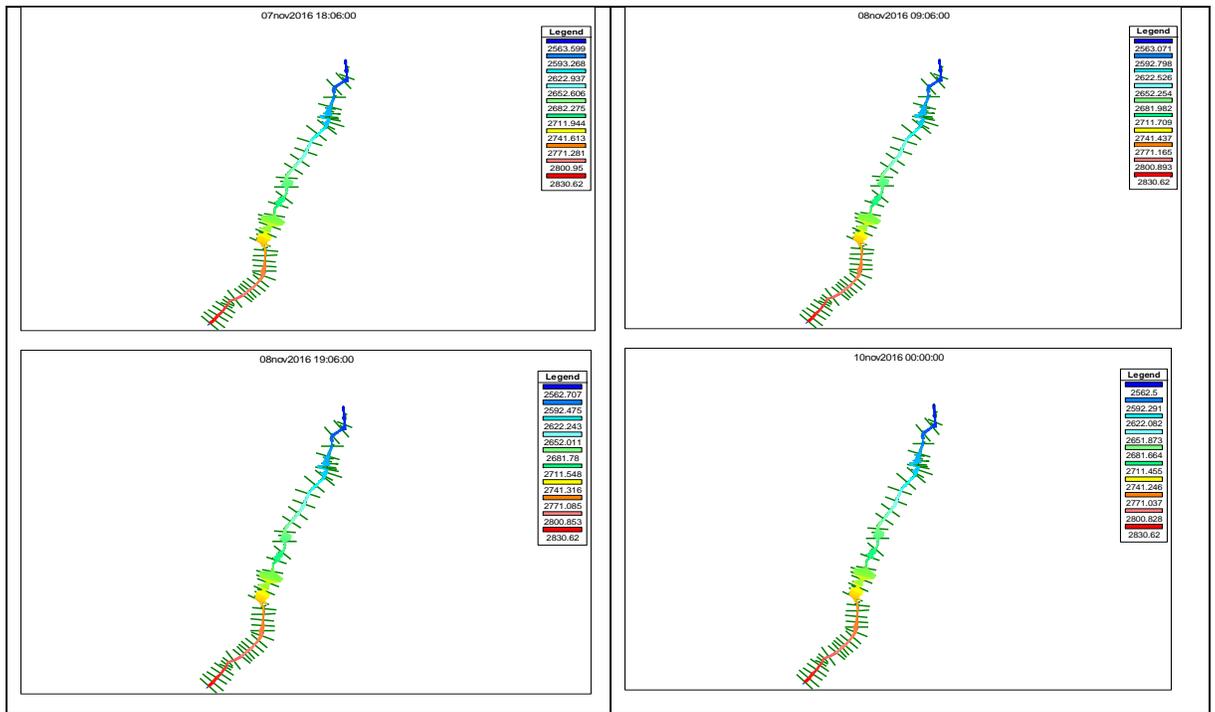
Gráfico 17. Elevación de la superficie de agua (Wsed) – tabla de resultados.



Fuente: Suarez, 2017

Imagen 21. Diagrama esquemático generado.

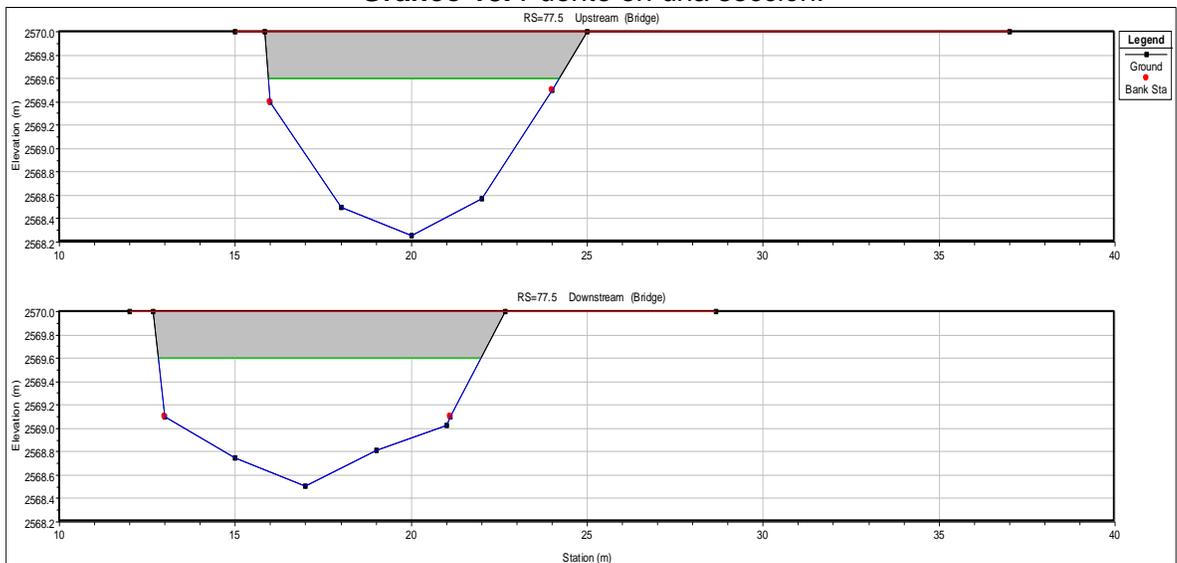




Fuente: Suarez, 2017

Dentro del proceso se indican los puentes (Gráfico 30) donde se visualiza la forma y como se adaptan a la sección de análisis; es importante referenciar que para este caso los coeficientes de expansión y contracción varía por las condiciones para tal caso se emplean coeficientes de 0.5 y 0.3 respectivamente.

Gráfico 18. Puente en una sección.



Fuente: Suarez, 2017

Por otra parte, Hec-Ras permite visualizar la información sobre sedimentos (Ver tabla 13) donde se detallan las secciones y sus características predominantes

Tabla 13. Resultados de Hec-Ras para primer muestreo – flujo 2.

| SECC IÓN | CH INVER T EL (M) (ELEVA CIÓN DEL LECHO) | WSEL (M) (ELEVA CION DE LA SUPERF ICE DE AGUA) | INVER T CHAN GE (M) (CAMB IO EN EL LECHO) | SECCIONE S SOCAVAD AS O EROSIONA DAS, EN EQUILIBRIO O SEDIMENT ADAS | FLO W (M3/S) (CAU DAL) | VELOC ITY (M/S) (VELO CIDAD) | SHEAR STRES S (PA) (ESFU ERZO CORT ANTE) | MASS OUT CUM: ALL (TONNES) (MASA DE SEDIMEN TOS TRANSPOR TADOS) |
|----------|---|--|--|---|-------------------------|------------------------------|--|---|
| 3000 | 2830.62 | 2830.871 | 0 | equilibrio | 1.18 | 1.108347 | 1.462025 | 5.860291 |
| 2950 | 2826.297 | 2826.475 | -1.29E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.087709 | 2.543749 | 13.17005 |
| 2900 | 2821.993 | 2822.12 | -7.07E-03 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.045192 | 2.124896 | 17.86442 |
| 2850 | 2819.431 | 2819.588 | 4.50E-04 | sedimenta da | 1.18 | 1.127856 | 2.451155 | 18.19409 |
| 2800 | 2816.866 | 2817.087 | 6.33E-03 | sedimenta da | 1.18 | 1.119557 | 2.946037 | 14.60668 |
| 2775 | 2814.529 | 2814.768 | 8.10E-04 | sedimenta da | 1.18 | 1.147587 | 3.226816 | 14.2071 |
| 2750 | 2812.195 | 2812.45 | 0 | equilibrio | 1.18 | 1.17248 | 3.148039 | 14.65894 |
| 2725 | 2809.863 | 2810.139 | 0 | equilibrio | 1.18 | 1.197771 | 2.994096 | 15.33389 |
| 2700 | 2807.521 | 2807.832 | -9.61E-03 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.232849 | 1.802755 | 17.81136 |
| 2600 | 2798.028 | 2798.238 | 2.76E-02 | sedimenta da | 1.18 | 0.2638447 | 0.1017675 | 8.50E-02 |
| 2566 | 2798 | 2798.22 | 3.54E-05 | sedimenta da | 1.18 | 0.2854334 | 0.1214023 | 5.91E-02 |
| 2533 | 2798 | 2798.195 | 0 | equilibrio | 1.18 | 0.3307779 | 0.1698628 | 0.120906 |
| 2500 | 2797.984 | 2798.078 | -1.63E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 0.8670172 | 1.581196 | 17.56211 |
| 2450 | 2792.656 | 2792.77 | 4.48E-04 | sedimenta da | 1.18 | 0.9756653 | 2.094136 | 20.84273 |
| 2400 | 2787.31 | 2787.555 | 0 | equilibrio | 1.18 | 1.095451 | 1.663983 | 22.31515 |

| | | | | | | | | |
|------|----------|----------|-----------|-----------------------|------|-----------|-----------|-----------|
| 2350 | 2785.23 | 2785.304 | 0 | equilibrio | 1.18 | 0.823211 | 1.556124 | 28.59655 |
| 2300 | 2783.15 | 2783.198 | 0 | equilibrio | 1.18 | 0.6823738 | 1.154858 | 35.61987 |
| 2250 | 2778.367 | 2778.441 | 1.64E-03 | sedimentada | 1.18 | 0.8474774 | 1.571729 | 33.27929 |
| 2200 | 2773.599 | 2773.957 | 1.89E-02 | sedimentada | 1.18 | 1.367125 | 2.666758 | 26.02106 |
| 2150 | 2766.797 | 2766.94 | 7.18E-03 | sedimentada | 1.18 | 1.151139 | 2.523818 | 21.91916 |
| 2100 | 2760 | 2760.097 | 0 | equilibrio | 1.18 | 0.9695518 | 1.869619 | 24.4577 |
| 2051 | 2757.697 | 2757.829 | 1.45E-03 | sedimentada | 1.18 | 1.114764 | 2.357424 | 23.53051 |
| 2003 | 2755.402 | 2755.615 | 0.0120007 | sedimentada | 1.18 | 1.309506 | 3.165542 | 18.96215 |
| 2002 | 2753.666 | 2754.236 | 6.56E-02 | sedimentada | 1.18 | 0.3020782 | 0.1191566 | 0.142683 |
| 2001 | 2751.811 | 2754.239 | 1.11E-03 | sedimentada | 1.18 | 5.49E-02 | 3.30E-03 | 0.1101087 |
| 2000 | 2754.083 | 2754.192 | -1.74E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 0.9123274 | 1.788837 | 1.076798 |
| 1904 | 2748.204 | 2748.812 | -5.64E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.718883 | 6.500609 | 1.474757 |
| 1903 | 2748.225 | 2748.443 | -2.51E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.148445 | 2.543977 | 2.36879 |
| 1902 | 2743.029 | 2743.283 | -2.11E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.060894 | 3.002652 | 3.629941 |
| 1901 | 2738.476 | 2738.724 | -2.41E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.27212 | 2.956483 | 4.246542 |
| 1900 | 2737.992 | 2738.334 | -7.63E-03 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.297808 | 2.107968 | 4.474689 |
| 1801 | 2726.091 | 2734.786 | 9.12E-02 | sedimentada | 1.18 | 2.78E-02 | 1.59E-03 | 0.2059195 |
| 1800 | 2734.407 | 2734.701 | -2.28E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.227886 | 2.269263 | 1.064929 |
| 1702 | 2728.054 | 2728.293 | -2.65E-02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.248492 | 3.167069 | 1.585784 |
| 1701 | 2725.039 | 2727.99 | 0.0392455 | sedimentada | 1.18 | 7.87E-02 | 1.09E-02 | 0.2059077 |

| | | | | | | | | | |
|------|--------------|--------------|-------------------|--------------------------|------|---------------|--------------|----------|-------------|
| 1700 | 2727.7 51 | 2727.93 8 | - 1.93E- 02 | socavada - erosionada | 1.18 | 0.9659 817 | 1.7799 33 | 1.110517 | |
| 1634 | 2725.2 21 | 2725.52 1 | - 2.94E- 02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.2527 72 | 3.1878 97 | 1.607629 | puente 1 |
| 1633 | 2724.4 57 | 2724.71 4 | - 2.34E- 02 | socavada - erosionada | 1.18 | 1.2715 68 | 3.0349 06 | 2.233385 | |

Fuente: Suarez, 2017

En la tabla anterior se evidencia la información extraída del modelo para el primer muestreo de sedimentos cuyo caudal corresponde al segundo simulado en la serie de flujos (07/11/2016). Por consiguiente, se resalta que durante la variación de caudal dicha información irá cambiando pero esto también es dado en función de la granulometría del lugar. En la tabla las filas en color blanco corresponden a las secciones en equilibrio, el color azul referencia las que son socavadas o erosionadas y en color naranja se indican las sedimentas. De igual manera, se referencia que los puentes se encuentran en secciones principalmente socavadas o erosionadas conllevando a que sea necesario monitoreo continuo en dichas estructuras. Corroborándose de forma general lo dicho por Chacón. J & Pazmiño. E, (2010) puesto que las velocidades son variadas - bajas, por consiguiente, el esfuerzo cortante es bajo pero la capacidad de transporte es mayor en las secciones socavadas o erosionadas y menor en las sedimentadas.

En continuidad al proceso de análisis es importante considerar las principales estructuras que se encuentran en el curso del Río La Plata: Molinera Herrán y antiguo Matadero (Fotografía 19), captaciones de estaciones piscícolas (Fotografía 20), puentes (Fotografía 21), Muros o pilas en concreto (Fotografía 22) que se encuentran expuestos de manera directa a la acción de los cambios morfométricos del cauce y a los eventos que se presentan en el mismo; de igual manera las zonas propensas o de riesgo por inundación durante altas precipitaciones o crecidas constituyen un punto de partida para la generación de los planes de gestión de riesgo en el municipio.

Fotografía 19. Estructura del molino Herrán y antiguo matadero.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 20. Captaciones de estaciones piscícolas.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 21. Puentes.



Fuente: Suarez, 2016

Fotografía 22. Muros y pilas en concreto.



Fuente: Suarez, 2016

En las fotografías 19 -22 se presentan las estructuras comúnmente presentes en el cauce y zona de influencia de la cabecera del municipio de Mutiscua, así en primer lugar se indican las zonas de riesgo por inundación o vulnerables en el apartado de la modelación por flujo permanente y en segundo punto se considera que estas estructuras pueden ser afectadas por socavación principalmente dado que por la acción del flujo alrededor de la estructura se genera la remoción del material del lecho (Sedimentos) tendiéndose en esta instancia desequilibrio entre el material transportado hasta el lugar y el material removido (agua clara) siendo esta una causa de riesgo para el fallo en la estructura; por lo tanto, es conveniente que el lecho sea móvil o vivo. No obstante, este fallo en las estructuras también puede estar relacionado con la mala alineación, el no mantenimiento, caudales muy bajos en tiempos prolongados, sismos, entre otros. Además, se destaca que es importante mantener conocimiento sobre los sedimentos y cómo se comportan para la prevención de los impactos negativos ya sea por colapso de estructuras, deterioro, sedimentación excesiva y afectación directa por taponamiento en captaciones o por constitución de un embalse natural que a gran escala propende riesgo.

CONCLUSIONES

- La precisión del modelo en cuanto a la geometría principalmente está condicionada a la topografía detallada de la zona de estudio, de igual manera, la mayor cantidad de información levantada en campo permite mejores ajustes puesto que la modelación en Hec-Ras con respecto al transporte de sedimentos es complicada dado que la teoría empleada es de tipo empírica constituyéndose en variaciones constantes en función de la región por lo que es necesario que los datos tomados sean lo más precisos posibles para la generación de las predicciones en cuanto a cómo tienden a comportarse dichos sedimentos en el tiempo – largo plazo.
- La determinación de los puntos de muestreo debe efectuarse en campo puesto que permite observar directamente las características del cauce.
- Mediante el establecimiento de puntos de aforo se observó disminución del caudal desde 1.68 m³/s a 1.17 m³/s relacionado con las bajas precipitaciones y los caudales captados por las estaciones.
- El caudal captado mayor es de 0.09m³/s y el menor es de 0.035 m³/s aproximadamente puesto que las estaciones piscícolas para su funcionamiento requieren caudales en función de la magnitud de producción haciendo necesario compensar y revisar el caudal de la fuente, los caudales captados y la calidad de agua.
- A menor tiempo de duración en el tiempo de retorno mayor es la intensidad; así pues, para el municipio de Mutiscua en un tiempo de duración de 5 minutos se presentan intensidades de 118.49, 144.34, 167.57, 204.12, 136.98, 275.13 y 389.08 para tiempos de retorno de 2, 5, 19, 25, 50, 100 y 500 años respectivamente.
- En el hietograma para el tiempo de retorno de 2 años con duración de tormenta de 0.97 horas, intensidad de lluvia de 25.46 mm/h y precipitación de 24.69 en 24 horas se tienen para el instante 30 minutos una precipitación alternada de 9.87 mm que comparado con el tiempo de retorno de 25 años con igual duración e intensidad de lluvia de 43.86 mm/h y precipitación máxima en 24 horas de 42.54 mm en el mismo instante de 30 minutos se obtiene una precipitación alterna de 17.01 mm referenciándose un aumento que se relaciona con el aumento en la precipitación.
- Los Hidrogramas para la zona de estudio indican caudales totales que varían desde 40.52 m³/s para un tiempo de retorno de 2 años hasta 69.83 m³/s en tiempo de retorno de 25 años observándose un aumento en función de las altas precipitaciones que pueden llegar a presentarse en el municipio.

- A partir del establecimiento de un punto para medir niveles (cm) en el cauce se evidencian niveles máximos de 88, 82 y 104 cm para las 7 am, 12 m y 6 pm.
- La calidad de agua en el río La Plata NO es apta para consumo humano directo sin previo tratamiento (Resolución 2115/2007), que para riego según la FAO (2006) se hace necesario revisar los requerimientos del cultivo y del suelo y así determinar si se emplea o no; de igual manera, el agua hasta el momento ha permitido a los peces una adaptación satisfactoria en cuanto a lo que se refiere a las estaciones piscícolas.
- Sobre el cauce del río La Plata se encuentra la falla La Laguna, Socotá y Mutiscua con presencia de rocas estratificadas y rocas ígneas, algunas con cierto grado metamórfico; también, se evidencian grandes bloques transportados que en su momento fueron arrastrados por corrientes torrenciales.
- El material predominante de acuerdo a la granulometría realizada en la zona son las gravas arenosas y arenas.
- Las variaciones de la altura de la superficie del agua (Wsel) para las 30 muestras de sedimento se relación con el aumento o disminución de caudal.
- En el modelo se referencia que cuanto menor sea la velocidad de flujo menor es el esfuerzo cortante y mayor será la capacidad de transporte en las zonas socavadas que en las sedimentadas y viceversa.
- Las zonas vulnerables en la región de estudio son las vegas que se encuentran en fincas o propiedad privada en el tramo comprendido entre el puente Los Salados y Molino Monarca o Molinera Herrán; de igual manera las zonas de riesgo son: Molino Monarca, las 4 estaciones piscícolas (“pesquemos”, “propiedad del señor Vera”, “propiedad señor Suarez” y HJC), zona de la vía sucre o antigua marmolería, Hogar Juvenil Campesino (HJC) y la zona que se encuentra sobre el margen derecho aguas abajo en lo correspondiente al vertimiento municipal.
- La zona de estudio – secciones presentan mayor tendencia a ser socavadas o erosionadas siendo las estructuras hidráulicas (Puentes, molino Monarca, antiguo Matadero, captaciones de estaciones piscícolas, puentes, muros o pilas) afectadas por este proceso el cual también se relaciona con desequilibrio por agua claras (material removido – material depositado) o fallo por sismos, bajos caudales, fuertes avenidas, no mantenimiento, entre otros.

RECOMENDACIONES

Por los inconvenientes presentados durante la ejecución del presente proyecto y pensando en el éxito de otros se recomienda:

- A la alcaldía del municipio como primera autoridad la puesta en marcha proyectos de investigación que permitan recolectar información preliminar tal como: topografía detallada del municipio con equipos de precisión, monitoreo de niveles y caudales, geología- geomorfología y balance hídrico.

Debido a la importancia que tiene la medición de caudales se sugiere Solicitar, aplicar y ejecutar como mínimo una estación hidrometeorológica en el municipio en convenio con el IDEAM para la gestión del riesgo proceso encaminado a generar planes de mitigación y prevención de riesgo y generar continuidad en los monitoreos de caudales y niveles.

- Preservar la vegetación para la protección y la disminución de los efectos erosivos del canal por socavación lateral.
- A la corporación Autónoma Regional de la Frontera Nororiental – CORPONOR la revisión de: las fuentes, estado de conservación, manejo de las cuencas, apoyo en la investigación y el desarrollo de procesos de levantamiento de información para el cuidado, protección y conservación de las cuencas; así mismo, seguir trabajando en pro de la generación de la cultura ambiental.
- A los ingenieros civiles la revisión detallada de las características y procesos de erosión, sedimentación, transporte, colmatación y socavación en los cauces dado que de forma general debe considerarse si el cauce es de agua clara o lecho móvil puesto que esto permite el equilibrio entre el cauce y la estructura hidráulica y por ende que esta no se afecte inmediatamente.

En cuanto a la modelación del transporte de sedimentos se recomienda a los modeladores e investigadores:

- En primer lugar contar con los datos necesarios para realizar el plan o efectuar interpolaciones lo más ajustadas posibles a las condiciones de la zona de estudio – topografía.

- Definir las condiciones de borde, mantener concordancia entre las fechas de corrida, las fechas ingresadas en el flujo, referenciar un sistema de unidades e ingresar los datos solicitados en su totalidad para cada proceso puesto que la corrida exitosa depende de los datos suministrados.
- No tomar la modelación efectuada como un proceso absoluto se destaca que está sólo representa pautas en cuanto a la magnitud y el comportamiento de la zona bajo ciertas condiciones.

BIBLIOGRAFÍA

- Universidad Nacional. (2009). *Restauración del cauce quebrada el Chumbimbo*. Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/2290/2/Informe_2.pdf
- Alvaro. (2009). Plan de ordenamiento y manejo de la cuenca del río Zulia.
- BARBOSA. (2013). *etodología para calcular la profundidad de socavación general de los ríos de montaña (lecho de gravas)*. Obtenido de UNAL: <http://www.bdigital.unal.edu.co/11674/1/1128416170.2013.pdf>
- BASILE, P. (2000). *Modelación matemática del transporte de sedimentos en condiciones desequilibrio*. Obtenido de http://www.fceia.unr.edu.ar/curiham/Secciones/Publicaciones/Geomorfologia_Erosion_etc/Basile_CNA2002.pdf
- Batalla, R. J., & Sala, M. (1996). *Aplicación de Modelos de transporte sedimento en un río permanente con Granulometría dispersa*. Obtenido de http://www.udc.es/files/iux/almacen/articulos/cd21_art13.pdf
- Castillo, L. I. (2016). sedimentos.
- Chow, V. T., & Mays., L. (1994). *Hidrología Aplicada*. Ediciones McGraw-Hill. Colombia.583 pp.
- CORPONOR. (1987). *El estudio de factibilidad técnico económico para el montaje de un aserradero de mármol en Mutiscua realizado*.
- Cupper, H. (2007). *Formulación de los objetivos de calidad para los cuerpos de agua receptores de los vertimientos líquidos de los cascos urbanos de los municipios de Toledo, Labateca, Santiago, San Cayetano, Salazar, Mutiscua, Cucutilla y Chitagá,*.
- EOI. (2007). *Hidráulica fluvial, morfología fluvial y Transporte sólido*. Obtenido de <file:///C:/Users/Yadira/Downloads/componente45416.pdf>
- Francésa, F., & Bussi, G. (2014). Análisis del impacto del cambio climático en el ciclo de sedimentos de la cuenca del río Ésera (España) mediante un modelo hidrológico distribuido. En E. S. DOYMA, *RIBAGUA* (págs. 14-25).
- García. R. (2012). *ANALISIS Y EVALUACION DE TRANSPORTE DE SEDIMENTOS EN CUENCAS MEDITERRANEAS. APLICACIÓN A LA RAMBLA DEL ALBUJÓN (CARTAGENA)*.
- Gaspari, F. J., Vagaría, A. M., Senisterra, G. E., Delgado, M. I., & Besteiro, S. I. (2013). Elementos metodológicos para el manejo de cuencas hidrográficas . En F. D. FORESTALES.
- Gelvez, R. . (2009). *Inventario detallado y caracterización de los usuarios y usos potenciales del recurso hídrico en la cuenca del río Zulia, en las veredas Tapaguá, Valegrá, La Plata, Las Mercedes, Sabana Larga, San José, La Laguna y el casco urbano*.

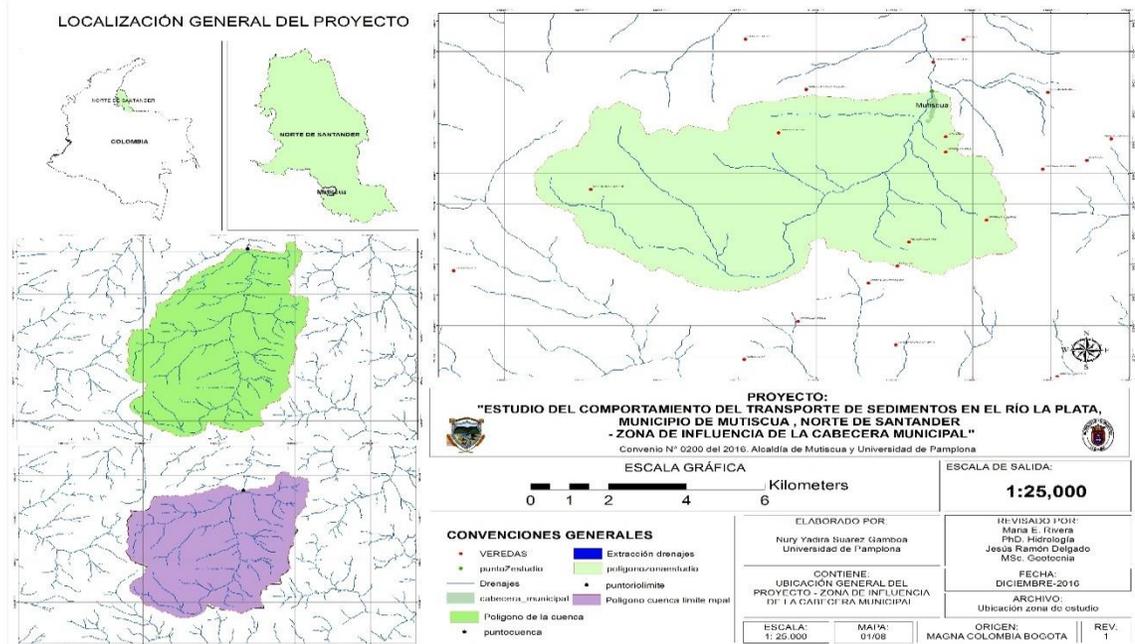
- Gómez, H. (1997). llevo a cabo la Zonificación ambiental base para un proceso de planificación del medio ambiente en las microcuencas de las quebradas El Chorrerón y Las Pavas del Municipio de Mutiscua.
- HEC-CEIWR. (2016). *Documentación HEC RAS*. Obtenido de <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>
- Henao, J.E. (1988). Introducción al Manejo de Cuencas Hidrográficas, Centro de enseñanza desescolarizada. En U. S. Tomás. Bogota, Colombia.
- Ingeominas. (2001). *CONCEPTOS GENERALES DE GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA*. Obtenido de <http://concepgeo.blogspot.com.co/2013/04/universidad-el-bosque-ingenieria.html>
- ISER. (2016). IDENTIFICACIÓN DE LOS FACTORES QUE INTERVIENEN EN EL COMPORTAMIENTO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS DEL RÍO LA PLATA, MUTISCUA- NORTE DE SANTANDER” .
- JARAMILLO. (2006). *ABORATORIO DE MECÁNICA DE SUELOS, Análisis granulométrico, [PDF]*. Obtenido de : http://icc.ucv.cl/geotecnia/03_docencia/02_laboratorio/manual_laboratorio/granulometria.pdf
- Jaramillo, L. J., & Ramírez, R. D. (2005). *Transporte de sedimentos en las corrientes del departamento de antioquia*. Obtenido de <http://www.redalyc.org/pdf/750/75004710.pdf>
- la UNESCO (2010). (2010). Procesos de erosión, sedimentacion encauces y cuencas. . vol 1.
- Langbein et al. (1947). *cuencas hidrograficas*. Obtenido de <http://es.slideshare.net/edgarnoemachacaticona/cuencas-hidrograficas-44755408>
- Lizarazo, B. (2000). *ordenamiento y reglamentación del uso del recurso hídrico en la microcuenca Canutos, Municipio de Mutiscua donde se logra la caracterización y zonificación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo*.
- Londoño. (2001). *Cuencas hidrográficas. Bases conceptuales*. Obtenido de caracterización- planificación: http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/cuencas%20hidrograficas%20bases%20conceptuales%20%20caracterizacion%20%20planificacion%20yorganizacion%20-%20CARLOS%20LONDOO.pdf
- LONDOÑO. (2001). *Cuencas hidrográficas. Bases conceptuales*. Obtenido de http://www.ut.edu.co/academi/images/archivos/Fac_Forestal/Documentos/LIBROS/cuencas%20hidrograficas%20bases%20conceptuales%20%20caracterizacion%20%20planificacion%20yorganizacion%20-%20CARLOS%20LONDOO.pdf

- López Cadenas de Llano. (1988). *Corrección de torrentes y estabilización de cauces. Colección FAO: Fomento de tierras y aguas*. Obtenido de [Hhttp://books.google.com.ar/books?id=LYSz9cvPvXwC&lpg=PA4&hl=es&pg=PP1#v](http://books.google.com.ar/books?id=LYSz9cvPvXwC&lpg=PA4&hl=es&pg=PP1#v)
- Mintegui, J. y López, F. (1990). *La ordenación agrohidrológica en la planificación*. Servicio Central de Publicaciones del Gobierno Vasco. España.
- Moya L, I. A. (2016). Congreso Latinoamericano de Hidráulica . Peru.
- Moya, L., A, I., & J, R. (2016). Congreso latinoamericano de Hidráulica. Peru.
- PBOT Mutiscua. (2016-2019). *Plam de desarrollo Municipal*.
- PIZARRO et al. (2013). *Curvas Intensidad – Duración – Frecuencia. Sociedad Estándares De Ingeniería Para Aguas Y Suelos Ltda*. Obtenido de http://eias.utalca.cl/Docs/pdf/Publicaciones/manuales/b_modulo_IDF.pdf
- Posada, & Montoya. (2000). *Capacidad del transporte de sedimentos en cuencas con informacion escasa, Posgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos UNAL*. Obtenido de UNAL, Sede Medellin: <http://www.bdigital.unal.edu.co/4428/1/Posada-Montoya.pdf>> en: <http://repository.lasalle.edu.co/bitstream/handle/10185/15450/T40.10%20P371e.pdf?sequence=1>
- Quintero, J. E. (2005). *Estudio de técnicas nucleares Aplicando a la Medición de la Concentración de Sedimentos en Suspensión en Fuentes Hídricas*. Obtenido de <http://www.unilibre.edu.co/revistaavances/avances-2/articulo3.pdf>
- Ramos, C. L. (2012). *MÉTODOS DE ANÁLISIS DEN RECURSOS HÍDRICOS, APLICACIONES DEL HEC HMS Y HEC RAS. PERÚ*.
- Resolución 2115. (2007). Ministerio de la proyección social . *Ministerio de ambiente, vivienda y desarrollo territorial*. .
- Rojas, E J. & Rojas, E G. (2010). *Desarrollaron la implementación del plan de manejo ambiental con énfasis en labranza mínima, pesticidas y abonos orgánicos*.
- Rosario, B. G., Nadia, G. L., Michel, M. A., & Alejandra, R. G. (2012). *Análisis granulométrico*.
- Sanchez, J. (2008). *precipitaciones*. <http://hidrologia.usal.es/temas/Precipitaciones.pdf>.
- Strahler. (1952). *ANÁLISIS HIPSOMÉTRICO, FRECUENCIAALTIMÉTRICA Y PENDIENTES MEDIAS A PARTIR DE MODELOS DIGITALES DEL TERRENO*. http://www.fceia.unr.edu.ar/fisiografia/volumen77/BIFG_77_31.pdf.
- TÉMEZ, J. (1978). *Cálculo Hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras. Madrid.
- Universidad del Cauca. facultad de ingeniería Civil. (2006). *transporte de sedimentos* . Popayan.
- Villón, M. G. (2009). *HEC - RAS Ejemplos*. Cartago - Costa Rica.

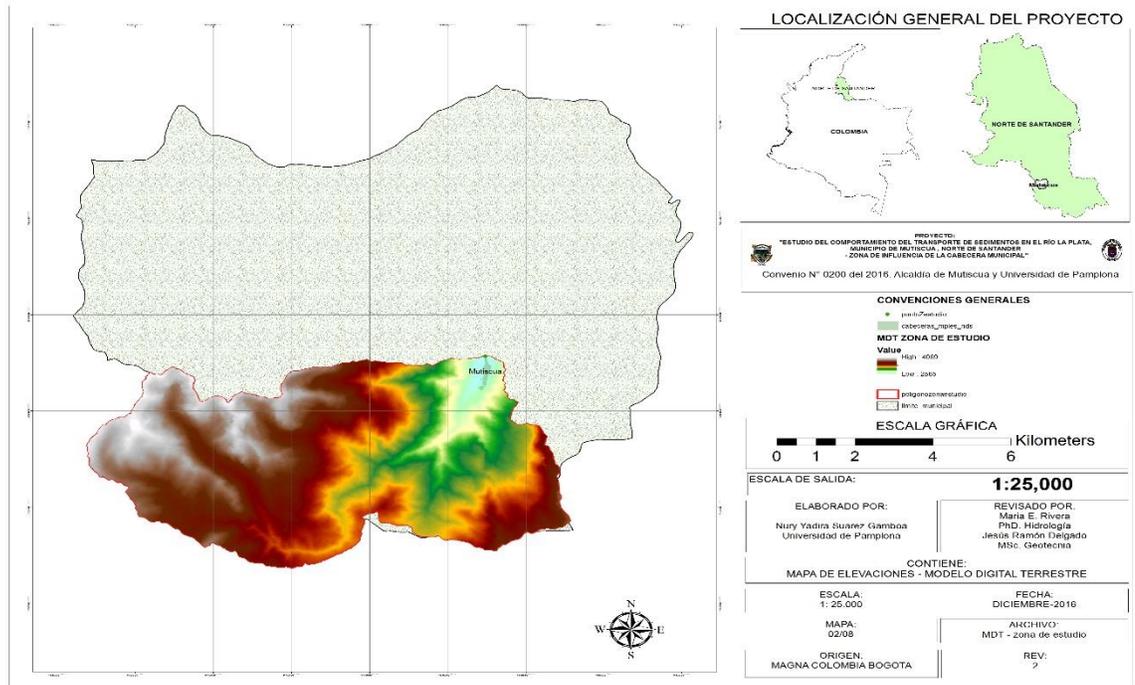
Yepez, O. (2016). *transporte de sedimentos*. Obtenido de <http://sedimentologiagrupo02.blogspot.com.co/2016/03/transporte-de-sedimentos.html>

ANEXOS

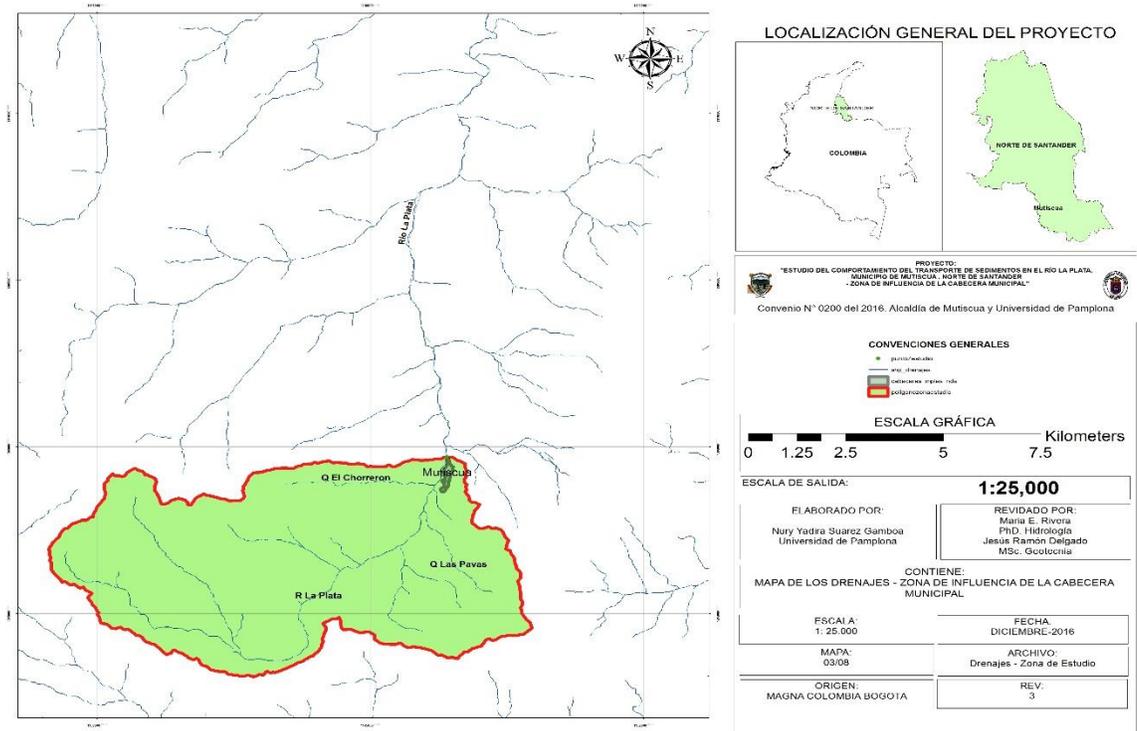
Anexo 1. Ubicación general del proyecto.



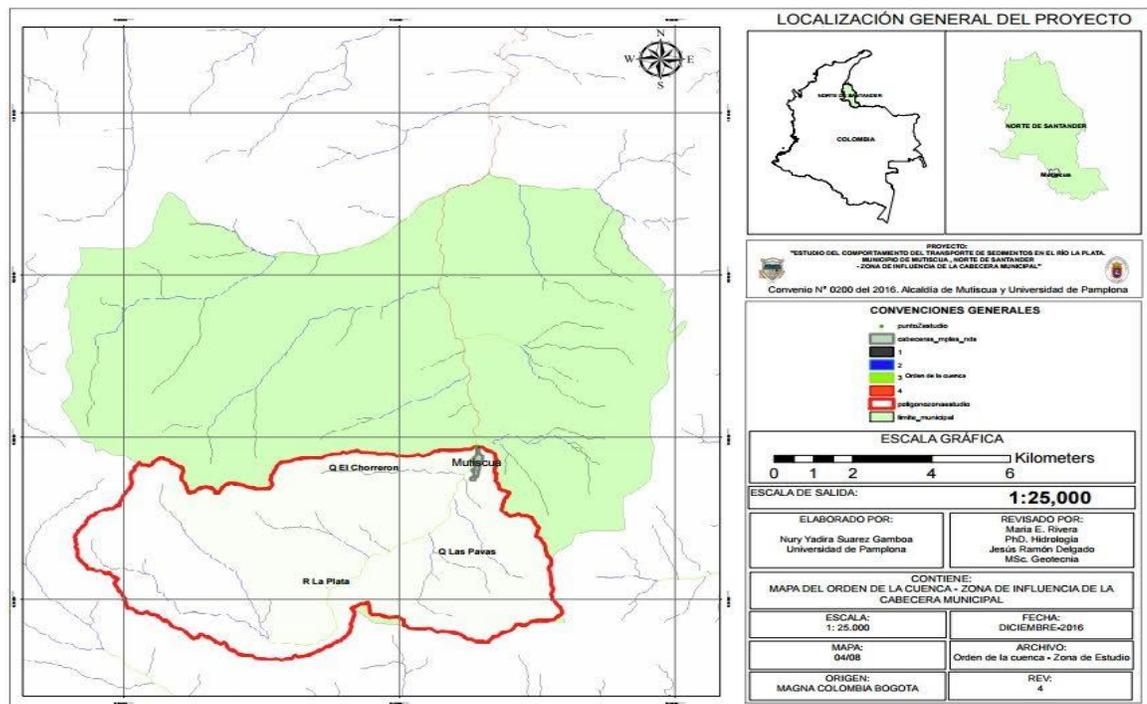
Anexo 2. Mapa de elevaciones



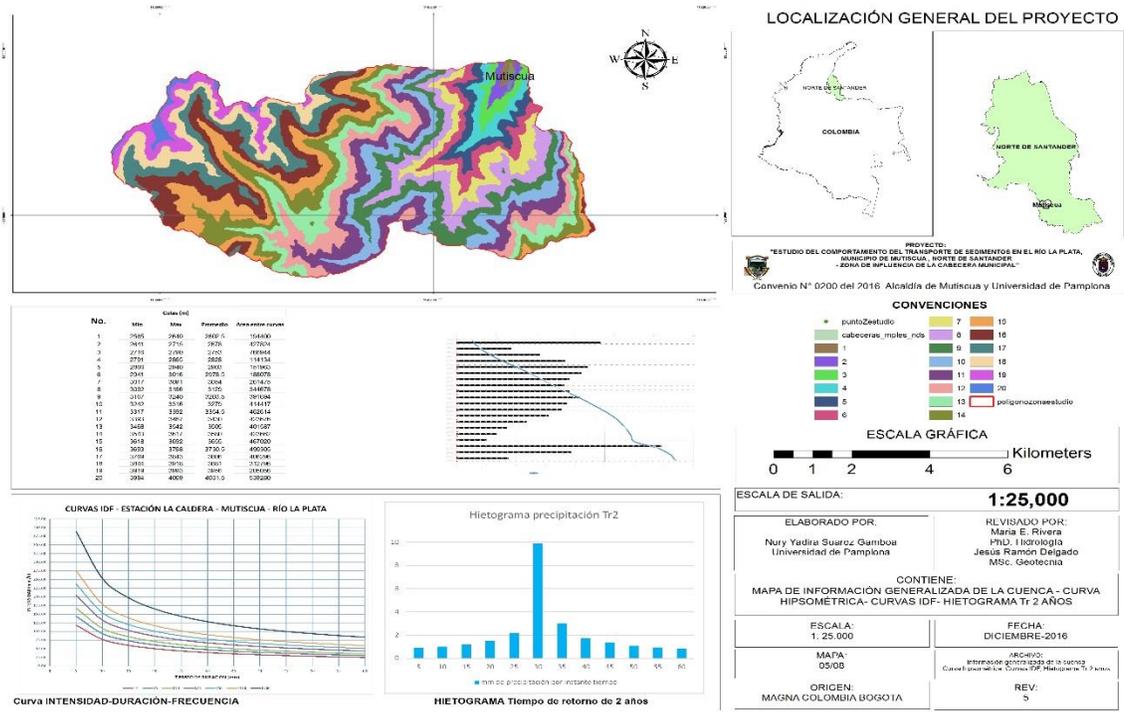
Anexo 3. Mapa de los drenajes



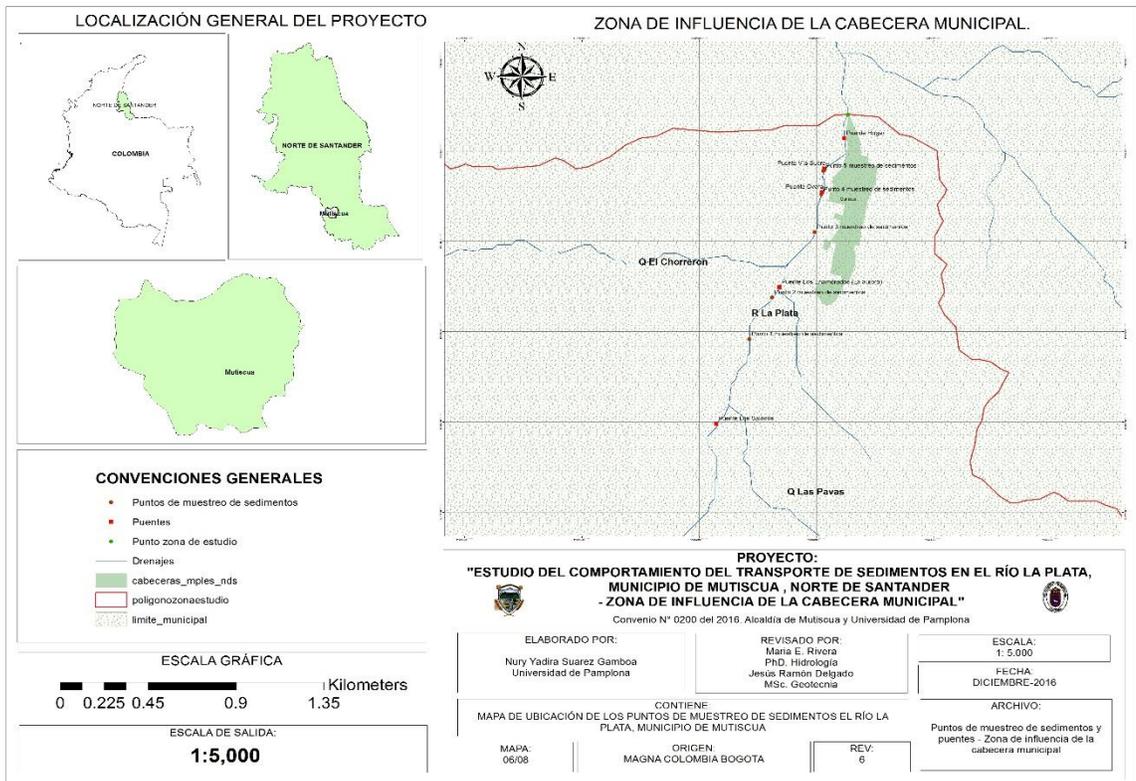
Anexo 4. Mapa de orden de la cuenca



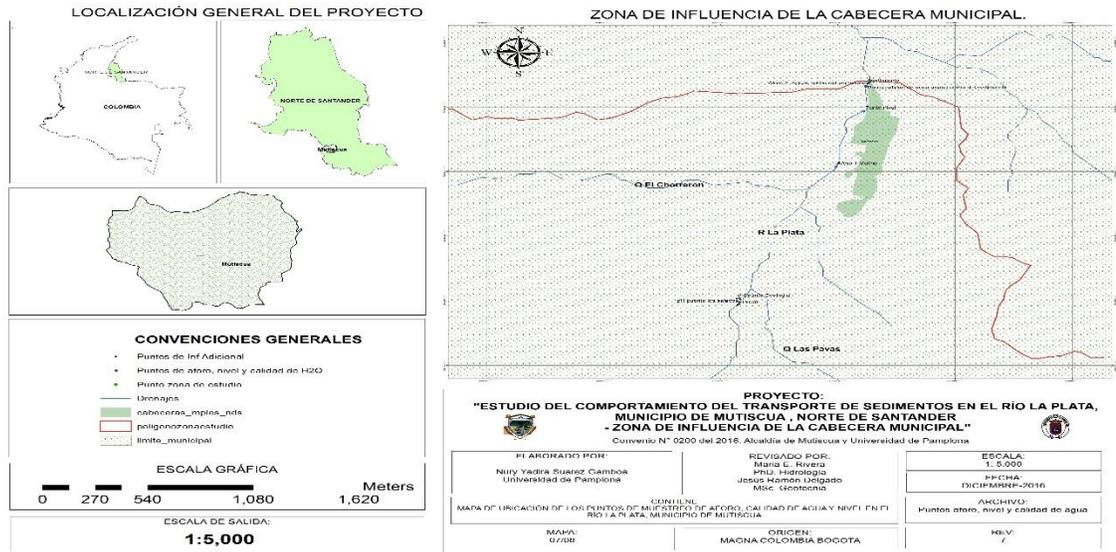
Anexo 5. Mapa de información generalizada de la cuenca



Anexo 6. Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de sedimentos



Anexo 7. Mapa de ubicación de los puntos de aforo, calidad de agua y nivel



Anexo 8. Elevación de la superficie de agua en función de los sedimentos

