



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA
CONSTRUCCIÓN**

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCION DEL
TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TEMA: HIDROLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA
DEL RÍO SANTA CLARA**

AUTOR: GUZMÁN FLORES ALEX MAURICIO

**DIECTOR: ING. PHD. MASABANDA MARCO
SANGOLQUÍ**

2017



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

CERTIFICACIÓN

Certifico que el trabajo de titulación, "**HIDROLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**" realizado por el señor **ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES**, ha sido revisado en su totalidad y analizado por el software anti-plagio, el mismo cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditarlo y autorizar a el señor **ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES** para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 23 de Febrero de 2016

Atentamente,

Dr. Ing. Marco Masabanda
DIRECTOR





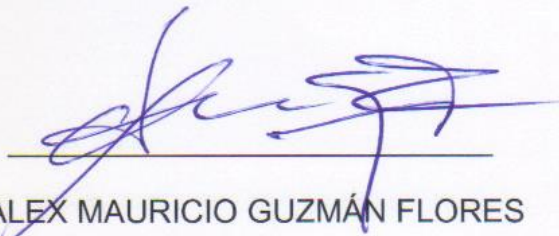
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

Yo, **ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES**, con cédula de identidad N° 172257029-6, declaro que este trabajo de titulación "**HIDROLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**", ha sido desarrollado considerando los métodos de investigación existentes, así como también se ha respetado los derechos intelectuales de terceros, considerándose en las citas bibliográficas.

Consecuentemente declaro que este trabajo es mi autoría, en virtud de ello me declaro responsable del contenido, veracidad y alcance del trabajo de titulación mencionado.

Sangolquí, 23 de Febrero de 2016



ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES

C. C. 172257029-6



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y LA CONSTRUCCIÓN
CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL

AUTORIZACIÓN

Yo, **ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar en la biblioteca virtual de la Institución el presente trabajo de titulación "**HIDROLOGÍA Y SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**", cuyo contenido, ideas y criterios son de mi exclusiva autoría y responsabilidad.

Sangolquí, 23 de Febrero de 2016

ALEX MAURICIO GUZMÁN FLORES

C. C. 172257029-6

Dedicatoria

A mis padres, Jorge y Mariana, por su amor infinito y apoyo incondicional, por los esfuerzos y sacrificios que han hecho por mí, por la paciencia y por saber guiar mi vida, a ustedes les debo todo lo que soy.

A mis hermanos Jorge Luis y Evelyn, que son mi orgullo y llenan mi vida de alegría.

A Paola, por motivarme y darme fuerzas cuando más lo necesito.

Agradecimientos

A Dios, por bendecirme con la familia y amigos que tengo.

A mi director de tesis, Dr. Marco Masabanda, que sin su ayuda y conocimientos no hubiese sido posible realizar este proyecto.

A mis padres, quienes son los responsables de todos mis logros, gracias por brindarme un hogar lleno de amor y comprensión.

A Karen, con quien he compartido toda mi vida universitaria, gracias por tu amistad, vamos por más.

A Christian por contribuir con sus conocimientos en la elaboración de este proyecto.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CERTIFICACIÓN.....	II
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	III
AUTORIZACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS.....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	VII
RESUMEN.....	XVII
ABSTRACT	XVIII
CAPÍTULO 1.....	1
INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.2. ANTECEDENTES	2
1.3. OBJETIVOS	5
1.3.1 OBJETIVO GENERAL.....	5
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
1.4. ALCANCE	6
1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA	7
1.6. METODOLOGÍA.....	9
CAPÍTULO 2.....	11
DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA.....	11
2.1. UBICACIÓN	11
2.2. DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA.....	14
2.3. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA.....	15
2.3.1 ÁREA DE LA CUENCA	15
2.3.2 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L).....	16
2.3.3 FACTOR DE FORMA (K)	18

2.3.4 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA.....	20
2.3.5 COEFICIENTE DE GRAVELIUS	21
2.3.6 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL	22
CAPÍTULO 3.....	24
ESTUDIO HIDROLÓGICO	24
3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	24
3.1.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA	24
3.1.2 INFORMACIÓN METEROLÓGICA.....	25
3.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS	26
3.2.1 ORDEN DE CORRIENTES	26
3.2.2 DENSIDAD DE CORRIENTE	29
3.2.3 DENSIDAD DE DRENAJE.....	30
3.2.4 CURVA HIPSOMÉTRICA	32
3.3 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DE PRECIPITACIÓN	35
3.3.1 POLÍGONOS DE THIESSEN.....	40
3.4 VOLUMEN PROMEDIO DE PRECIPITACIONES.....	44
3.5 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO	44
3.6 CAUDAL MÁXIMO.....	46
3.7 VOLUMEN ESCURRIDO.....	52
3.8 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (T_C).....	52
3.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETORNO T	54
3.10 AFORO DEL RÍO SANTA CLARA.....	55
3.10.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE AFORO	56
3.10.1.1 MÉTODO VOLUMÉTRICO	56
3.10.1.2 MÉTODO DEL VERTEDERO	56
3.10.1.3 MÉTODO DEL FLOTADOR.....	56
3.10.1.4 APLICACIÓN DEL MOLINETE	56
3.10.2 AFORO DEL RÍO SANTA CLARA	57
3.10.2.1 ANCHO DE LA SECCIÓN	58
3.10.2.2 ÁREA DE LA SECCIÓN	59

3.10.2.3 VELOCIDAD MEDIA	59
3.10.2.4 VELOCIDAD MÁXIMA	59
3.10.2.5 PROFUNDIDAD MÁXIMA.....	59
3.10.2.6 RADIO HIDRÁULICO	59
3.10.2.7 VELOCIDAD SUPERFICIAL MEDIA.....	60
3.10.3 UBICACIÓN DE LAS SECCIONES DE CONTROL	60
3.10.4 RESULTADOS DEL AFORO EN LA SECCIÓN 1.....	62
3.10.5 RESULTADOS DEL AFORO EN LA SECCIÓN 2.....	66
CAPÍTULO 4.....	71
SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA.....	71
4.1 SEDIMENTOLOGÍA	71
4.1.1 CLIMA	71
4.1.2 TEMPERATURA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA	72
4.1.3 VEGETACIÓN	73
4.1.4 USO DE SUELO	74
4.1.5 COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL SANTA CLARA	76
4.1.6 TIPO DE SUELO	77
4.1.7 ORDEN DE SUELOS EN LA CUENCA DEL SANTA CLARA.....	78
4.1.8 TOPOGRAFIA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA	80
4.2 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA	81
4.2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GAVRILOVIC	82
CAPÍTULO 5.....	93
MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN HEC-RAS.....	93
5.1 MODELAMIENTO EN HEC-RAS	93
5.1.1 RED DE TRIÁNGULOS IRREGULARES TIN	93
5.1.2 PENDIENTE DEL RÍO SANTA CLARA	93
5.1.3 CAUDALES DE MODELAMIENTO.....	94
5.1.4 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING (n)	94
5.1.5 TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYO EN LABORATORIO	95

5.2 DESARROLLO DEL MODELO	98
5.2.1 DETERMINACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES	98
5.3 SIMULACIÓN EN HEC RAS	107
5.3.1 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN EN HEC-RAS	108
5.3.2 CALCULO DE LA PENDIENTE	111
5.3.3 CORTES TRANSVERSALES AGUAS ARRIBA A 26169.63m ..	117
5.3.4 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ARRIBA A 16385.15 m	119
5.3.5 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ABAJO A 9354.10 m	121
5.3.6 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ABAJO A 280.31 m	123
5.4 MAPA DE MODELAMIENTO DE SEDIMENTOS Y CAUDALES	124
CAPÍTULO 6.....	126
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	126
BIBLIOGRAFÍA.....	128
ANEXOS	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación del Río Santa Clara (Google Earth)	2
Figura 2. Ubicación del cantón Rumiñahui	3
Figura 3. Ubicación Geográfica del cantón Rumiñahui (ArcGis 10.3).....	12
Figura 4. Afluentes del Río Santa Clara.....	13
Figura 5. Delimitación de la Cuenca del Río Santa Clara (ArcGIS).....	15
Figura 6. Longitud y Perímetro de la Cuenca.....	17
Figura 7. Perfil longitudinal del Río Santa Clara. ArcGIS10.3	23
Figura 8. Modelo Digital del Terreno	24
Figura 9. Modelo Digital del Terreno	25
Figura 10. Orden de Corrientes en una cuenca de quinto orden.....	27
Figura 11. Orden de Corrientes de la cuenca del Río Santa Clara.....	28
Figura 12. Clasificación por intervalos de curvas de nivel.....	32
Figura 13. Área entre curvas de nivel.....	33
Figura 14. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Santa Clara.....	34
Figura 15. Cambio de forma de la curva hipsométrica	35
Figura 16. Histograma Estación La Tola (2005-2015).....	38
Figura 17. Histograma Estación Izobamba (2005-2015)	38
Figura 18. Histograma Estación Uyumbicho (2005-2015).....	39
Figura 19. Histograma Estación Rumipamba (2005-2015).....	39
Figura 20. Trazado de los polígonos de Thiessen	41
Figura 20. Trazado de los polígonos de Thiessen.	42
Figura 22. Módulos específicos de escorrentía.....	45
Figura 23. cálculo del tiempo de concentración.	54

Figura 24. Sección transversal de un punto de aforo.....	57
Figura 25. Puntos de control para cálculo de aforos (ARCGis 10.3)	60
Figura 26. Puntos de control para cálculo de aforos (Google Earth)	61
Figura 27. Sección Transversal Punto 1	62
Figura 28. Perfiles de Flujo en los puntos A, B, C y D de la Sección 1.	64
Figura 29. Perfiles de Flujo en los puntos E, F, G y H de la Sección 1.	65
Figura 30. Sección Transversal Punto 2	66
Figura 31. Perfiles de Flujo en los puntos R, S, T y U de la Sección 2.....	68
Figura 32. Perfiles de Flujo en los puntos V, W, X y Y de la Sección 2.....	69
Figura 33. Cobertura vegetal y uso de suelo de la Cuenca.....	76
Figura 34. Orden de suelos de la Cuenca del Río Santa Clara.....	78
Figura 35. Porcentaje de pendientes en la Cuenca del Río Santa Clara.....	81
Figura 36. Flujograma del modelo cartográfico de Gavrilovic.....	88
Figura 37. Coeficiente de erosión Z en la cuenca	89
Figura 38. Producción media anual de sedimento (W).....	90
Figura 39. Volumen de sedimento producido por erosión.	91
Figura 40. Curva Granulométrica de la muestra de sedimentos de fondo....	97
Figura 41. Ventana Principal de HEC-RAS 5.0.1	98
Figura 42. Definición de sistema métrico en HEC-RAS	98
Figura 43. Geometría del río Santa Clara en HEC-RAS	99
Figura 43. Asignación de parámetros en HEC-RAS.....	99
Figura 45. Modelación en HEC-RAS	100
Figura 46. Modelación del Río Santa Clara en HEC-RAS.....	100
Figura 47. Visualización de coordenadas X, Y, Z del Río Santa Clara	101

Figura 48. Perfil longitudinal del río Santa Clara en HEC-RAS	101
Figura 49. Sección transversal en la abscisa 26100 del Río Santa Clara ..	102
Figura 50. Sección transversal en la abscisa 25800 del Río Santa Clara ..	102
Figura 51. Sección transversal en la abscisa 25500 del Río Santa Clara ..	103
Figura 52. Sección transversal en la abscisa 24300 del Río Santa Clara ..	103
Figura 53. Sección transversal en la abscisa 23700 del Río Santa Clara ..	103
Figura 54. Sección transversal en la abscisa 22500 del Río Santa Clara ..	104
Figura 55. Sección transversal en la abscisa 21900 del Río Santa Clara ..	104
Figura 56. Sección transversal en la abscisa 21000 del Río Santa Clara ..	104
Figura 57. Sección transversal en la abscisa 19800 del Río Santa Clara ..	105
Figura 58. Sección transversal en la abscisa 19200 del Río Santa Clara ..	105
Figura 59. Sección transversal en la abscisa 18900 del Río Santa Clara ..	105
Figura 60. Sección transversal en la abscisa 7200 del Río Santa Clara	106
Figura 61. Sección transversal en la abscisa 2985.88 del Río Santa Clara	106
Figura 62. Sección transversal en la abscisa 1200 del Río Santa Clara	106
Figura 63. Sección transversal en la abscisa 900 del Río Santa Clara	107
Figura 64. Sección transversal en la abscisa 300 del Río Santa Clara	107
Figura 65. Mapa de ubicación de tramo de la simulación.	108
Figura 66. Generación del DEM en HEC-RAS.....	109
Figura 67. Perfil de corte transversal aguas arriba.....	109
Figura 68. Perfil de corte transversal aguas abajo	109
Figura 69. Generación de la grilla para la simulación.....	110
Figura 70. Asignación de parámetros en el área de simulación	110
Figura 71. Generación de la grilla para la simulación.....	111

Figura 72. Asignación de parámetros en el área de simulación	112
Figura 73. Ejecución de la simulación en HEC-RAS	113
Figura 74. Simulación con CAUDAL 1.03 m ³ /s.....	113
Figura 75. Simulación con CAUDAL 1.44 m ³ /s.....	114
Figura 76. Simulación con CAUDAL 1.94 m ³ /s.....	114
Figura 77. Simulación con CAUDAL 68.9 m ³ /s.....	115
Figura 78. Ubicación de las secciones en el Río Santa Clara	116
Figura 79. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m ³ /s	117
Figura 80. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m ³ /s	117
Figura 81. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.94 m ³ /s	118
Figura 82. Sección transversal con simulación de CAUDAL 68.9 m ³ /s	118
Figura 83. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m ³ /s	119
Figura 84. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m ³ /s	119
Figura 85. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.94 m ³ /s	120
Figura 86. Sección transversal con simulación de CAUDAL 68.9 m ³ /s	120
Figura 87. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m ³ /s	121
Figura 88. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m ³ /s	121
Figura 89. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.94 m ³ /s	122
Figura 90. Sección transversal con simulación de CAUDAL 68.9 m ³ /s	122
Figura 91. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m ³ /s	123
Figura 92. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m ³ /s	123
Figura 93. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.94 m ³ /s	124
Figura 94. Sección transversal con simulación de CAUDAL 68.9 m ³ /s	124
Figura 95. Mapa de modelamiento de sedimentos y caudales.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Distribución de la población (2010)	4
Tabla 2 Coordenadas UTM de la Cuenca del Río Santa Clara	11
Tabla 3 Datos de la Cuenca del río Santa Clara	18
Tabla 4 Valores interpretativos del factor forma.	19
Tabla 5 Característica cualitativa del relieve de una cuenca.....	21
Tabla 6 Forma de la cuenca según el Índice de compacidad de Gravelius. .	22
Tabla 7 Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca	26
Tabla 8 Valores interpretativos de la densidad de drenaje.....	31
Tabla 9 Datos para el análisis de la curva hipsométrica	33
Tabla 10 Datos de precipitaciones mensuales de la estación LA TOLA.....	36
Tabla 11 Datos de precipitaciones mensuales de la estación IZOBAMBA. .	36
Tabla 12 Datos de precipitaciones de la estación UYUMBICHO.	37
Tabla 13 Datos de precipitaciones de la estación RUMIPAMBA.....	37
Tabla 14 Resumen de los datos de las 4 estaciones.	40
Tabla 15 Cálculos del método de Thiessen	43
Tabla 16 Valores del coeficiente α	51
Tabla 17 Caudales máximos para la cuenca del Río Santa Clara.....	51
Tabla 18 Cálculos para el período de retorno	55
Tabla 19 Coordenadas UTM de las secciones de control.	61
Tabla 20 Medición de velocidades en la Sección de Control 1.	62
Tabla 21 Resultados del Aforo en la Sección de Control 1	65
Tabla 22 Medición de velocidades en la Sección de Control 2.	67
Tabla 23 Resultados del Aforo en la Sección de Control 2	69

Tabla 24 Caudales resultantes del aforo con molinete.....	70
Tabla 25 Temperatura media mensual y anual (°C).....	73
Tabla 26 Cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca.....	77
Tabla 27 Orden de suelos en la cuenca del Río Santa Clara.....	79
Tabla 28 Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic.....	83
Tabla 29 Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic.....	84
Tabla 30 Clasificación de pendientes	85
Tabla 31 Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic.....	86
Tabla 32 Coordenadas UTM de las secciones de control.	95
Tabla 33 Resultados de análisis en la sección del Punto 1.....	96
Tabla 34 Resultados de análisis en la sección del Punto 2.....	96
Tabla 35 Cálculo de porcentajes granulometría de sedimentos	97

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo estimar la cantidad de sedimentos producidos por erosión superficial en la cuenca del Río Santa Clara que son transportados a la sección de cierre de la misma. Para esto se realizó el estudio hidrológico de la cuenca en base al modelo digital del terreno en escala 1:5000 y a los datos de precipitaciones mensuales registrados en un periodo de once años en las estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca. Se determinó un valor de precipitación media anual en la cuenca igual 2280.66 mm y un caudal medio igual a 2.89 m³/s. La erosión superficial la cuenca del río Santa Clara ocurre principalmente debido al impacto de las gotas de lluvia en el suelo y al escurrimiento del agua sobre la superficie, por lo que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores tales como topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología, entre otros. Para determinar la cantidad de sedimentos que son transportados al punto de cierre de la cuenca, se utilizó el método de Gavrilovic que da como resultado 268719.89 m³/año. En el quinto capítulo se presenta la modelación y simulación del transporte de sedimentos con los caudales medio, máximo en un periodo de retorno de diez años y los calculados mediante aforos realizados en dos secciones transversales del río.

PALABRAS CLAVE:

- **HIDROLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**
- **SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**
- **EROSIÓN SUPERFICIAL EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA**

ABSTRACT

The present work aims to estimate the amount of sediments produced by surface erosion in the basin of the Santa Clara River that are transported to the closing section of the same. For this, the hydrological study of the basin was carried out based on the digital model of the terrain in a scale of 1: 5000 and the monthly precipitation data recorded over a period of eleven years in the meteorological stations near the basin. A mean annual precipitation value was determined in the basin equal to 2280.66 mm and a mean flow rate of 1.03 m³ / s. Surface erosion in the basin of the Santa Clara river occurs mainly due to the impact of raindrops on the soil and water runoff on the surface, so erosion processes are the result of the interaction of factors such as topography, climate, soil type, land use, vegetation, geological characteristics, geomorphology, among others. To determine the amount of sediment that is transported to the catchment point of the basin, the Gavrilovic method was used, resulting in 268719.89 m³ / year. The fifth chapter presents the modeling and simulation of sediment transport with average, maximum flow rates in a return period of ten years and those calculated by measurements in two cross sections of the river.

KEYWORDS:

- **HYDROLOGY OF THE SANTA CLARA RIVER BASIN**
- **SEDIMENTOLOGY OF THE SANTA CLARA RIVER BASIN**
- **SURFACE EROSION IN THE SANTA CLARA RIVER BASIN**

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. INTRODUCCIÓN

Un río es una corriente natural que transporta el agua proveniente de toda su cuenca hidrográfica hacia su punto de desembocadura. Es importante el estudio hidrológico de la cuenca para poder determinar las características de la misma, tales como los caudales máximos en un periodo determinado de tiempo, la cantidad de sedimento que es arrastrado por el río, las características geomorfológicas de la cuenca y el impacto que tiene la intervención del hombre sobre la misma, entre otras. De esta manera se puede determinar el aprovechamiento de los recursos hídricos que genera la cuenca.

Para la realización de este estudio se debe tomar en cuenta todos los factores que afectan el comportamiento de la cuenca, tales como la geomorfología, datos meteorológicos, la erodabilidad del suelo, el arrastre de sedimentos, uso del suelo, entre otros. Según (Morgan, 2005), la erosión y sedimentación que se produce en un determinado suelo depende de las características de las siguientes variables:

- Clima
- Vegetación
- Tipo de suelo
- Topografía
- Uso de la tierra

Debido a la presencia de estos factores, un río además de transportar agua, también arrastra una gran variedad de sedimentos que proceden del mismo cauce y de la cuenca hidrográfica de la que forma parte. Los

sedimentos son transportados por toda la extensión que recorre el río, lo que a largo plazo provoca la modificación de sus secciones transversales.

Los ríos y cuencas hidrográficas tienen características únicas y diferentes a otros sistemas hidrográficos. Las variables a tomar en cuenta en el comportamiento físico de la cuenca son muchas y de gran complejidad ya que existen muchos factores que no pueden ser medidos de manera exacta en el campo. Debido a esto, los resultados que se obtienen son únicamente aproximaciones generales que son calculados de manera empírica.

En el presente documento se realiza un análisis hidrológico y sedimentológico de la cuenca del Río Santa Clara, basado en métodos empíricos de cálculo de caudales y de cálculo de la cuantificación de sedimentos transportados hacia el cierre de la cuenca hidrográfica.

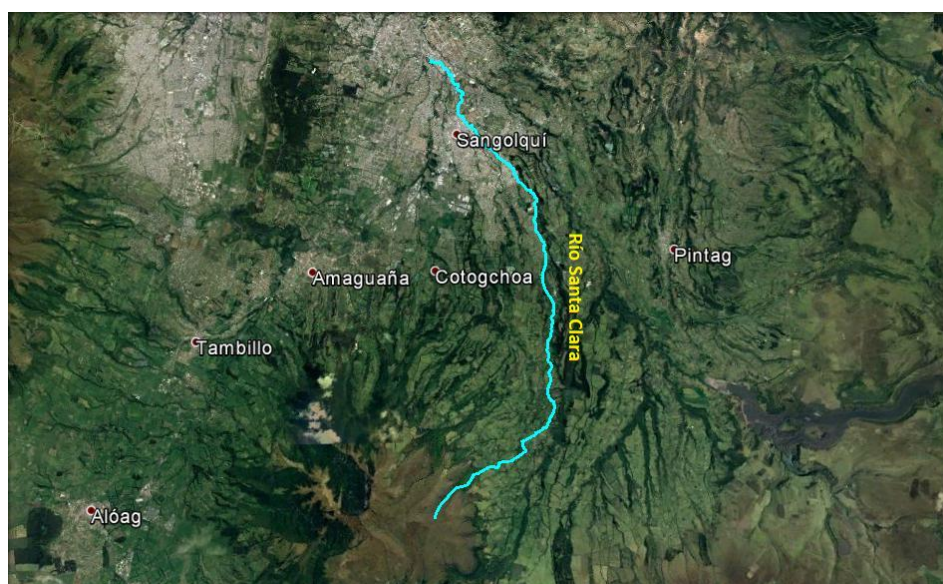


Figura 1. Ubicación del Río Santa Clara

Fuente: (Google Earth)

1.2. ANTECEDENTES

Los ríos, cualquiera que sea el tamaño de su cuenca, experimentan cambios constantes en su forma y en las dimensiones de sus

parámetros más importantes, pues constituyen sistemas muy dinámicos controlados por el régimen hidrológico y por las características del transporte de sedimentos (LEOPOLD & J.P., 1964)

En el Ecuador, así como en el resto del mundo, las características climatológicas dependen de muchos componentes que influyen en las condiciones naturales del área de estudio, tales como: ubicación geográfica, altura sobre el nivel del mar, accidentes geográficos, cobertura vegetal, vientos, etc.

La cuenca del Río Santa Clara se encuentra ubicada en la parte centro norte de la sierra ecuatoriana, específicamente en el cantón Rumiñahui que se encuentra ubicado al sureste de la Provincia de Pichincha.

El cantón Rumiñahui es el más pequeño de la provincia de Pichincha con una extensión de 134.15 km² y como se muestran en la **Figura 2**, tiene los siguientes límites: al norte, al este y al oeste con el cantón Quito y al sur con el cantón Mejía. (GOBIERNO MUNICIPAL DE RUMIÑAHUI, 2017).

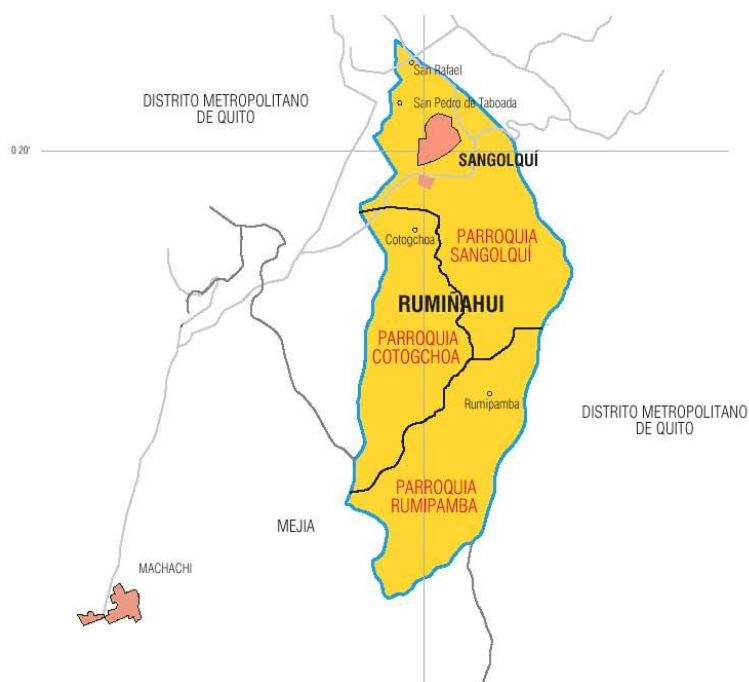


Figura 2. Ubicación del cantón Rumiñahui

Fuente: (GOBIERNO MUNICIPAL DE RUMIÑAHUI, 2017)

Según el último Censo de Población y Vivienda (INEC, 2010), el cantón Rumiñahui tiene una población la población total de 85.852 habitantes, la cual está distribuida de la siguiente manera. Ver Tabla 1:

Tabla 1

Distribución de la población (2010)

Nombre de parroquia	de Área Urbana	Área Rural	Total
SANGOLQUÍ	75080	6060	81140
COTOGCHOA	0	3937	3937
RUMIPAMBA	0	775	775
TOTAL	75080	10772	85852

Fuente: (INEC, 2010)

El cantón Rumiñahui en términos generales tiene un clima agradable el cual, en condiciones normales varía desde los 16 grados hasta los 23 grados de temperatura. Por su territorio cruzan varios ríos y quebradas, entre los principales se encuentran río San Pedro, río Pita, río Santa Clara. En cuanto a su flora, se observan cultivos de trigo, papas, habas, mellocos, ocas, entre otras; en cambio a su fauna se encuentran diversas clases de aves (la tórtola, mirlo, gallinazos), ganado vacuno, porcino y ovino. (SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN, 2013)

La topografía que tiene la cuenca del Río Santa Clara se puede denominar como irregular, debido a la presencia de accidentes geográficos que caracterizan al sistema montañoso del que forma parte, esto implica que la cuenca es susceptible a tener una mayor erosión debido a las variables climatológicas del sector y a la influencia de las actividades del hombre en el manejo y uso del suelo, que muchas veces por el beneficio económico y su necesidad no consideran factores que afectan el proceso erosivo normal y el suelo pierde las características naturales que posee.

El Ecuador tiene escasa información precisa sobre los factores que afectan el comportamiento de los sistemas hidrográficos. Pese a la importancia que implica el estudio de transporte de sedimentos en el sistema fluvial, estos no son considerados en el estudio de las redes hidrométricas de nuestro país.

Los datos de precipitación proporcionados por el INAMHI, son de gran importancia para el correcto desarrollo de estudios hidrológicos, ya que proporcionan valiosa información que colabora en la determinación de caudales y esorrentía de la cuenca en análisis.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

El presente proyecto tiene como finalidad determinar la cantidad de sedimentos producido por erosión superficial en la cuenca del río Santa Clara, y que es transportado a la sección de unión con el Río San Pedro.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar el Caudal del Río Santa Clara.
- Realizar el levantamiento del perfil del cauce principal del Río Santa Clara.
- Determinar secciones transversales de control.
- Caracterizar los parámetros geomorfológicos y meteorológicos de la cuenca del Río Santa Clara.
- Cuantificar el volumen de sedimentos arrastrados por la corriente del Río Santa Clara.
- Elaboración de la geodatabase en el software ArcGis 10.3.
- Elaboración de modelo y simulación del transporte de sedimentos en HEC-RAS

- Realizar aforos de caudales en las secciones de control transversales definidas utilizando molinete suspendido por barras.

1.4. ALCANCE

El análisis hidrológico y sedimentológico de la Cuenca del Río Santa Clara, tendrá como resultado determinar la cantidad de sedimentos producidos por erosión superficial en la cuenca, y que es transportado a la sección de cierre del Río Santa Clara.

Caracterizando al tipo de variables que produce la pérdida de suelo y erosión en la cuenca, se determinará la cantidad de sedimentos que arrastra el cauce del río, se determinará su origen y la influencia de los factores climatológicos y ambientales que afectan a toda la superficie de la cuenca del Río Santa Clara.

Se realizará la elaboración de la Geodatabase utilizando el software ArcGis 10.3, y mediante el uso de sus herramientas se obtendrá la delimitación de la cuenca, sus parámetros geomorfológicos y el levantamiento del perfil del cauce principal del Río Santa Clara.

Se recopilará información de datos meteorológicos de los anuarios publicados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) con la cual se obtendrá el cálculo del caudal y de los tiempos de concentración del Río Santa Clara.

Mediante el uso del software HEC-RAS se modelará el transporte de sedimentos a lo largo del río Santa Clara.

En las secciones de control determinadas se realizará el cálculo de aforos utilizando molinete suspendido por barras. Además se tomarán muestras para la realización de ensayos de granulometría, sólidos suspendidos y sólidos totales. Con los resultados de estos ensayos se realizará la simulación del transporte de sedimentos del Río Santa Clara en HEC-RAS.

Mediante el método de (Gavrilovic, 1988) se determinará la cantidad de material producido por erosión superficial en la cuenca del Río Santa Clara, y que será transportado a la sección de cierre de la misma.

1.5. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA

El estudio sedimentológico e hidrológico del río Santa Clara fue escogido como tema de investigación con el propósito de tener un análisis del transporte de sedimentos a lo largo de toda su geografía, considerando todos los parámetros morfológicos y los factores externos que afectan al comportamiento del mismo.

El análisis hidrológico y sedimentológico en una cuenca hidrográfica es de suma importancia en los estudios previos a la construcción de toda obra hidrotécnica ya que los resultados obtenidos tanto de caudales máximos, tiempos de retorno son los puntos de partida para el diseño de dichas obras. Debido a la inversión económica que toda obra implica, es fundamental conocer el comportamiento del río para así evitar errores en el diseño y tener una vida útil de la obra óptima. Además el comportamiento del transporte de sedimentos a lo largo del cauce de los ríos, da la pauta en planes de prevención y mitigación de desastres en zonas vulnerables a inundaciones por crecidas de ríos o por lahares volcánicos, ya que todo el material que es arrastrado a largo plazo altera las secciones transversales del río formando depósitos que afectan el paso del caudal en diferentes puntos.

En lo que concierne al transporte de sedimentos dentro de un afluente, se deben citar dos funciones principales lo que conlleva a hablar de un fenómeno un tanto difícil de calcular. El primero que es básicamente las propiedades que afectan la pérdida de suelo de la cuenca y la segunda que envuelve la capacidad del afluente principal para transportar los sedimentos de dicha cuenca.

Esta breve explicación da un panorama un tanto desalentador para poder explicar de manera simple el traslado de sedimento, lo que hace aún más difícil la aplicación de la mecánica de fluidos para el cálculo de los mismos.

También es necesario recalcar que por la existencia de agentes externos o ajenos al fluido en estudio, el análisis se vuelve aún más desfavorable si no se toma en cuenta todas las variables.

La pérdida de suelo en una cuenca hidrográfica y el transporte de sedimentos en los ríos, aportan en el cambio de la topografía y características principales de la cuenca, lo que podría concluir en un gran impacto ambiental en las zonas afectadas.

La erosión en una cuenca está directamente ligado con la naturaleza, entendiéndose como la afectación del suelo por lluvias que pueden ocasionar desplazamiento de partículas de suelo, en este caso sedimentos. Es necesario tener en cuenta que las partículas producidas por la erosión no serán acarreadas en su totalidad, es decir para un análisis más profundo, así como unos resultados más apegados a la realidad se debe considerar que no todo el material erosionado es transportado.

Finalmente es de considerarse que se suma a las dificultades ya mencionadas la falta de datos estadísticos que ayudarían a la predicción de volúmenes de sedimentos en una determinada zona.

Mediante este análisis se consigue conocer las características naturales del Río Santa Clara, y deja como posibilidad que toda la información y los resultados obtenidos sean utilizados de manera directa o indirecta para el adecuado diseño de futuras obras civiles e hidrotécnicas, que servirán para el óptimo aprovechamiento de los recursos hídricos del río así como para el desarrollo sostenible de la población afectada por el mismo.

1.6. METODOLOGÍA

En este trabajo se cuantificará la producción de sedimentos que es transportada hacia el cierre de la cuenca del río Santa Clara a partir del estudio del análisis hidrológico y sedimentológico de sus características actuales.

Para esto se va a tomar en cuenta la siguiente metodología:

- Determinación del Área de Estudio

Para determinar la cuenca del Río Santa Clara se delimitará de la siguiente manera:

- Recopilación de Información. Para la recopilación de información se considerará la topografía del terreno, en este caso se usarán modelos digitales de terreno. Además se visitará la cuenca del Río Santa Clara y se tomarán muestras para ser analizadas en el laboratorio. Por otro lado también se hace un estudio de la información geomorfológica de la cuenca.

- Elaboración de la Geodatabase

Se realizará en el Software ArcGis 10.3, tomando en cuenta las especificaciones del catálogo de objetos y la estandarización de la geoinformación y productos cartográficos definidas en el modelo digital del terreno.

- Elaboración de modelos en HEC-RAS

HEC-RAS (Hydrological Engineering Center - River Analysis System) es un programa de modelización hidráulica unidimensional con el que se modelará el transporte de sedimentos

- Determinación de secciones de control.

Se seleccionarán dos puntos de control a lo largo del Río Santa Clara, en los que se realizarán los análisis hidrológicos y sedimentológicos.

- Ensayos en el Laboratorio

La toma de muestras se realizará en función de la morfología fluvial y en cada muestra será analizada en el laboratorio del INAMHI para determinar las características de los sedimentos.

- Estudio Hidrológico y Sedimentológico.

Se determinará las características hidrológicas así como del transporte de sedimentos mediante el método de Gavrilovic para la estimación de la producción de sedimentos por erosión superficial en la cuenca del Río Santa Clara.

- Interpretación y síntesis

Una vez obtenida los resultados es necesaria la descripción de los parámetros principales de cada uno de los análisis realizados.

CAPÍTULO 2

DESCRIPCIÓN GENERAL DE LA CUENCA

2.1. UBICACIÓN

2.1.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La cuenca del Río Santa Clara se ubica en la provincia de Pichincha, en el centro norte del Ecuador y se encuentra comprendida en las siguientes coordenadas UTM:

Tabla 2

Coordenadas UTM de la Cuenca del Río Santa Clara

COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE
PUNTO NORTE	782858,3485	9966608,0617
PUNTO SUR	782808,5489	9947493,1152
PUNTO OESTE	780524,3783	9948256,116
PUNTO ESTE	788543,574	9957021,8573

En la **Tabla 2** se muestran las coordenadas geográficas de los puntos Norte, sur, este y oeste de la Figura que limita la cuenca del Río Santa Clara.

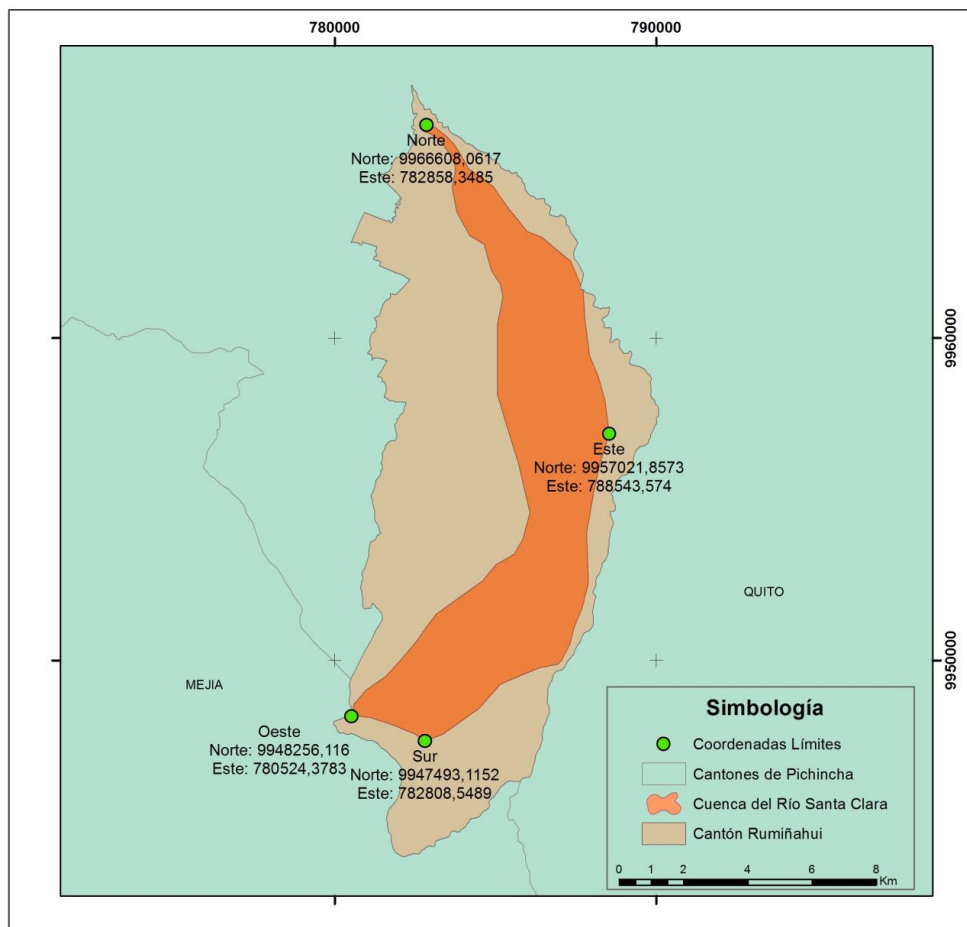


Figura 3. Ubicación Geográfica del cantón Rumiñahui

2.1.2. UBICACIÓN HIDROGRÁFICA

El Río Santa Clara recorre una longitud de 26.31 km, es una subcuenca del Río San Pedro, que a su vez es subcuenca del Río Guayllabamba, el mismo que es afluente del Río Esmeraldas que pertenece a la vertiente del Pacífico.

El río Santa Clara nace de la vertiente oriental del extinto volcán Pasochoa y es el resultado de la unión de las quebradas Santa Rosa y Pinlocoto, que a su vez está abastecida por los caudales de las quebradas El Rayo, Pulunteo y El Cabre. En su recorrido tiene como afluentes la quebrada La Esperanza y el río Sambache.

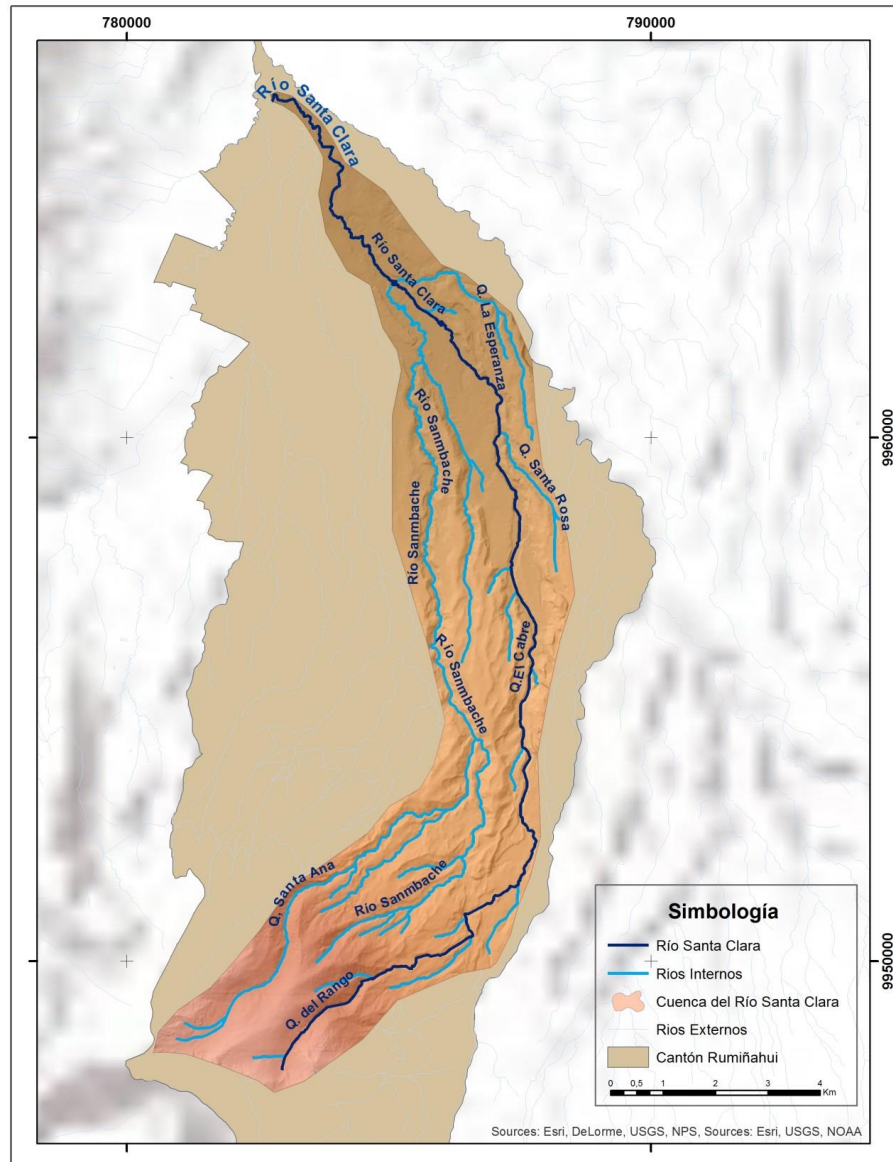


Figura 4. Afluentes del Río Santa Clara.

El Río Santa Clara recorre la zona centro oriental del cantón Rumiñahui, atravesando zonas comerciales y residenciales muy importantes tales como el River Mall, la Espe, el sector de El Choclo y desemboca en el río San Pedro.

2.2. DELIMITACIÓN HIDROGRÁFICA DE LA CUENCA

Se denomina cuenca hidrográfica al área territorial de drenaje natural donde todas las aguas pluviales confluyen hacia un colector común de descarga. Los límites de una cuenca están determinados por la línea de «divortium aquarum» o divisoria de aguas. Es importante señalar que no siempre los límites geográficos (superficiales) suelen coincidir con los límites del acuífero (subterráneo), pudiendo existir transferencias de masas líquidas entre una cuenca y otra adyacente o cercana. La línea de divortium aquarum se inicia y termina en la cota más baja o de salida de la microcuenca. (CATIE, 2006)

La cuenca del Río Santa Clara fue delimitada utilizando el Sistema de Información Geográfica (SIG), ya que este software contiene aplicaciones que brindan un análisis completo y con resultados óptimos para este tipo de análisis.

En estudio hidrológico fue realizado con un modelo digital de elevación del área de la cuenca, facilitado por el Gobierno del Cantón Rumiñahui en escala 1:5000, el mismo mediante el análisis realizado con el software ArcGIS 10.3 y a su herramienta Hydrology, da como resultado la cuenca que se muestra a continuación:

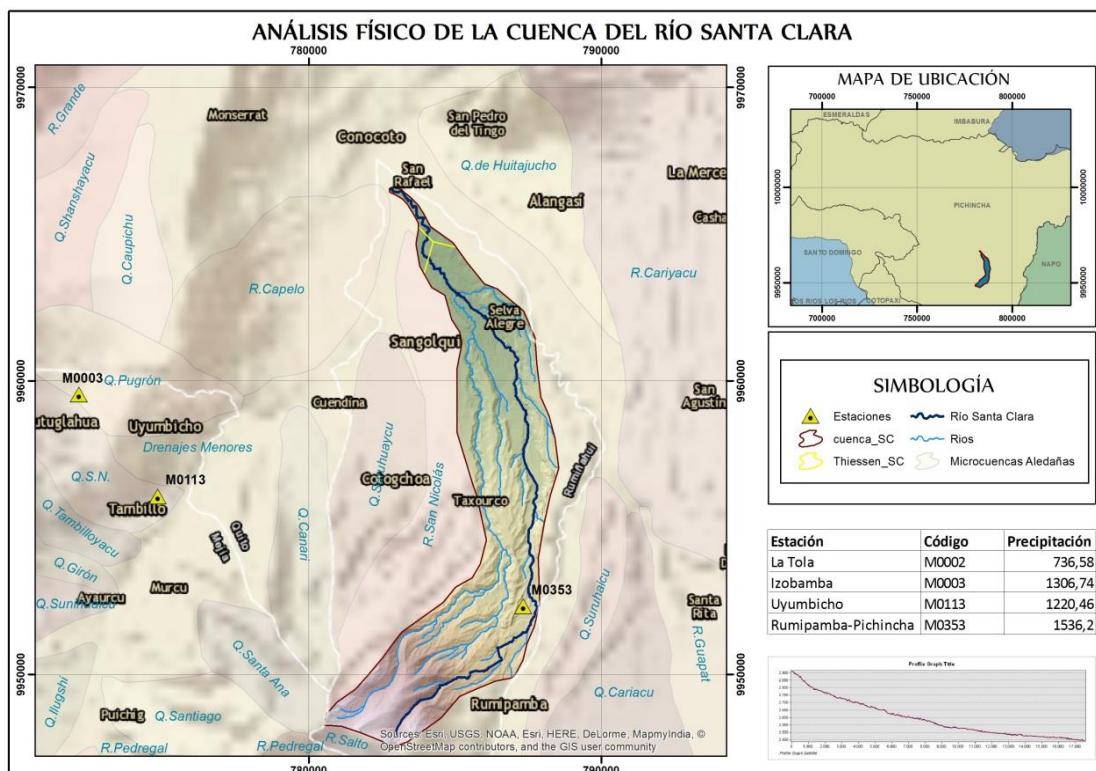


Figura 5. Delimitación de la Cuenca del Río Santa Clara

2.3. GEOMORFOLOGÍA DE LA CUENCA UTILIZANDO ARCGIS10.3

2.3.1 ÁREA DE LA CUENCA

El área de la cuenca está definida por el espacio delimitado por la curva del perímetro (P). Esta línea se traza normalmente mediante fotointerpretación de fotografías aéreas en las que se aprecia el relieve (y por lo tanto las divisorias de aguas) o sobre un mapa topográfico en función de las curvas de nivel representadas. Probablemente sea el factor más importante en la relación escorrentía-características morfológicas. (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011)

El área de la cuenca del Río Santa Clara se ubica en su totalidad dentro del cantón Rumiñahui. El análisis morfológico de la cuenca se lo realizó mediante las herramientas del software ArcGIS10.3, utilizando el modelo digital del terreno proporcionado por el Gobierno de Rumiñahui en escala 1:5000 (Ver **Figura 5**), obteniendo un área de la cuenca del Río Santa Clara igual a 50,749 km².

$$A_{\text{SANTA CLARA}} = 50.749 \text{ km}^2$$

2.3.2 LONGITUD DEL CAUCE PRINCIPAL (L), PERÍMETRO (P) Y DATOS BÁSICOS DE LA CUENCA

La longitud del cauce principal es la distancia que recorre el río desde su nacimiento, es decir desde el punto con la cota más alta del río, hasta el punto donde desemboca (el punto con la cota más baja).

Este parámetro es sumamente importante en el análisis hidrológico de la cuenca, ya que al igual que el área de la cuenca, influye directamente en el cálculo del resto de parámetros que describen el comportamiento hidrológico de la cuenca.

La longitud del cauce principal de la cuenca del Río Santa Clara se obtuvo en ArcGIS10.3, tomando la distancia entre el punto de nacimiento del cauce principal del río, en las vertientes del volcán Pasochoa, hasta el punto de desembocadura de sus aguas hacia el río San Pedro. La medida resultante fue la siguiente:

$$L_{\text{SANTA CLARA}} = 26,313 \text{ km}$$

El perímetro de la cuenca es la longitud de la línea imaginaria denominada divisoria de aguas o «divortium aquarum», la misma que es el límite entre dos cuencas hidrográficas y recorre los puntos más altos de la cuenca. Las precipitaciones que se presentan a cada lado de la divisoria de

aguas son recogidas por los afluentes o el río principal que da el nombre a su cuenca.

El perímetro de una cuenca hidrográfica define la forma de la misma. Como se puede observar en la **Figura 6**; para una misma superficie, los perímetros de mayor valor se corresponden con cuencas alargadas mientras que los de menor lo hacen con cuencas redondeadas. (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011)

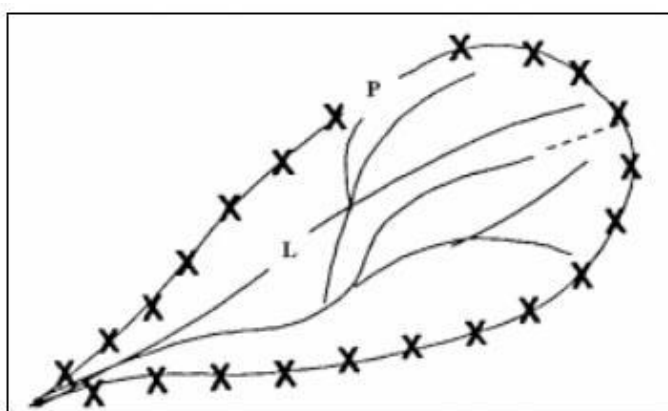


Figura 6. Longitud y Perímetro de la Cuenca.

Fuente: (Morfología de las cuencas Hidrográficas, Universidad Politécnica de Valencia)

El perímetro obtenido en ArcGIS para la cuenca en estudio es:

$$P_{\text{SANTA CLARA}} = 48,510 \text{ km}$$

Existen además parámetros fundamentales para la caracterización morfológica de una cuenca hidrográfica, tales como:

- **cota máxima y cota mínima de la cuenca**, fundamentales para el cálculo de la pendiente,
- **altura entre curvas de nivel**, que en el modelo digital del terreno mediante ArcGIS10.3, debido a la forma alargada y las dimensiones de la cuenca se consideró de 50 metros,
- **la longitud de las curvas de nivel**, que servirán para determinar la pendiente media de la cuenca.

En la **Tabla 3** se presentan los valores de estos parámetros.

Tabla 3

Datos de la Cuenca del río Santa Clara

Información de la Cuenca del río Santa Clara		
Datos	Símbolo	Valor (km)
Área	A	50,749
Perímetro	P	48,510
Altura máxima	H máx.	4,110
Altura mínima	H mín.	2,440
Desnivel entre curvas	D	0,05
Longitud total de las curvas de nivel	$\sum L$	289,799
Longitud del cauce principal	L	26,313

2.3.3 FACTOR DE FORMA (K)

El factor de forma o relación de forma de Horton se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L); de la siguiente manera:

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

Dónde:

A: superficie de la cuenca en km².

L: longitud de la cuenca en km.

De esta manera se calcula el factor de forma para la cuenca del Río Santa Clara:

$$Kf = \frac{50,749}{26,313^2} = 0,0733$$

Los valores interpretativos de la relación de forma de Horton, pueden verse en la Tabla 4.

Tabla 4

Valores interpretativos del factor forma.

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca
<0.22	Muy alargada
0.22-0.300	Alargada
0.300-0.37	Ligeramente alargada
0.37-0.475	Ni alargada ni ensanchada
0.45-0.60	Ligeramente ensanchada
0.60-0.80	Ensanchada
0.80-1.20	Muy ensanchada
>1.20	Rodeando el desagüe

Fuente: (HORTON, 1932)

En líneas generales, las cuencas más ensanchadas poseen mayor susceptibilidad a generar crecidas, ya que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto que en cuencas alargadas, en otras palabras las cuencas ensanchadas tendrían menor tiempo de concentración y por ende mayor rapidez para la concentración de los flujos de aguas superficiales, generando mayor violencia en sus crecidas. Caso contrario ocurre con las cuencas alargadas donde el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, contribuyendo a que los picos de crecidas sean menos súbitos en caso de lluvias concentradas o tormentas. (Delgadillo Santander & Moreno Barrios, 2013)

El factor de forma es de 0,0733 concluyendo que la cuenca del río Santa Clara es una cuenca muy alargada y de baja amenaza a inundaciones.

2.3.4 PENDIENTE MEDIA DE LA CUENCA

La pendiente de la cuenca es un parámetro que indica las posibilidades de generar crecidas en el cauce, ya que según (Delgadillo Santander & Moreno Barrios, 2013), a mayor pendiente es mayor la velocidad del caudal y la capacidad de arrastre de sedimentos. Caso contrario ocurre cuando la la pendiente media de la cuenca presenta valores bajos, los cuales contribuyen a que los picos de crecidas sean menos violentos.

La pendiente media de la cuenca se calcula por el método de Alvord (Guevara & Cartaya, 1991), el cual se muestra a continuación:

$$S_c = \frac{D * \sum L}{A}$$

Dónde:

Sc= Pendiente media de la cuenca

$\sum L$ = Sumatoria de todas las Longitudes de la curvas de nivel en km en el interior de la cuenca

A=Área de la cuenca

D: Desnivel entre curvas en Km. En este caso el modelo digital del terreno fue dividido en cotas cada 50 m.

Para la cuenca del Río Santa Clara se calcula la pendiente media de la siguiente manera:

$$S_c = \frac{0,05 \text{ km} * 289,799 \text{ km}}{50,749 \text{ km}^2} = 0,2855$$

Es decir la pendiente media del Río Santa Clara es de 28.55%, que según los valores interpretativos de la pendiente media de una cuenca que se pueden ver en la **Tabla 5**, corresponde a una pendiente escarpada o empinada.

Tabla 5

Característica cualitativa del relieve de una cuenca de acuerdo a su pendiente.

Pendiente media (%)	Terrenos
0-2	Llano
2-5	Suave
5-10	Accidentado Medio
10-15	Accidentado
15-25	Fuertemente Accidentado
25-50	Escarpado
>50	Muy Escarpado

Fuente: (Pérez, 1979)

2.3.5 COEFICIENTE DE GRAVELIUS

El coeficiente de compacidad de Gravelius representa la relación entre el perímetro de la hoya y el de una circunferencia de área igual a la cuenca (Delgadillo Santander & Moreno Barrios, 2013).

Este índice es estimado a través de la siguiente fórmula:

$$Kc = 0.28 * \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Dónde:

Kc= Coeficiente de Gravelious

P= Perímetro de la cuenca

A= Área de la cuenca

De esta manera se obtiene el índice de compacidad o coeficiente de Gravelius para la cuenca del Río Santa Clara:

$$Kc = 0.28 * \frac{48,510}{\sqrt{50,749}} = 1,9067$$

El menor valor de Kc es uno, y corresponde a una cuenca circular. A medida que Kc aumenta, mayor es la irregularidad de la cuenca y su desviación de la forma circular (Guevara & Cartaya, 1991) tal como se puede apreciar en la Tabla 6.

Tabla 6

Forma de la cuenca según el Índice de compacidad de Gravelius.

CLASE DE FORMA	INDICE DE COMPACIDAD (K)	FORMA DE LA CUENCA
Clase I	1.0 a 1.25	Casi redonda a oval-redonda
Clase II	1.26 a 1.50	Oval-redonda a oval-oblonga
Clase III	mayor a 1.51	Oval-oblonga a rectangular-oblonga

Fuente: (Guevara & Cartaya, 1991)

El coeficiente de Gravelius de la cuenca del Río Santa Clara es de 1.9067, es decir Clase III, oval-oblonga a rectangular-oblonga (alargada).

2.3.6 PENDIENTE DEL CAUCE PRINCIPAL

Es la diferencia total de elevación del cauce principal (cota máxima - cota mínima), dividida por su longitud total (Lc):

$$PENDIENTE = \frac{COTA MAXIMA - COTA MINIMA}{LONGITUD DEL RIO}$$

Los valores correspondientes para el Río Santa Clara son los siguientes:

COTA MAXIMA = 3797.98 m

COTA MINIMA = 2440 m

LONGITUD DEL RIO = 26313 m

Con estos se obtiene el valor de la pendiente:

PENDIENTE = 0.05161

La pendiente media del Río Santa clara es del 5,16%. Mediante el uso del software ArcGIS10.3 se obtuvo el perfil longitudinal del cauce del Río santa Clara, representado en la Figura.



Figura 7. Perfil longitudinal del Río Santa Clara.

CAPÍTULO 3

ESTUDIO HIDROLÓGICO

3.1. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

3.1.1 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA, HIDROGRÁFICA Y TOPOGRÁFICA

Para realizar el estudio Hidrológico de la cuenca del Río Santa Clara se utilizó un modelo digital del terreno del área implicada en escala 1:5000.

La información topográfica utilizada para delimitar la cuenca fue proporcionada por el Gobierno del cantón Rumiñahui y consistió en la siguiente:

- Modelo digital del Terreno.
- Ríos principales y secundarios de la zona de estudio.
- Topografía de la zona del proyecto.

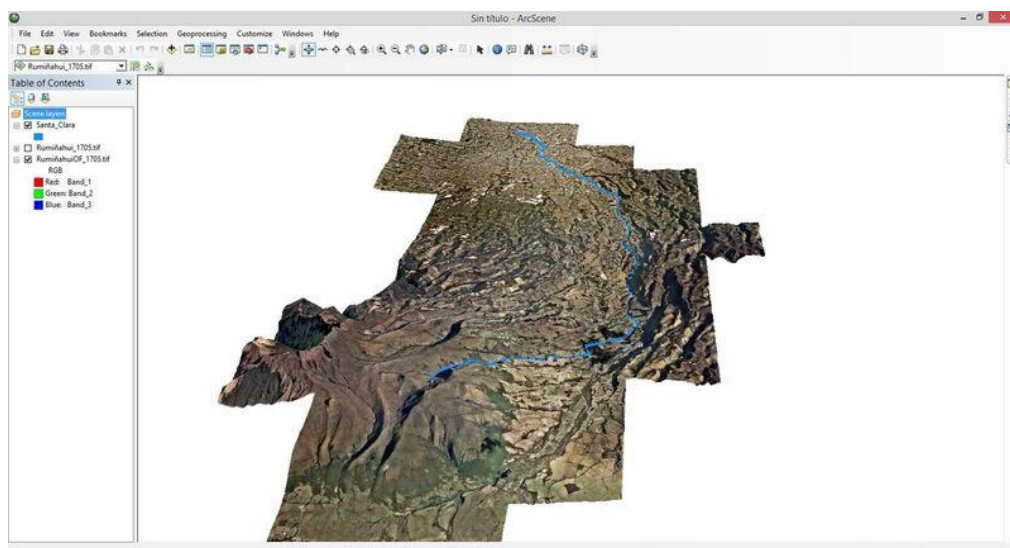


Figura 8. Modelo Digital del Terreno

Fuente: (GOBIERNO MUNICIPAL DE RUMIÑAHUI, 2017)

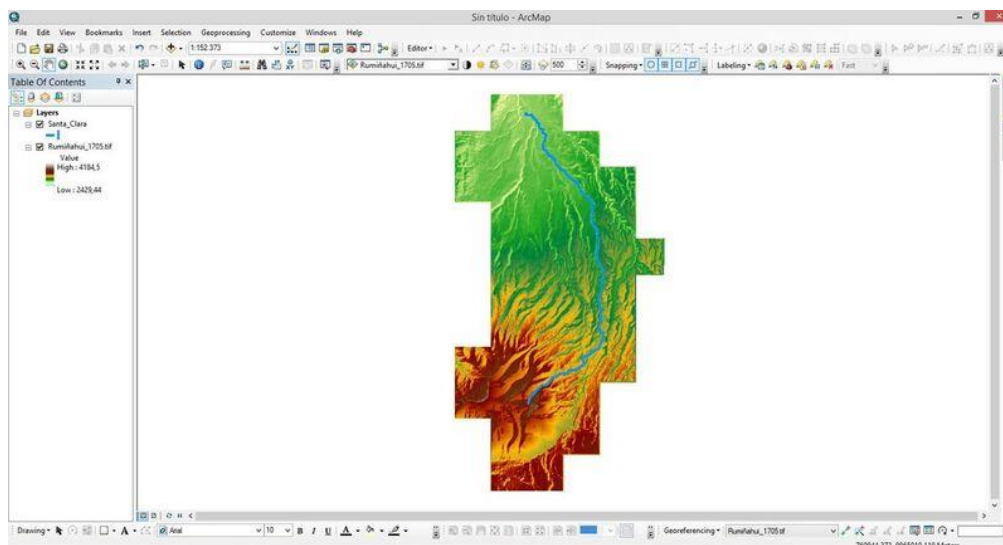


Figura 9. Modelo Digital del Terreno

Fuente: (GOBIERNO MUNICIPAL DE RUMIÑAHUI, 2017)

3.1.2 INFORMACIÓN METEOROLÓGICA

Con el fin de obtener datos meteorológicos de las estaciones ubicadas en el área de influencia de la cuenca hidrográfica del río Santa Clara, se visitó las instalaciones del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), en dónde se recopiló información de las cuatro estaciones meteorológicas más cercanas al área de análisis.

La información recopilada es de la precipitación mensual comprendida entre los años 2005 y 2015. Para cada una de las estaciones de la red, el INAMHI publica en el anuario meteorológico los siguientes datos generales:

- Nombre de la Estación.
- Código de la Estación.
- Periodo
- Código de Tipo-estación
- Ubicación Geográfica: (Latitud, Longitud y Altura en m.s.n.m).

- Precipitación mensual en mm.

Para el presente estudio se recopiló la información de las estaciones mostradas en la Tabla 7:

Tabla 7

Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca del Río Santa Clara.

Estación	Código	Latitud	Longitud	Elevación (msnm)
La Tola	M0002	0G 13' 54" S	78G 22' 13" W	2480
Izobamba	M0003	0G 21' 57" S	78G 33' 18" W	3058
Uyumbicho	M0113	0G 23' 50" S	78G 31' 51" W	2740
Rumipamba	M0353	0G 25' 51.8" S	78G 25' 6.8" W	2940

Fuente: (INAMHI,2016)

3.2 PARÁMETROS HIDROLÓGICOS

3.2.1 ORDEN DE CORRIENTES

Los arroyos más pequeños permanentes son llamados "de primer orden". Dos corrientes de primer orden se unen para formar una más grande, de segundo orden, dos corrientes de segundo orden se unen para formar una tercera orden, y así sucesivamente. Pequeñas corrientes de entrada a una secuencia de orden mayor no cambian su número de orden. (Strahler, 1964)

EL orden de las corrientes de agua, hace alusión al grado de ramificación o bifurcación dentro de una cuenca.

- Corrientes de primer orden: Pequeños canales sin tributarios.
- Corrientes de segundo orden: Corresponde a la unión de dos corrientes de primer orden.
- Corrientes de orden $n+1$: Cuando dos corrientes de orden n se unen.

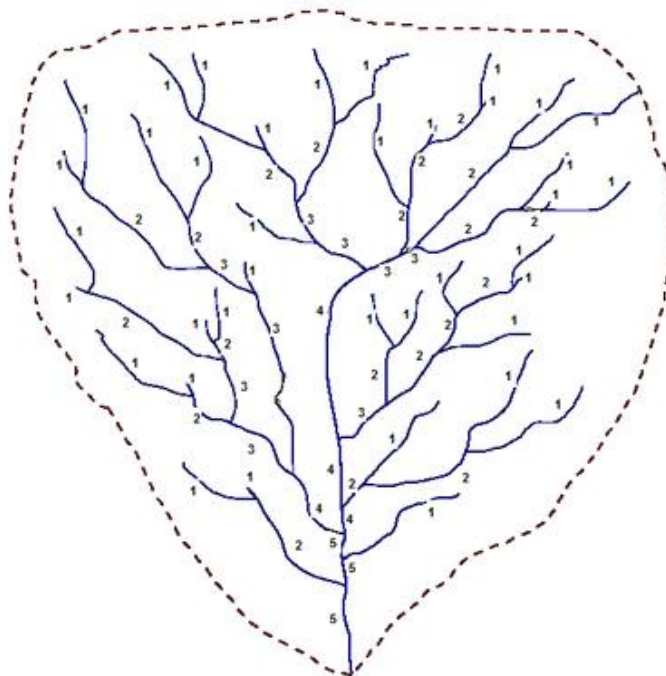


Figura 10. Orden de Corrientes en una cuenca de quinto orden.

Fuente: (Strahler, 1964)

En el sistema hidrográfico de la cuenca del Río Santa Clara se pueden observar una gran cantidad de corrientes de primer orden que nacen de las vertientes del volcán Pasochoa conformando quebradas, que al unirse con otras forman corrientes de mayor orden, al punto de formar ríos y finalmente conforman el río Santa Clara, como se puede observar en la **Figura 4**.

En la **Figura 11** se observa el orden de corrientes de la cuenca del Río Santa Clara.

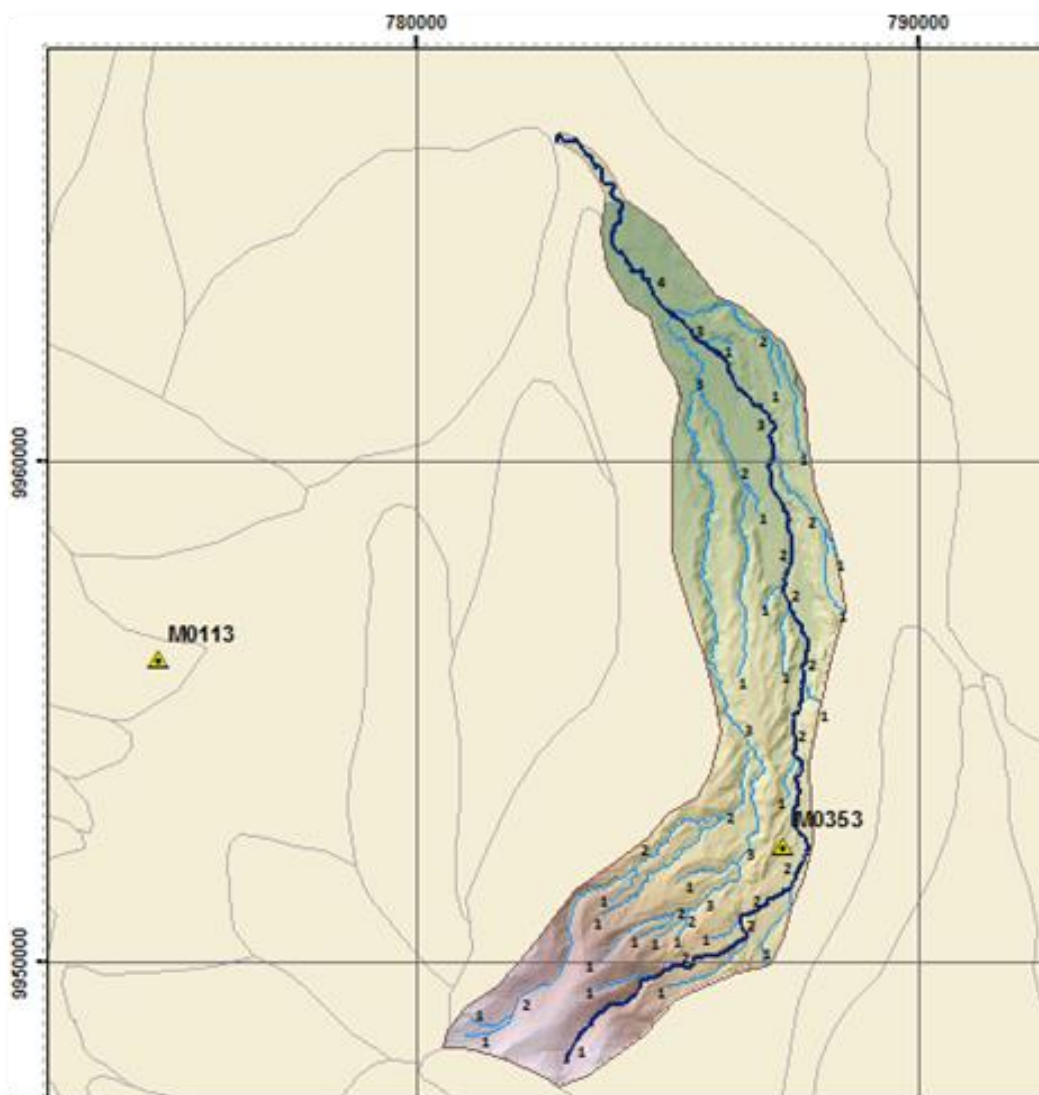


Figura 11. Orden de Corrientes de la cuenca del Río Santa Clara

De esta manera se tiene los siguientes resultados:

- Corrientes Orden 1: 25
- Corrientes Orden 2: 16
- Corrientes Orden 3: 6
- Corrientes Orden 4: 1

La Río Santa Clara es una corriente de cuarto orden.

El número de corrientes se determina con la suma de todas las corrientes que se presentan en la cuenca. Para la cuenca del Río Santa Clara el número de corrientes se determina de la siguiente manera:

$$N_c = N_{c1} + N_{c2} + N_{c3} + N_{c4}$$

Dónde:

N_c = Número de corrientes

N_{c1} = Número de corrientes de primer orden

N_{c2} = Número de corrientes de segundo orden

N_{c3} = Número de corrientes de tercer orden

N_{c4} = Número de corrientes de cuarto orden

El resultado del número de corrientes es el siguiente:

$$N_c = 25 + 16 + 6 + 1$$

$$N_c = 48$$

3.2.2 DENSIDAD DE CORRIENTE

La densidad de corrientes es un parámetro que permite identificar el nivel de respuesta de la cuenca ante una entrada de lluvia. Mientras mayor sea la densidad de corriente significa que la cuenca es más ramificada lo que provoca una respuesta más rápida a la entrada de lluvia y una menor recarga al acuífero.

$$D_c = \frac{N_c}{A}$$

Dónde:

N_c = Número de corrientes en la cuenca hidrográfica.

A = Área total de la cuenca en km^2 .

En la cuenca del Río Santa Clara, la densidad de corrientes se la determina de la siguiente manera:

$$Dc = \frac{48 \text{ corrientes}}{50,749 \text{ km}^2}$$

$$Dc = 0,9458 \text{ corrientes/km}^2$$

3.2.3 DENSIDAD DE DRENAJE

La densidad de drenaje en una cuenca hidrográfica es un parámetro que se define como la longitud total de los cauces dentro de una cuenca, dividida por el área total de drenaje. Este índice permite tener un mejor conocimiento de la complejidad y desarrollo del sistema de drenaje de la cuenca. En general, una mayor densidad de escurrimientos indica mayor estructuración de la red fluvial, o bien que existe mayor potencial de erosión. La densidad de drenaje varía inversamente con la extensión de la cuenca (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011). Este número expresa la capacidad para desalojar el volumen de agua. Se expresa con la siguiente ecuación:

$$Dd = \frac{Lt}{A}$$

Dónde:

Dd = densidad de drenaje por km.

A = área total de la cuenca en km²

L = Longitud total de las corrientes perennes e intermitentes en la cuenca en km.

La cuenca del Río Santa Clara presenta la siguiente densidad de drenaje:

$$Dd = \frac{115,6588 \text{ km}}{50,749 \text{ km}^2}$$

$$Dd = 2,2790 \frac{\text{km}}{\text{km}^2}$$

Los valores que permiten interpretar la densidad de drenaje se presentan en la **Tabla 8**.

Tabla 8

Valores interpretativos de la densidad de drenaje

Densidad de Drenaje (Km/Km2)	Categoría
< 1	Baja
1 a 2	Moderada
2 a 3	Alta
> 3	Muy Alta

Fuente: (Delgadillo Santander & Moreno Barrios, 2013)

De esta manera se determina que la densidad de drenaje de la cuenca del Río Santa Clara es Alta, conforme a lo presentado en la **Tabla 8**. Generalmente una densidad de drenaje alta se asocia con "materiales impermeables a nivel subsuperficial, vegetación dispersa y relieves montañosos" (Strahler, 1964). Además de ello indica que la cuenca posee suficiente drenaje para cuando se presentan las tormentas. Una cuenca bien drenada generaría poca oportunidad de darle tiempo a la escorrentía superficial de infiltrarse y percolar a nivel subterráneo, de allí que los acuíferos de estas regiones son de bajos rendimientos o en su defecto el volumen de recarga es muy pobre (Ruiz, 2001).

3.2.4 CURVA HIPSOMÉTRICA

La curva hipsométrica representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. Se construye llevando al eje de las abscisas los valores de la superficie drenada proyectada en porcentaje, obtenida hasta un determinado nivel, el cual se lleva al eje de las ordenadas, generalmente en metros (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011).

Para obtener los datos de área entre curvas de nivel necesarios para obtener la curva hipsométrica de la cuenca del Río Santa Clara, se utilizó el software ArcGIS, 10.3 y se utilizó la herramienta Reclassify, para realizar la clasificación por intervalos de curvas de nivel como lo muestra la **Figura 12**, posteriormente se aplica la herramienta Zonal Statistics as Table, como se indica en la **Figura 13**, para así obtener las áreas entre cada intervalo.

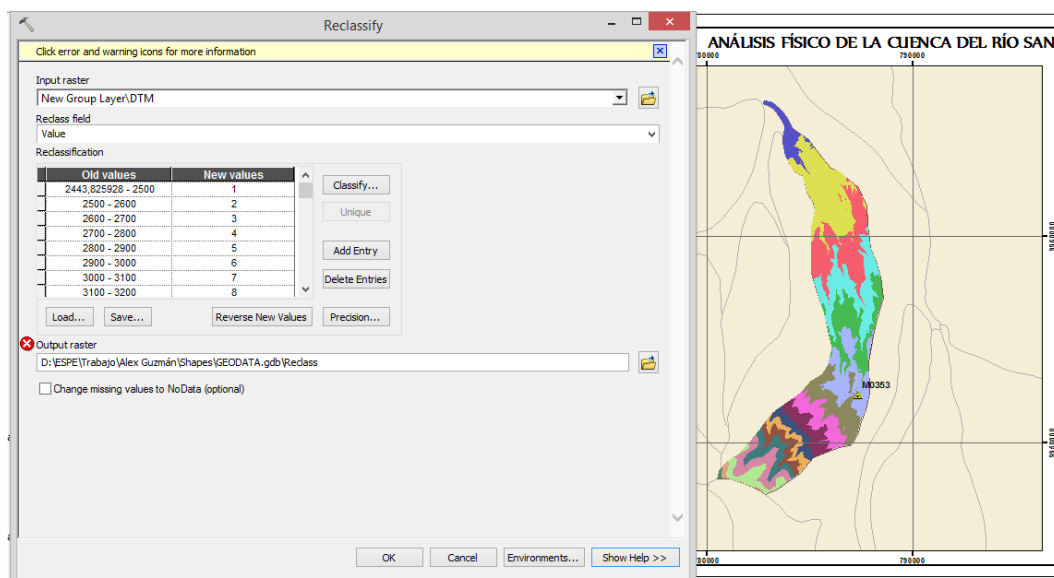


Figura 12. Clasificación por intervalos de curvas de nivel.

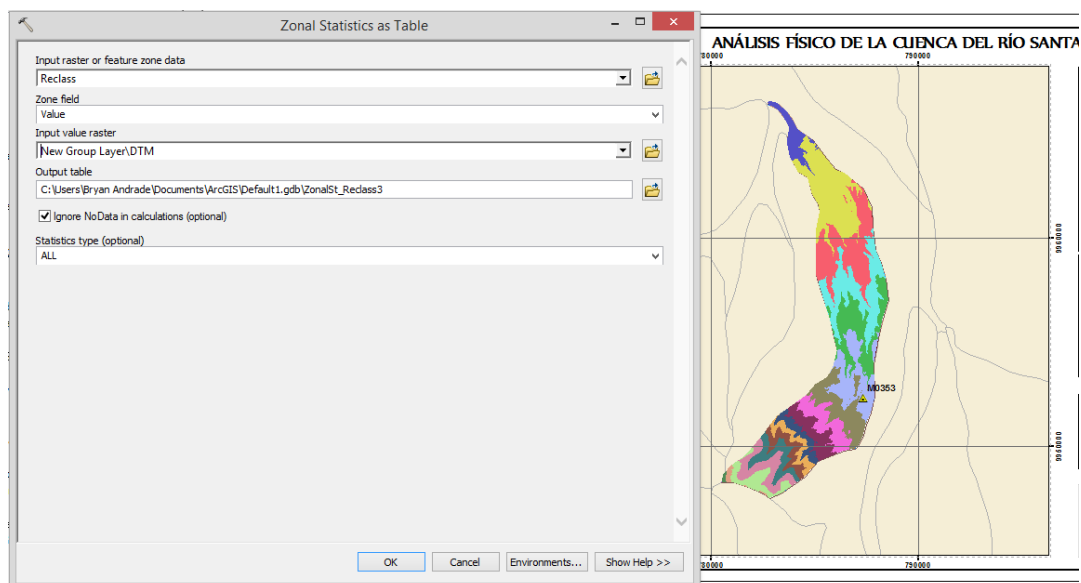


Figura 13. Área entre curvas de nivel.

La tabulación de los datos obtenidos se muestra en la siguiente Tabla 9:

Tabla 9

Datos para el análisis de la curva hipsométrica

Intervalo	Cota Media	Área Km	Área / AT %	% Área Acumulada
>4100	4142,51	0,001845	0,003636	0,003636
4100-4000	4050	0,074727	0,147251	0,150886
4000-3900	3950	0,230103	0,453421	0,604308
3900-3800	3850	1,684656	3,319639	3,923947
3800-3700	3750	2,404134	4,737381	8,661328
3700-3600	3650	1,900854	3,745661	12,40699
3600-3500	3550	1,478439	2,913286	15,32027
3500-3400	3450	1,279494	2,521262	17,84154
3400-3300	3350	1,296603	2,554975	20,39651



3300-3200	3250	2,198592	4,332358	24,72887
3200-3100	3150	2,690631	5,301928	30,0308
3100-3000	3050	3,96441	7,811928	37,84272
3000-2900	2950	4,525164	8,916902	46,75963
2900-2800	2850	4,843476	9,54414	56,30377
2800-2700	2750	5,888601	11,60357	67,90734
2700-2600	2650	6,765759	13,33203	81,23937
2600-2500	2550	7,793757	15,35771	96,59708
2500>	2471,67	1,72692	3,402921	100

La curva hipsométrica de la cuenca del Río Santa Clara conforme los datos presentados en la **Tabla 9**, es la siguiente:

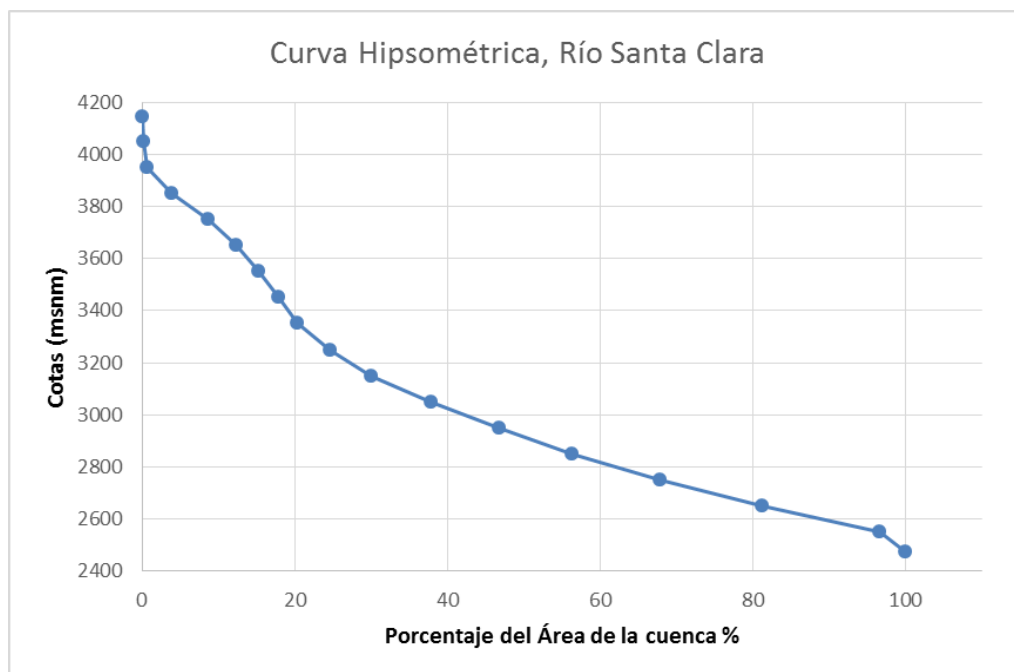


Figura 14. Curva Hipsométrica de la Cuenca del Río Santa Clara

Las curvas hipsométricas también han sido asociadas con las edades de los ríos de las respectivas cuencas **Figura 15**.

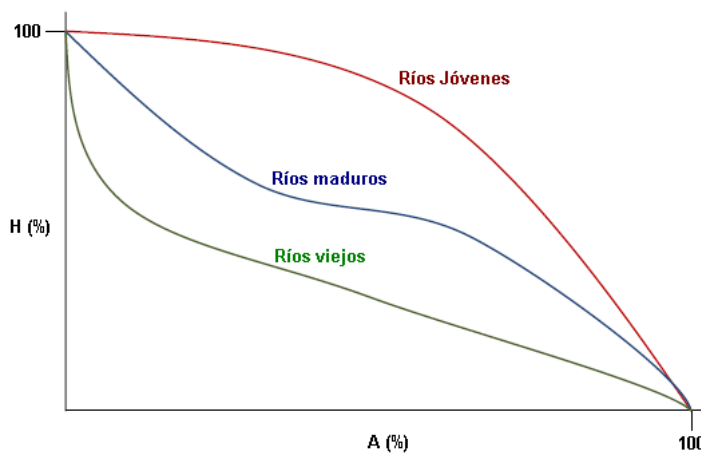


Figura 15. Cambio de forma de la curva hipsométrica con la edad del río

Fuente: (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011)

De acuerdo al resultado obtenido de la curva hipsométrica en la **Figura 14**, se evalúa con los tipos de curvas hipsométricas de la **Figura 15**, y se concluye que es una cuenca sedimentaria (fase de vejez).

3.3 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA MEDIA DE PRECIPITACIÓN

El análisis de la cantidad de precipitación en una determinada zona es un parámetro de gran importancia dentro del estudio de una cuenca, ya que como se citó en capítulos anteriores puede afectar de sobremanera a sus características. Se lo puede evaluar en varios intervalos de tiempo y esto de gran relevancia ya que los datos proporcionados pueden llevarnos a unos resultados que dieran unos de otros.

Para la determinación de la altura media de precipitación de la cuenca del Río Santa Clara, se utilizó 4 estaciones meteorológicas del INAMHI y se tomaron en cuenta para el estudio mediciones de 11 años (desde el 2015 hasta el 2016). Como se muestra en las siguientes tablas.

Tabla 10

Datos de precipitaciones mensuales de la estación LA TOLA.

Código	año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	SUMA
M0002	2005	52.8	97.7	75.9	58.7	44.0	29.1	9.1	18.8	20.2	87.0	84.0	79.0	656.3
M0002	2006	42.4	74.8	211.8	168.0	30.9	45.6	4.6	3.0	11.0	101.3	153.0	166.4	1012.8
M0002	2007	69.2	42.5	155.6	141.3	50.7	19.7	3.6	13.1	22.3	143.4	185.1	28.6	875.1
M0002	2008	86.4	148.2	198.6	135.9	131.7	60.2	2.4	22.1	25.4	186.7	73.8	108.4	1179.8
M0002	2009	101.4	48.5	152.9	70.3	46.2	29.7	14.9	0.1	9.9	121.5	55.0	96.6	747.0
M0002	2010	15.9	83.0	12.1	163.4	100.4	40.7	69.6	29.5	79.1	66.4	170.4	107.6	938.1
M0002	2011	34.8	158.9	116.7	233.2	61.4	19.5	46.6	43.3	35.5	77.8	53.1	60.8	941.6
M0002	2012	76.9	59.8	95.1	114.4	16.3	8.2	1.5	2.0	53.3	70.2	235.9	59.8	793.4
M0002	2013	17.8	159.8	73.1	103.1	95.2	0.3	4.5	36.3	24.4	77.9	51.6	49.8	693.8
M0002	2014	66.5	65.7	131.4	36.3	116.0	10.7	0.8	0.4	46.9	130.5	44.5	49.3	699.0
M0002	2015	54.2	78.5	123.1	57.3	33.0	2.0	16.8	2.0	16.8	123.7	45.2	2.5	555.1
													promedio	826.5
													desviación	166.2

Tabla 11

Datos de precipitaciones mensuales de la estación IZOBAMBA.

Código	año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	SUMA
M0003	2005	33.3	201.4	210.2	115.7	100.1	66.8	50.6	53.9	84.1	83.7	105.8	159.4	1265.0
M0003	2006	93.3	188.8	167.5	262.0	76.3	92.2	13.1	23.6	51.6	76.5	245.9	174.6	1465.4
M0003	2007	171.3	55.1	229.9	264.3	243.6	59.7	62.6	34.8	16.4	201.9	326.2	117.8	1783.6
M0003	2008	246.6	275.5	263.5	257.0	216.4	111.5	28.5	96.7	103.1	199.5	108.0	126.0	2032.3
M0003	2009	295.4	186.6	262.4	189.9	102.8	48.2	7.1	29.0	9.7	86.4	88.8	209.9	1516.2
M0003	2010	45.6	103.7	114.2	289.2	149.2	100.4	196.2	52.5	79.5	89.7	249.4	304.8	1774.4
M0003	2011	138.3	193.3	143.7	262.4	92.8	61.4	69.4	76.7	56.9	197.6	30.4	164.9	1487.8
M0003	2012	254.3	227.3	197.4	219.3	64.9	10.6	19.8	20.0	20.5	167.0	169.0	30.5	1400.6
M0003	2013	43.7	230.5	128.1	101.9	239.0	9.8	8.3	43.5	38.9	191.5	45.9	79.6	1160.7
M0003	2014	177.9	135.4	242.3	141.6	186.9	43.3	12.5	49.9	78.5	132.1	112.8	79.8	1393.0
M0003	2015	94.9	78.9	233.3	152.2	102.4	10.6	30.0	6.6	21.4	118.2	193.4	49.7	1091.6
													promedio	1488.2
													desviación	257.8

Tabla 12

Datos de precipitaciones mensuales de la estación UYUMBICHO.

Código	año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	SUMA
M0113	2005	45.9	238.2	201.0	141.6	74.2	55.0	42.9	41.2	45.2	69.8	105.7	239.8	1300.5
M0113	2006	132.9	175.9	135.5	222.8	90.7	91.2	10.0	22.8	75.9	88.7	242.8	146.2	1435.4
M0113	2007	139.4	45.7	195.3	206.4	154.0	44.0	66.7	32.2	16.7	142.3	279.3	137.0	1459.0
M0113	2008	280.9	210.7	212.2	271.5	256.7	84.7	42.5	91.3	97.0	132.3	148.7	152.7	1981.2
M0113	2009	309.3	195.2	326.1	138.9	104.7	75.3	9.4	34.2	9.5	89.3	82.2	228.8	1602.9
M0113	2010	54.1	138.5	106.2	308.8	133.5	109.9	108.1	26.3	76.4	69.3	203.6	260.6	1595.3
M0113	2011	278.2	220.2	129.2	257.3	70.6	63.8	66.2	47.7	66.6	206.2	25.2	150.1	1581.3
M0113	2012	270.8	197.5	178.1	219.1	50.6	30.2	19.3	17.4	35.8	137.1	134.4	55.1	1345.4
M0113	2013	101.1	244.0	120.7	95.3	268.9	6.2	9.6	60.4	28.8	151.7	71.9	68.6	1227.2
M0113	2014	136.9	152.0	309.8	98.7	218.5	28.8	8.5	41.1	56.9	146.1	81.9	84.2	1363.4
M0113	2015	147.9	55.0	249.5	139.2	105.4	19.1	23.6	14.4	23.7	94.3	198.6	53.5	1124.2
													promedio	1456.0
													desviación	212.2

Tabla 13

Datos de precipitaciones mensuales de la estación RUMIPAMBA.

Código	año	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	SUMA
M0353	2005	128.7	282.8	237.7	190.1	83.0	19.6	32.2	11.7	53.4	85.0	196.3	113.2	1433.7
M0353	2006	302.8	541.9	745.1	234.0	181.4	213.1	45.3	8.1	73.0	112.5	235.7	138.7	2831.6
M0353	2007	29.5	162.9	488.2	295.1	289.4	16.7	76.4	62.5	0.8	199.6	168.0	310.4	2099.5
M0353	2008	329.2	737.1	921.2	603.4	565.3	533.3	234.3	381.1	108.1	352.8	421.5	577.8	5765.1
M0353	2009	1034.9	662.9	678.7	312.2	243.6	37.7	9.6	30.4	5.5	93.2	30.9	207.6	3347.2
M0353	2010	33.6	59.5	25.3	238.9	193.9	129.2	68.5	23.8	76.0	81.4	336.0	392.1	1658.2
M0353	2011	194.8	410.8	518.8	658.0	292.7	92.4	59.4	109.5	78.9	70.2	111.1	87.6	2684.2
M0353	2012	250.3	319.9	203.5	375.0	57.7	62.1	17.2	48.0	5.6	145.0	134.5	70.7	1689.5
M0353	2013	141.4	182.7	4.3	235.9	141.2	67.5	45.3	55.6	14.3	102.9	109.9	128.4	1229.4
M0353	2014	316.7	326.1	219.8	135.7	132.1	15.8	44.7	68.6	4.2	135.8	144.3	111.9	1655.7
M0353	2015	110.7	187.7	458.6	93.0	11.4	25.9	29.2	62.8	7.7	31.2	17.6	14.2	1050.0
													promedio	2313.1
													desviación	1232.6

En los siguientes histogramas se muestran las precipitaciones medidas en las estaciones usadas para el estudio:

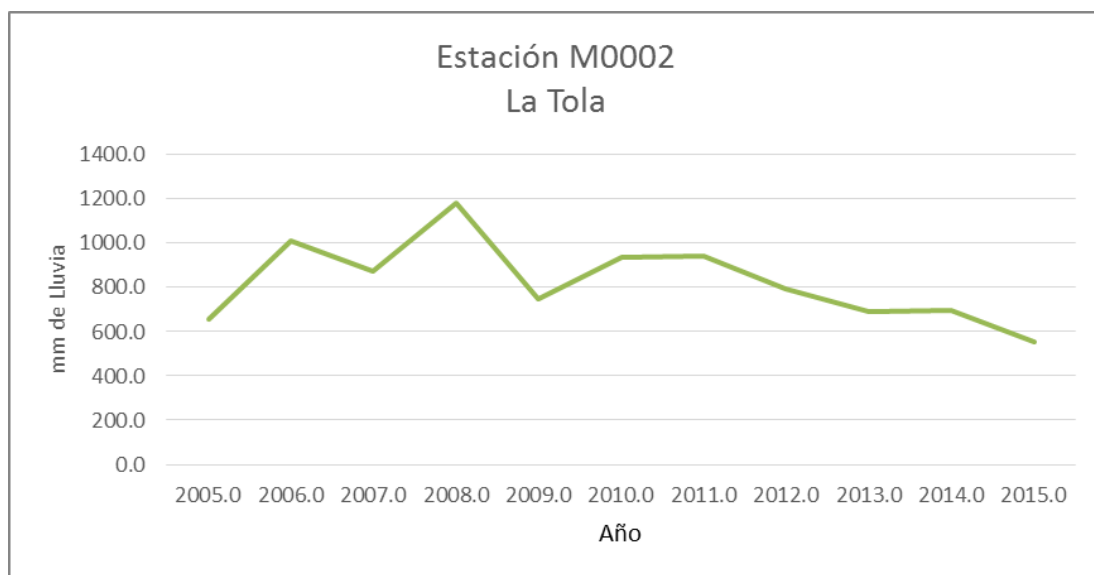


Figura 16. Histograma Estación La Tola (2005-2015)

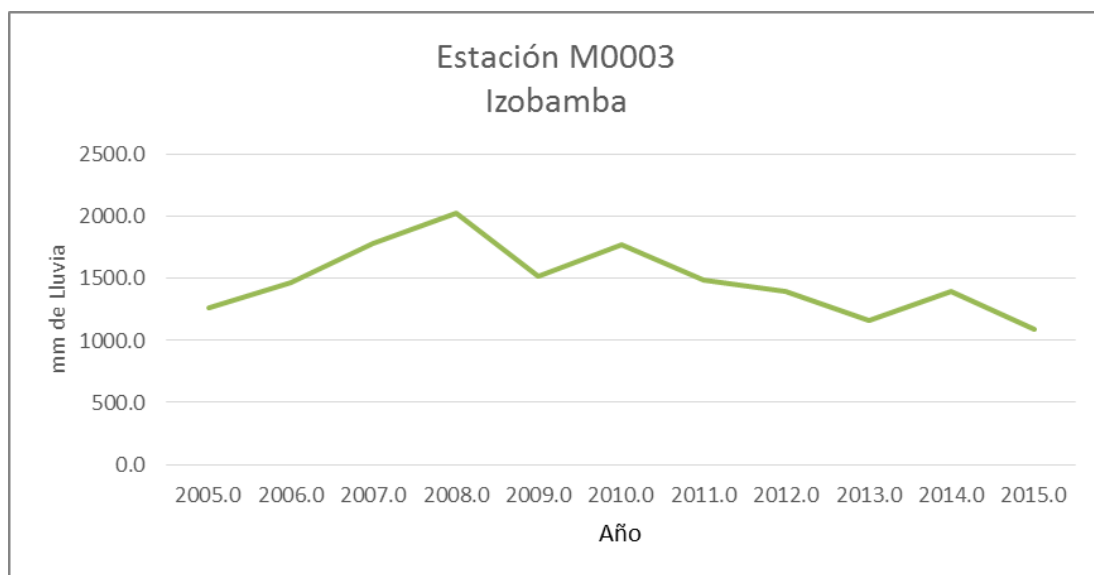


Figura 17. Histograma Estación Izobamba (2005-2015)

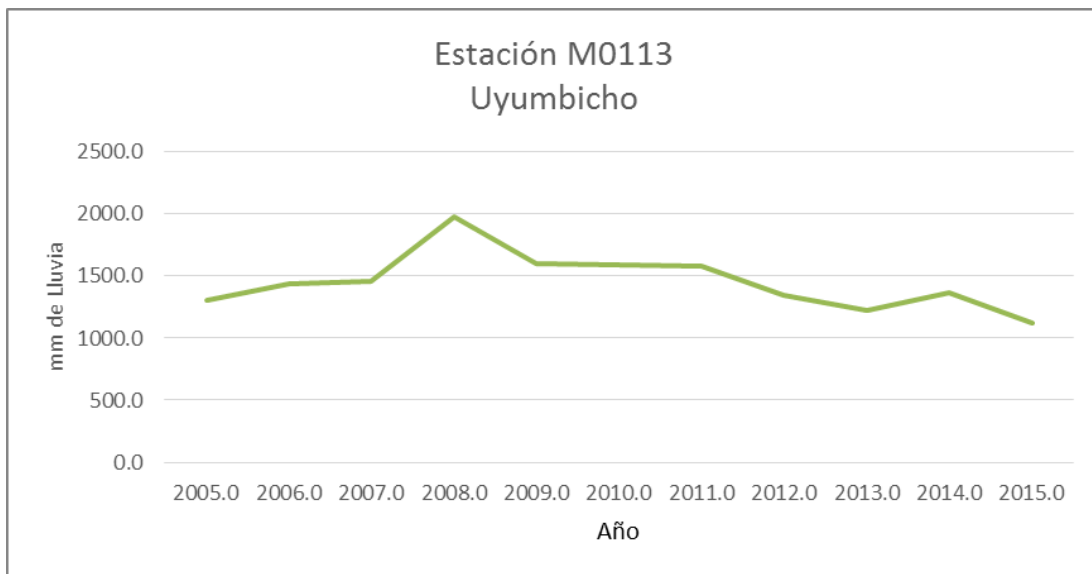


Figura 18. Histograma Estación Uyumbicho (2005-2015)

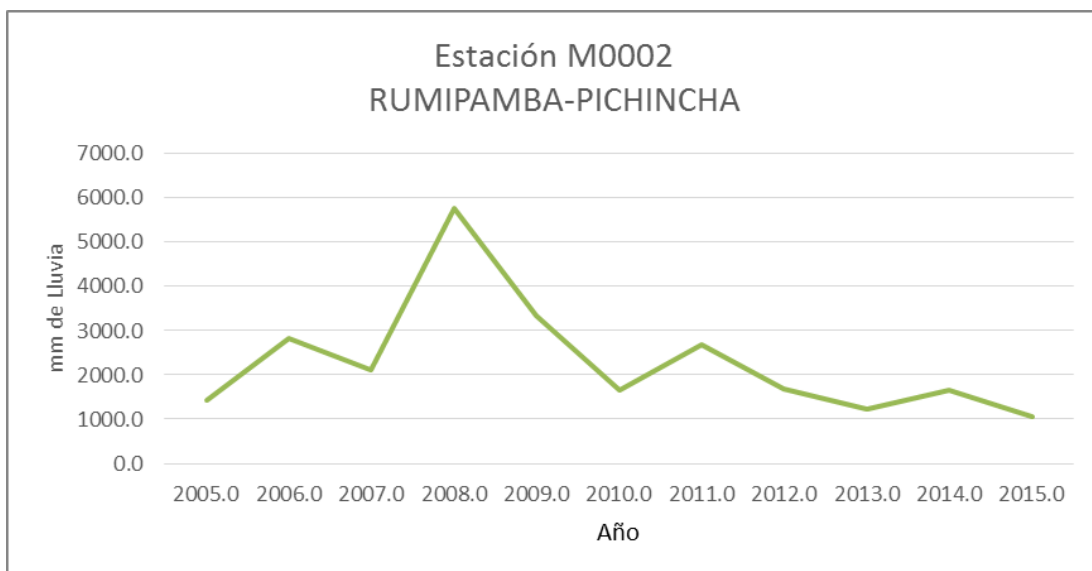


Figura 19. Histograma Estación Rumipamba (2005-2015)

En la **Tabla 14** se muestran los valores promedio de las precipitaciones de cada una de las 4 estaciones usadas en el estudio desde el 2005 al 2015.

Tabla 14

Resumen de los datos de las 4 estaciones usadas para el estudio.

Estación	Código	Precipitación (mm)
La Tola	M0002	826.5
Izobamba	M0003	1488.2
Uyumbicho	M0113	1456.0
Rumipamba	M0353	2313.1
Promedio		1521.0
Desviación		528.0

La desviación calculada representa un 34.75% con respecto a la precipitación promedio. Para poder realizar el método aritmético la desviación debe ser inferior al 10% del promedio. Por este motivo el cálculo de la precipitación media se lo realiza mediante los polígonos de Thiessen.

3.3.1 POLÍGONOS DE THIESSEN

Para la aplicación del método de los polígonos de Thiessen es necesario contar con la posición de cada una de las estaciones meteorológicas impuestas por el organismo encargado, en el caso del Ecuador el INAMHI, para el correcto análisis de cada área tributaria de los mismos. De esta manera se podrá establecer triángulos de incidencia entre estaciones adyacentes. Una vez establecidos dichos triángulos se proyectan líneas perpendiculares desde el punto medio de cada lado del triángulo, para de este modo y una vez identificado el punto donde se intersecan hallar el polígono donde cada estación tendrá su afectación. Los polígonos pueden tener parte de su área fuera del límite de la cuenca aunque esta porción de terreno no será tomado en cuenta para los cálculos, es decir solo la parte del polígono que este dentro de la cuenca es relevante para la aplicación de este método.

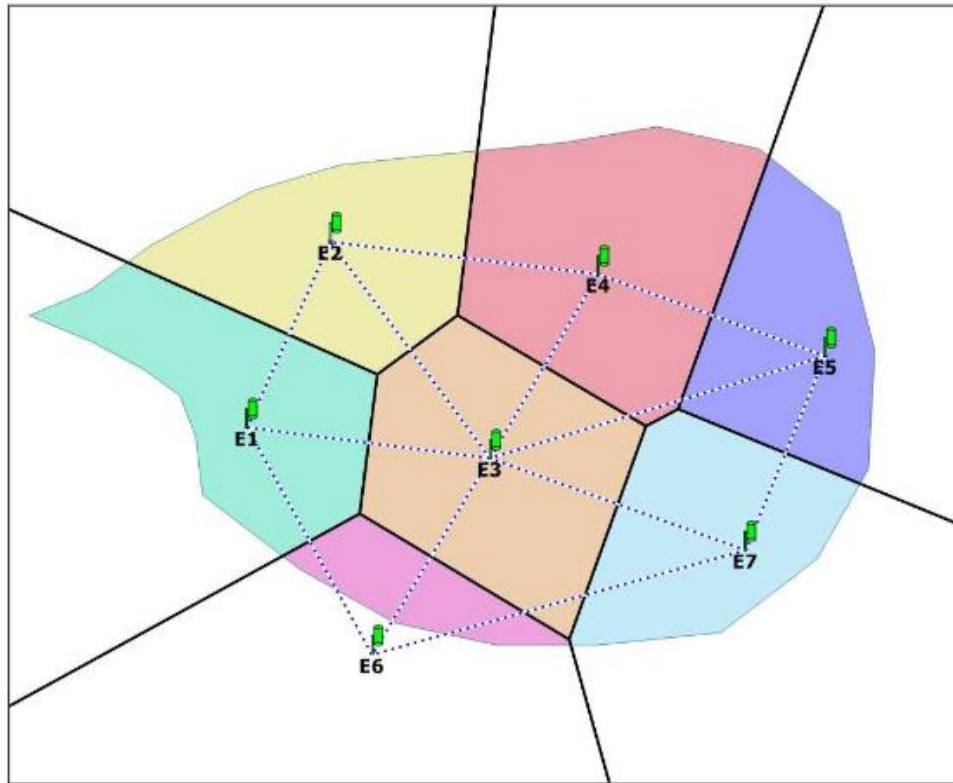


Figura 20. Trazado de los polígonos de Thiessen

Por lo tanto, se usaron las 4 estaciones para poder realizar la triangulación con el método de los polígonos de Thiessen, y que estos polígonos cubran el área completa de la cuenca como se muestra en el gráfico.

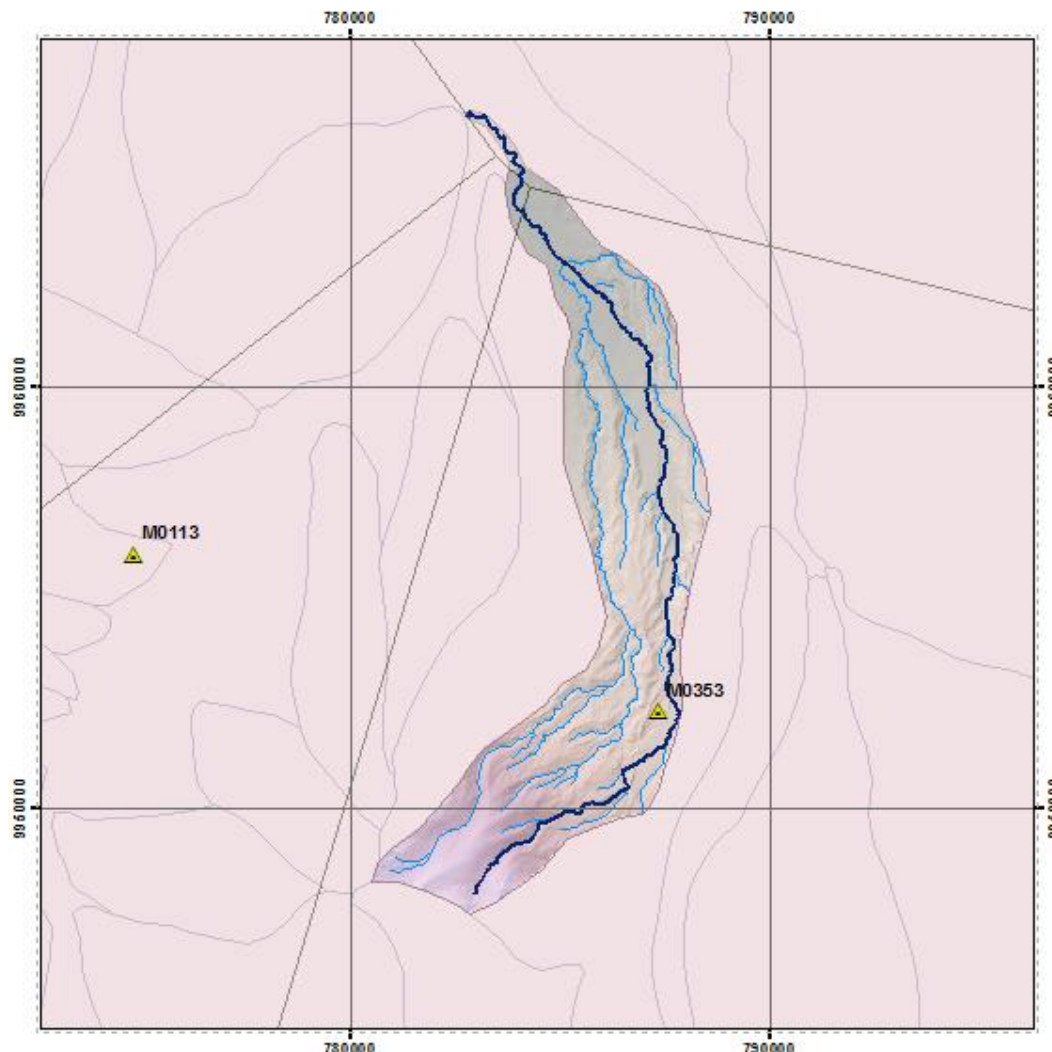


Figura 21. Trazado de los polígonos de Thiessen con las 4 estaciones usadas para el estudio de la cuenca del río Santa Clara.

En la Tabla 15 se muestra los valores calculados para cada estación una vez realizada la interpolación por los triángulos de Thiessen.

La altura de precipitación media por el método de polígonos de Thiessen se calcula de la siguiente manera:

$$hp_m = \frac{\sum_{i=1}^n hp_i A_i}{A} = \sum_{i=1}^n hp_i \frac{A_i}{A}$$

Dónde:

A = área total de la cuenca (km²)

A_i = Área total tributaria de la estación i (km²)

hp_i = altura de la precipitación registrada en la estación i (mm)

hp_m = altura de la precipitación media de la cuenca

n = número de estaciones localizadas cerca de la zona de estudio

El cálculo de precipitación media por este método se presenta en la Tabla 15.

Tabla 15

Cálculos del método de Thiessen para la cuenca del Río Santa Clara.

Código	PLUVIÓMETRO	PRECIPITACIÓN mm	ÁREA Km2	ÁREA PONDERADA km ²	PRECIPITACIÓN PONDERADA mm
M0002	1	826.5454545	0.814657	0.016052827	13.26839087
M0003	2	1488.236364	0.002507	4.94005E-05	0.073519572
M0113	3	1455.981818	0.505697	0.009964766	14.50851792
M0353	4	2313.10215	49.425647	0.973933007	2252.806533
SUMA		6083.865786	50.7	1	2280.66

Se puede observar que la estación Rumipamba rige sobre más del 97% del área de la cuenca. Aplicando la fórmula se obtiene la altura de precipitación media para la cuenca del Río Santa Clara

Altura de Precipitación media = 2280.66 mm

3.4 VOLUMEN PROMEDIO DE PRECIPITACIONES

Según (Sandoval Erazo & Aguilera Ortiz, 2014), el volumen promedio de precipitaciones anuales en cualquier cuenca, expresado en m^3 , es igual a:

$$V = 1000 * P * A$$

En la que P es el promedio de precipitaciones anuales de la cuenca (mm); A es el área de la cuenca en km^2 .

De esta manera el volumen promedio de precipitaciones anuales para la cuenca del Río Santa Clara es de:

$$P = 2280.66 \text{ mm}$$

$$\text{Área de la cuenca } A = 50,7 \text{ km}^2$$

$$V = 1000 * 2280,66 \text{ mm} * 50,7 \text{ km}^2$$

$$V = 115739938 \text{ m}^3$$

3.5 CÁLCULO DEL CAUDAL MEDIO

De acuerdo a (Sandoval Erazo & Aguilera Ortiz, 2014), el cálculo del caudal medio de una cuenca se calcula con la expresión:

$$Q_0 = \frac{31,71 * \bar{P} * A * C}{10^6}$$

Dónde:

Q_0 es el caudal medio de la cuenca (m^3/s)

C es el coeficiente de escorrentía.

P es el promedio de precipitaciones anuales de la cuenca (mm)

A es el área de la cuenca en km².

El coeficiente de escorrentía C, se lo calcula:

$$C = \frac{M_0 \cdot 10^6}{31,71 P}$$

Dónde:

M₀ Módulo específico de escorrentía,

P promedio de precipitaciones anuales de la cuenca (mm)

Según (Pourrut, 1995), el módulo específico de escorrentía en el Ecuador se lo puede obtener del mapa que se presenta en la **Figura 22**.

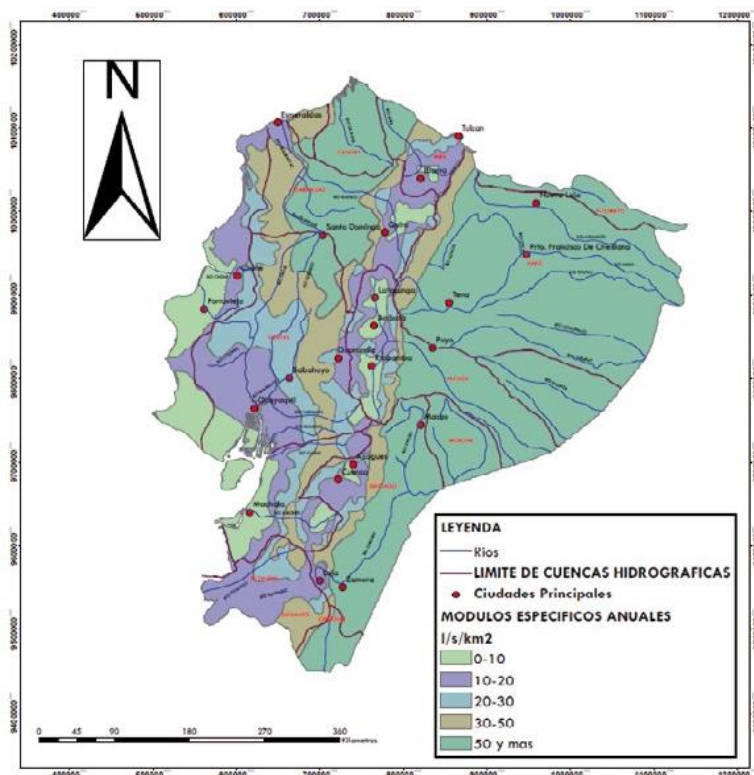


Figura 22. Módulos específicos de escorrentía.

Fuente: (Pourrut, 1995)

De acuerdo al mapa de módulos específicos de escorrentía de Pourrut mostrados en la Figura 22, la cuenca del Río Santa Clara tiene un módulo de escorrentía específica entre 10 y 20 l/s/km². Para el cálculo del caudal medio se consideró el valor de M₀ igual a 20 l/s/km², es decir 0.02 m³/s/km².

Con este valor se procede a calcular el coeficiente de escorrentía C, para la cuenca del Río Santa Clara, de la siguiente manera:

$$C = \frac{0,02\text{m}^3/\text{s}/\text{km}^2 * 10^6}{31,71 * 2280,66}$$

$$C = 0.28$$

Una vez obtenido el coeficiente de escorrentía, se procede al cálculo del caudal medio:

$$Q_0 = \frac{31,71 * 2280,66\text{mm} * 50,7 \text{ km}^2 * 0,28}{10^6}$$

$$Q_0 = 1,03 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3.5.1 COEFICIENTE DE ESCORRENTÍA POR EL NÚMERO DE CURVA

Existen métodos directos para el cálculo de la Escorrentía Superficial o Directa. Uno de ellos es el Método del Número de Curva, desarrollado por el Soil Conservation Service del departamento de Agricultura de los Estados Unidos, y que es uno de los métodos más extendido y utilizado.

Se denomina coeficiente de escorrentía a la proporción de precipitación que pasará a formar parte de la Escorrentía Superficial con respecto a la precipitación total.

De acuerdo a este método el Coeficiente de escorrentía se define con la siguiente expresión:

$$C = \frac{P_n}{P}$$

Dónde:

P_n es la escorrentía superficial

P es la precipitación total

La escorrentía superficial P_n , se determina con la ecuación:

$$P_n = \frac{(P - P_0)^2}{P + 4P_0}$$

Dónde:

P_0 es lo que se denomina umbral de escorrentía o mínima cantidad de agua que tiene que llover para que se produzca Escorrentía Superficial.

P es la precipitación total

Empíricamente se ha llegado a relacionar el umbral de escorrentía P_0 con el Número de Curva mediante:

$$P_0 = \frac{508}{N} - 5.08$$

Donde N es el Número de Curva, que está tabulado dependiendo del tipo de suelo, vegetación, uso del suelo, características hidrodinámicas del suelo, pendiente. El valor máximo de N es 100, lo que significa que el agua procedente de la lluvia ni se infiltra, ni es retenida ($P_0 = 0$).

Generalmente las cuencas se encuentran formadas por distintos tipos de suelo y vegetación, lo que implica que el valor de N no es único. Por ello, se calcula un valor característico para el conjunto de la cuenca realizando una media ponderada en función de la superficie que ocupa cada tipo de suelo y vegetación:

$$N = \sum_{i=1}^n \left(N_i \frac{S_i}{S} \right)$$

Para la cuenca del Río Santa Clara se determinó los diferentes tipos de suelos, cobertura vegetal y las distintas pendientes que existen en su superficie.

Orden de suelo	Área (km2)	Pendiente
Zona Urbana TIPO C	11.962793	1.63%
Molisoles TIPO C	25.62847	5.19%
Andisoles TIPO D	13.14536	25.87%
COBERTURA VEGETAL		
Cobertura	Área (km2)	
Área Poblada	13.582774	
Pastizal	22.597356	
Vegetación Arbustiva, Forestal	Plantación	7.22703
Páramo	6.829412	
Mosaico Agropecuario	0.120399	
Cultivo	0.376453	

Una vez definido cobertura vegetal, uso de suelo y pendientes se utilizó la tabla del Número de curvas para hallar el valor de N

Cobertura	Área (km2)	PORCENTAJE	N	TIPO DE SUELO	$\left(N_i \frac{S_i}{S}\right)$
Área Poblada	13.592774	26.78%	91	C	24.37
Pastizal	22.599356	44.53%	86	C	38.30
Vegetación Arbustiva, Plantación Forestal	7.22703	14.24%	77	D	10.97
Páramo	6.829412	13.46%	91	D	12.25
Mosaico Agropecuario	0.124399	0.25%	88	C	0.22
Cultivo	0.376453	0.74%	88	C	0.65
TOTAL	50.749424	100.00%	$N = \sum_{i=1}^n \left(N_i \frac{S_i}{S}\right)$		86.75

Se determinó que $N = 86.75$

Con el valor de N se calcula P_0 , de la siguiente manera:

$$P_0 = \frac{508}{86.75} - 5.08$$

$$P_0 = 0.776 \text{ cm}$$

$$P_0 = 7.76 \text{ mm}$$

La precipitación media mensual se obtiene dividiendo la precipitación media anual para los 12 meses del año

$$P = \frac{2280.66 \text{ mm}}{12}$$

$$P = 190.06 \text{ mm}$$

Con los valores de P_0 y P , se determina P_n

$$P_n = \frac{(190.06 \text{ mm} - 7.76 \text{ mm})^2}{190 \text{ mm} + 4 * 7.76 \text{ mm}}$$

$$P_n = 150.31 \text{ mm}$$

Determinados los valores de P_n y P , el coeficiente de escorrentía se calcula:

$$C = \frac{150.31 \text{ mm}}{190.06 \text{ mm}}$$

$$C = 0.79$$

Con el coeficiente de escorrentía calculado por el método de número de curva, se recalcula el caudal medio de la cuenca de una manera más exacta, ya que se considera el tipo de suelo, cobertura vegetal y pendientes

$$Q_0 = \frac{31,71 * \bar{P} * A * C}{10^6}$$

$$Q_0 = \frac{31,71 * 2280,66\text{mm} * 50,7 \text{ km}^2 * 0,79}{10^6}$$

$$Q_0 = 2.89 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

3.6 CAUDAL MÁXIMO

De acuerdo a (Sandoval Erazo & Aguilera Ortiz, 2014), se asume como premisa que los caudales máximos están siempre relacionados con un determinado período de retorno en años (T), en vista de lo cual cualquier fórmula empírica debe involucrar este factor. En segundo lugar, se tiene que el exponente f del área es variable, de acuerdo con su tamaño.

Para cuencas con áreas $A > 45 \text{ km}^2$, el caudal máximo se calcula con la siguiente expresión:

$$Q_{\text{máx}} = \alpha \frac{\bar{P}\sqrt{A}}{(1 + \lg A)} (0.5 \ln T - 0.7)$$

Dónde α es un coeficiente variable entre 0.01 y 0.1, cuyo cálculo depende de la cantidad de precipitación media anual que posee la cuenca. Las expresiones para su cálculo se pueden apreciar en la **Tabla 16**.

Tabla 16

Valores del coeficiente α

PRECIPITACIÓN (mm)	500 a 2500	> 2500 a 4000
Fórmula para el coeficiente α	$\alpha = 0,644 - 0,08 * \ln(P)$	$\alpha = 0,1256 * \ln(P) - 0,965$

Fuente: (Sandoval Erazo & Aguilera Ortiz, 2014)

La precipitación media anual de la cuenca del Río Santa Clara es de 2280.66 mm, motivo por el cual para el cálculo del coeficiente α se utiliza la expresión:

$$\alpha = 0.644 - 0.08 * \ln(P)$$

$$\alpha = 0.644 - 0.08 * \ln(2280.66)$$

y se obtiene el valor de α

$$\alpha = 0.02542239$$

El área de la cuenca del Río Santa Clara es de 50.749 km² y se calcula los periodos de retorno para (T) años como se muestra en la Tabla

Tabla 17

Caudales máximos para la cuenca del Río Santa Clara

PERIODO DE RETORNO T (años)	10	25	50	100	500	1000	5000	10000
CAUDAL MÁXIMO m ³ /s	68.90	138.84	191.76	244.67	367.52	420.44	543.29	596.20

De acuerdo a los cálculos presentados en la Tabla 17, se tiene un caudal máximo de 68.90 m³/s para un periodo de retorno de 10 años.

3.7 VOLUMEN ESCURRIDO

El volumen escurrido en una cuenca hidrográfica se determina mediante la siguiente ecuación (Sandoval Erazo & Aguilera Ortiz, 2014):

$$V_e = 31.536 * Q_o * 10^6$$

De esta manera, para la cuenca del Río Santa Clara, el volumen escurrido anual se calcula de la siguiente manera:

$$V_e = 31.536 * 1,03 \frac{m^3}{s} * 10^6$$

$$V_e = 32482080m^3$$

3.8 TIEMPO DE CONCENTRACIÓN (tc)

Se define como el tiempo mínimo necesario para que todos los puntos de una cuenca estén aportando agua de escorrentía de forma simultánea al to de salida, punto de desagüe o punto de cierre. Está determinado por el tiempo que tarda en llegar a la salida de la cuenca el agua que procede del punto hidrológicamente más alejado, y representa el momento a partir del cual el caudal de escorrentía es constante, al tiempo que máximo; el punto hidrológicamente más alejado es aquél desde el que el agua de escorrentía emplea más tiempo en llegar a la salida. (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011)

El tiempo de concentración, o tiempo mínimo necesario para que toda la cuenca esté aportando agua al punto de salida, es un parámetro característico de cada cuenca y depende de los siguientes factores:

- del tamaño de la cuenca: a mayor tamaño mayor tc
- de la topografía: a mayor accidentalidad o pendiente, menor tc
- la forma: a igualdad de otros factores, las cuencas alargadas presentan mayores tc que las cuencas redondeadas.

El cálculo del tiempo de concentración para la cuenca del Río Santa Clara se lo realizó con el método de Soil Conservation Service (USDA), para lo cual es necesario calcular el coeficiente de concentración k , con la siguiente expresión (Ibáñez Asencio, Moreno Ramón, & Gisbert Blanquer, 2011):

$$k = 3,3 * L * \sqrt{m}$$

Dónde:

k : coeficiente de concentración

L : longitud del recorrido de agua

m : pendiente del cauce

De esta manera el coeficiente de concentración para la cuenca del Río Santa Clara se calcula:

$$k = 3,3 * 26,313 * \sqrt{0,05161}$$

$$k=19.726 \text{ km}$$

Una vez obtenido el coeficiente de concentración, se ingresa al ábaco de escala logarítmica de Soil Conservation Service (USDA) Figura 23.

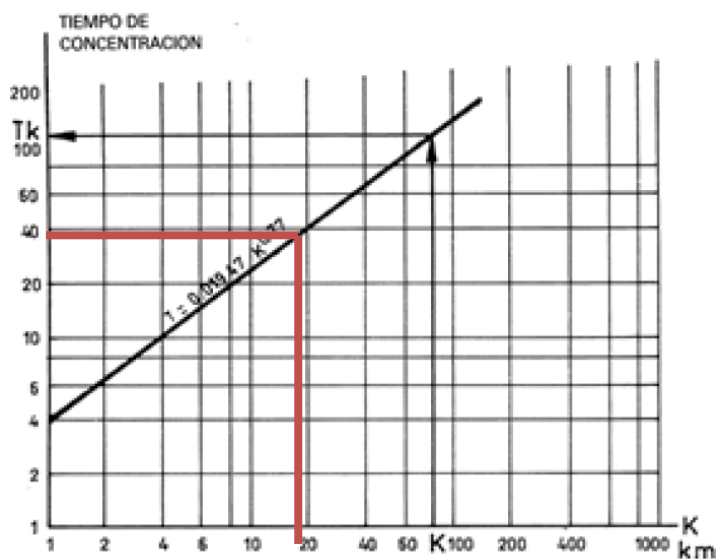


Figura 23. Ábaco de escala logarítmica para el cálculo del tiempo de concentración.

Fuente: Soil Conservation Service (USDA)

Para un k de 19.726 km, el resultado del tiempo de concentración es de 39 minutos.

$$T_{\text{RíoSantaClara}} = 39 \text{ minutos}$$

3.9 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RETORNO T

El periodo de retorno se define como el intervalo de recurrencia (T), al lapso promedio en años entre la ocurrencia de un evento igual o mayor a una magnitud dada. Este periodo se considera como el inverso de la probabilidad, del m -ésimo evento de los n registros.

El valor del periodo de retorno se determina en función de la posición de la variable aleatoria ($P_{\text{máx}}$ o $Q_{\text{máx}}$ en su caso) en una tabla de valores, ordenados de mayor a menor. Con base en las siguientes relaciones (SAGARPA, 2017):

$$T = \frac{n+1}{m}$$

$$P = \frac{m}{n+1}$$

Dónde:

T = Período de retorno (años).

n = Número de años de registro.

m = Número de orden.

P = Probabilidad

En la **Tabla 18** se muestran los cálculos para determinar el período de retorno de cada año donde P es la probabilidad de excedencia y T es el período de retorno.

Tabla 18

Cálculos para el período de retorno

Años	hmm	m	Año	hmm	P %	T (años)
2005	1163.875	1	2008	2739.6	8.33%	12.00
2006	1686.30224	2	2009	1803.325	16.67%	6.00
2007	1554.29503	3	2006	1686.30224	25.00%	4.00
2008	2739.6	4	2011	1673.725	33.33%	3.00
2009	1803.325	5	2007	1554.29503	41.67%	2.40
2010	1491.5	6	2010	1491.5	50.00%	2.00
2011	1673.725	7	2012	1307.23	58.33%	1.71
2012	1307.23	8	2014	1277.78379	66.67%	1.50
2013	1077.76985	9	2005	1163.875	75.00%	1.33
2014	1277.78379	10	2013	1077.76985	83.33%	1.20
2015	955.225	11	2015	955.225	91.67%	1.09

3.10 AFORO DEL RÍO SANTA CLARA

Los métodos de aforo se aplican en fuentes superficiales de agua en movimiento, es decir los ríos, manantiales, riachuelos. Este tipo de fuentes es la caracteriza a la hidrografía de la cuenca del Río Santa Clara.

El aforo de un río es la medida de volumen de agua que pasa por una sección delimitada en un tiempo determinado. La sección de aforo es una sección transversal o de corte de un afluente, es recomendable que dicha sección se encuentre en un tramo recto y sin pendientes pronunciadas.

3.10.1 MÉTODOS DE CÁLCULO DE AFORO

Existen varios métodos para determinar el aforo en secciones transversales de un río, entre los que destacan los siguientes:

3.10.1.1 MÉTODO VOLUMÉTRICO

Método principalmente basado en la obtención de cierto volumen de agua en un recipiente conocido en un tiempo determinado. Para después obtener la relación entre dicho volumen y el tiempo que le tomo en ocupar el mismo.

3.10.1.2 MÉTODO DEL VERTEDERO

Útil para caudales relativamente pequeños. Consiste en la inclusión de un vertedero de dimensiones y sección conocidas con el fin de producir una depresión del nivel de agua. Después de caer por un cierto tiempo y conociendo el volumen que paso por el vertedero se podrá calcular el caudal o aforo.

3.10.1.3 MÉTODO DEL FLOTADOR

En primer lugar se debe determinar un tramo regular y uniforme para la fácil obtención de su sección transversal. Se mide la velocidad que tiene un flotador tomando en cuenta dos puntos del tramo y el tiempo que le toma a dicho flotador el desplazamiento entre estos dos puntos.

3.10.1.4 APLICACIÓN DEL MOLINETE

El molinete es un instrumento hidráulico usado para medir la velocidad del agua en un flujo o canal abierto. Estos aparatos cuentan con hélices que

son impulsadas por el flujo del río y miden un número de revoluciones en un determinado tiempo.

Para la aplicación en cauces naturales, los molinetes pueden ser suspendidos por barras en el caso de corrientes superficiales relativamente pequeñas o también pueden ser suspendidos desde un cable en el aforo de corrientes profundas.

Para el cálculo de la velocidad con un molinete, se utiliza una ecuación que relaciona la velocidad angular de la hélice con la velocidad de la corriente. Esta ecuación es proporcionada por el fabricante de acuerdo a la calibración del molinete.

Mientras más mediciones se realicen con el molinete en una sección de control, mayor será el nivel de exactitud del resultado. Por esta razón es recomendable realizar mediciones de las velocidades de corriente en puntos equidistantes a lo ancho de la sección de control, así como a diferentes profundidades sobre el espejo de agua, tal como se observa en la **Figura 24**.

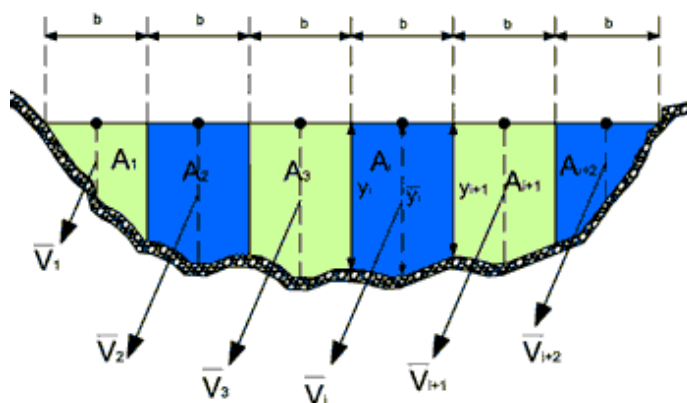


Figura 24. Sección transversal de un punto de aforo.

3.10.2 AFORO DEL RÍO SANTA CLARA

El método utilizado para el cálculo de aforos en diferentes secciones del río Santa Clara fue el de aforo con molinete, con lecturas separadas entre sí por un metro de distancia y a diferentes alturas con el molinete sostenido por barra.

El cálculo de aforos en el Río Santa Clara se realizó con un molinete modelo A.OTT KEMPTEN suspendido por barras, perteneciente al INAMHI.

Los parámetros calculados en el aforo son los siguientes:

Velocidad en cada punto de la sección (m/s)

Se realizó mediciones de velocidades en diferentes puntos de las secciones de control. En cada tramo separados un metro entre sí y a diferentes profundidades correspondientes al 20%, 40%,60%,80% y en la superficie del río. Las velocidades se obtuvieron utilizando siguiente ecuación:

$$v = (\alpha * N) + \beta$$

De acuerdo al modelo del molinete utilizado, los valores para las constantes α y β , son los siguientes:

$$\alpha = 0.5180$$

$$\beta = 0.0020$$

El valor de N es el resultado de la relación entre el número de revoluciones y el tiempo en segundos.

$$N = \frac{N^{\circ} \text{ revoluciones}}{\text{Tiempo}}$$

El intervalo de tiempo con el que se realizó las mediciones es de 30 segundos.

3.10.2.1 ANCHO DE LA SECCIÓN

La distancia medida entre la orilla izquierda y la orilla derecha de la sección transversal.

3.10.2.2 ÁREA DE LA SECCIÓN

Se calcula el área de la sección en base al levantamiento topográfico de la misma.

3.10.2.3 VELOCIDAD MEDIA

Se determina la velocidad media con la ayuda de los esquemas de la distribución de velocidades verticales en cada punto donde se tomaron lecturas con el molinete. La velocidad media es la relación entre el área del esquema de distribución vertical y su respectiva profundidad.

3.10.2.4 VELOCIDAD MÁXIMA

La velocidad máxima corresponde al mayor valor registrado en las mediciones de velocidad de todos los puntos.

3.10.2.5 PROFUNDIDAD MÁXIMA

De acuerdo a la geometría del canal, se puede observar en el esquema de la sección transversal la mayor profundidad.

Perímetro Mojado (m) Se determina el perímetro de la sección que tiene contacto con el agua del río. Es un dato proporcionado en campo.

3.10.2.6 RADIO HIDRÁULICO

Relación existente entre el área de la sección transversal y el perímetro mojado.

$$R = \frac{\text{Área de la Sección}}{\text{Perímetro mojado}}$$

Tirante.- Relación entre el Área de la sección transversal y el ancho de dicha sección.

$$\text{Tirante} = \frac{\text{Área de la Sección}}{\text{Ancho de la Sección}}$$

3.10.2.7 VELOCIDAD SUPERFICIAL MEDIA

La velocidad media superficial es el promedio de las velocidades en los puntos más próximos a la superficie libre.

Factor de Manning. Conocido por ser el factor de sección para el cálculo de flujo uniforme. Se lo determina de la siguiente forma:

$$Z = \text{Área de la sección} * \text{Radio Hidraulico}^{\frac{2}{3}}$$

3.10.3 UBICACIÓN DE LAS SECCIONES DE CONTROL

Se escogió dos tramos del río Santa Clara que se encuentran ubicadas en sitios donde el cauce es recto, para evitar las sobre elevaciones y cambios en la profundidad producidos por curvas (ver **Figura 25**).

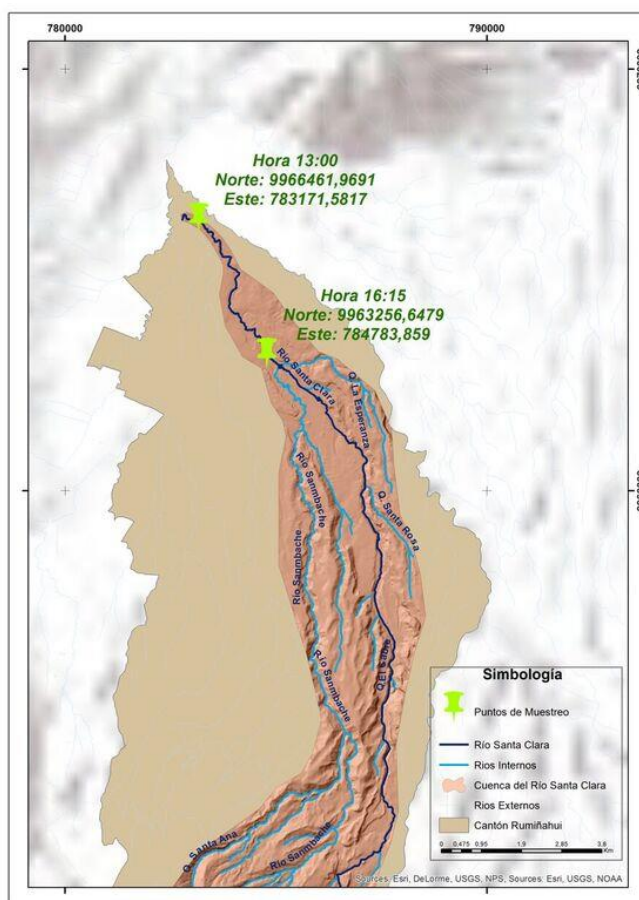


Figura 25. Puntos de control para cálculo de aforos

Las coordenadas UTM de las secciones de control se pueden observar en la **Tabla 19**.

Tabla 19

Coordenadas UTM de las secciones de control.

COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE
PUNTO 1	783171,5817	9966461,9691
PUNTO 2	784783,859	9963256,6479

Estas secciones de control fueron elegidas debido a que entre ellas existe la mayor densidad poblacional, tal como se muestra en la **Figura 26**, lo que hace fundamental un estudio de caudales en los mismos. Además en estos puntos fueron tomadas muestras de agua para el análisis de sólidos suspendidos y totales que requiere el análisis sedimentológico.

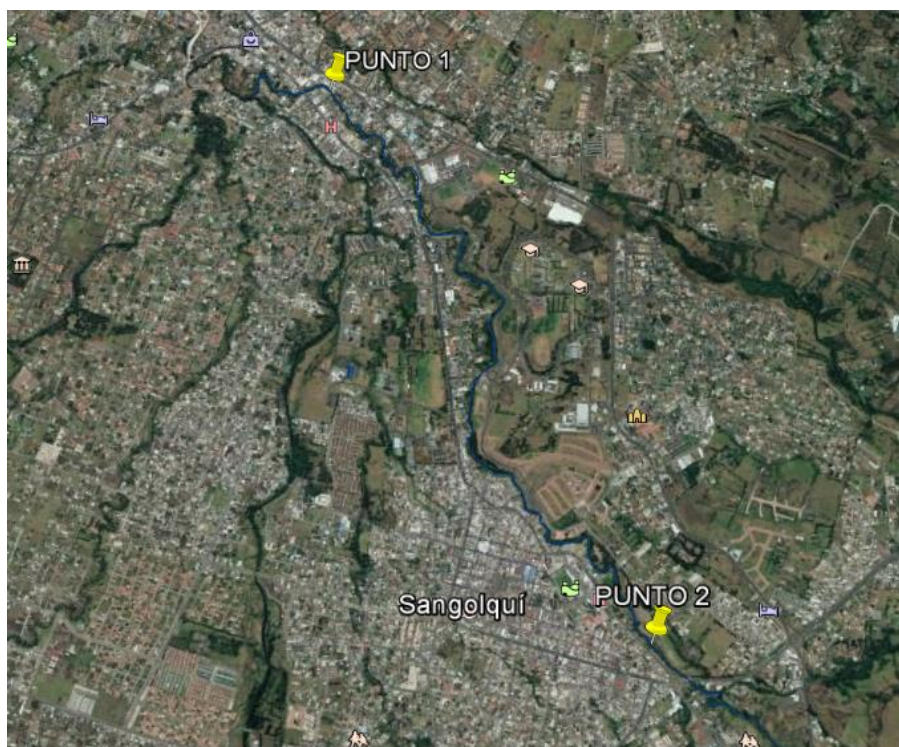


Figura 26. Puntos de control para cálculo de aforos

3.10.4 RESULTADOS DEL AFORO EN LA SECCIÓN DE CONTROL 1.

El aforo de la sección de control ubicada en el Punto 1, se realizó el 13 de agosto de 2016 a las 13h00. La geometría de la sección se observa en la Figura 27.

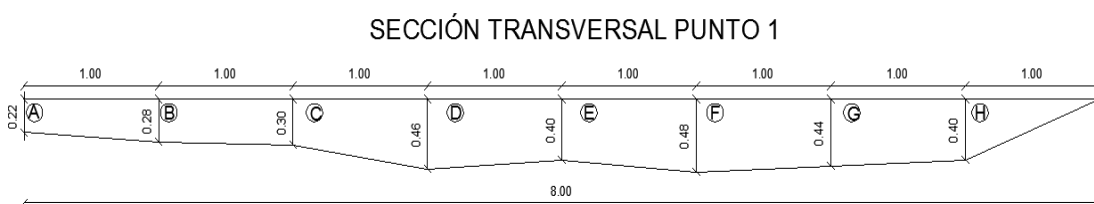


Figura 27. Sección Transversal Punto 1

Las mediciones de velocidad con el molinete se las realizó en la superficie de cada metro de ancho de la sección transversal y a profundidades equivalentes al 20, 40, 60 y 80 por ciento de la profundidad total. Los datos de campo y las velocidades calculadas se presentan en la **Tabla 20**.

Tabla 20

Medición de velocidades en la Sección de Control 1 con molinete.

ABSCISA (m)	PUNTO	PROFUNDIDAD TOTAL (m)	PROFUNDIDAD DE MEDICIÓN (m)	NÚMERO REVOLUCIONES	TIEMPO (s)	VELOCIDAD (m/s)	OBSERVACIONES
0	A	0.22	0.08	27	30	0.4682	ORILLA IZQ.
1	B	0.28	0.2	43	30	0.7444	
			0.17	46	30	0.7962	
			0.11	54	30	0.9344	
			0.05	57	30	0.9862	



2	C	0.3	0.22	46	30	0.7962	
			0.18	49	30	0.848	
			0.12	57	30	0.9862	
			0.06	60	30	1.038	
3	D	0.46	0.36	20	30	0.3474	
			0.27	20	30	0.3474	
			0.17	38	30	0.6582	
			0.08	65	30	1.1244	
			0.04	66	30	1.1416	
4	E	0.4	0.32	0	30	0	PIEDRA
			0.24	50	30	0.8654	
			0.16	72	30	1.2452	
			0.08	80	30	1.3834	
			0.06	82	30	1.4178	
5	F	0.48	0.38	0	30	0	PIEDRA
			0.29	40	30	0.6926	
			0.19	46	30	0.7962	
			0.1	50	30	0.8654	
			0.06	61	30	1.0552	
6	G	0.44	0.34	36	30	0.6236	
			0.26	36	30	0.6236	
			0.18	52	30	0.8998	
			0.09	64	30	1.107	
			0.06	64	30	1.107	
7	H	0.4	0.32	18	30	0.3128	
			0.24	18	30	0.3128	
			0.16	34	30	0.589	
			0.08	36	30	0.6236	
			0.06	41	30	0.71	
8	I	0	0	0	30	0	ORILLA DER.

Los perfiles de flujo correspondientes a cada punto se presentan en las Figura 28 y en la Figura 29.

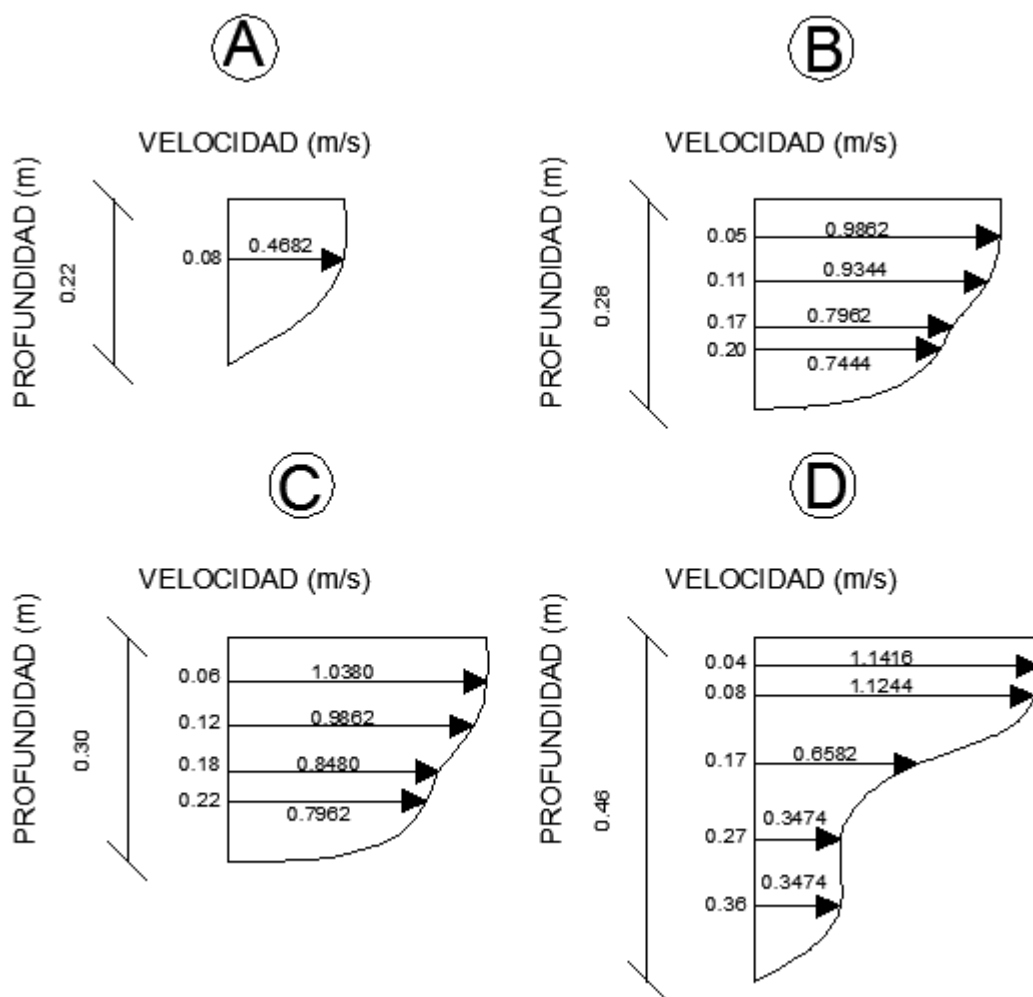


Figura 28. Perfiles de Flujo en los puntos A, B, C y D de la Sección 1.

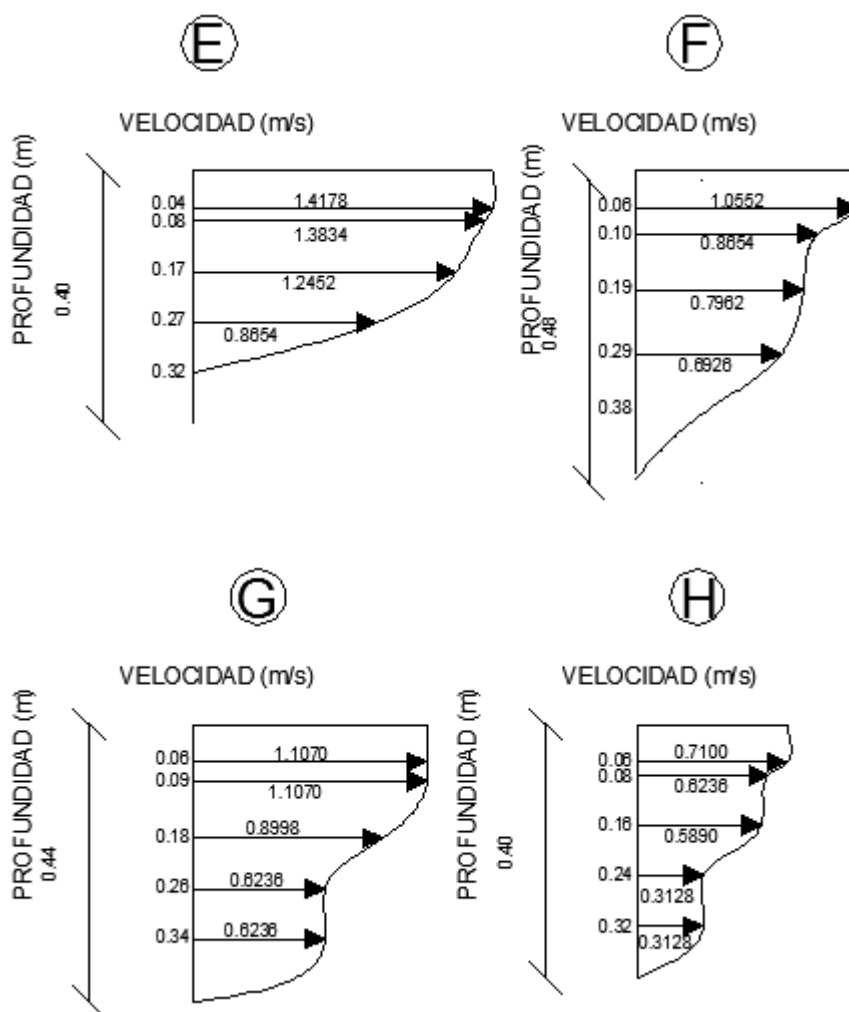


Figura 29. Perfiles de Flujo en los puntos E, F, G y H de la Sección 1.

El resumen de resultados correspondiente al cálculo de los parámetros hidráulicos de la Sección de Control 1, se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21

Resultados del Aforo en la Sección de Control 1

RESULTADOS DEL AFORO SECCIÓN DE CONTROL 1	
ANCHO DE LA SECCIÓN (m):	8
CAUDAL LÍQUIDO CALCULADO (m ³ /seg):	1.944
ÁREA DE LA SECCIÓN (m ²):	2.87
VELOCIDAD MEDIA (m/s):	0.677
VELOCIDAD MÁXIMA (m/s):	1.417



PROFUNDIDAD MÁXIMA (m):	0.48
PERÍMETRO MOJADO (m):	8.318
RADIO HIDRÁULICO (m):	0.345
TIRANTE (m):	0.358
VELOCIDAD SUPERFICIAL MEDIA (m/s):	0.996
MANNING: F. Hidráulico:	1.377
MANNING: F. Geométrico:	1.411
CHEZY: Hidráulico	1.153
STEVENS: A(D)**0.5	1.719
STEVENS: A(R)**0.5	1.685
GRISHANING: F. Cauce:	0.765
GRISHANING: F. Caudal:	0.468
GRISHANING: F. Tirante:	1.139
NÚMERO DE FROUDE:	0.361

3.10.5 RESULTADOS DEL AFORO EN LA SECCIÓN DE CONTROL 2.

El aforo de la sección de control ubicada en el Punto 2, se realizó el 13 de agosto de 2016 a las 16h15. La geometría de la sección se observa en la Figura 30.

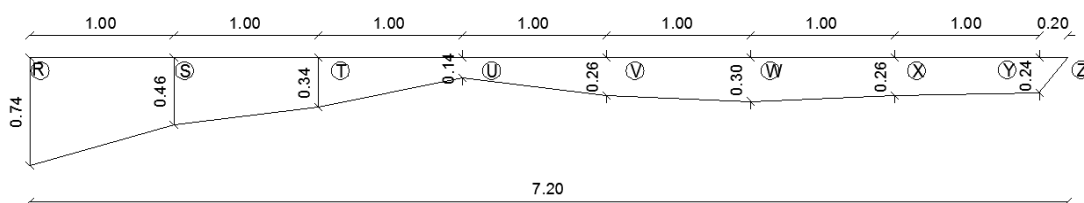


Figura 30. Sección Transversal Punto 2

Las mediciones de velocidad con el molinete se las realizó en la superficie de cada metro de ancho de la sección transversal y a profundidades equivalentes al 20, 40, 60 y 80 por ciento de la profundidad

total. Los datos de campo y las velocidades calculadas se presentan en la **Tabla 22.**

Tabla 22

Medición de velocidades en la Sección de Control 2 con molinete.

ABSCISA	PUNTO	PROFUNDIDAD TOTAL (m)	PROFUNDIDAD DE MEDICIÓN (m)	NÚMERO REVOLUCIONES	TIEMPO	VELOCIDAD (m/s)	OBSERVACIONES
0	R	0.74	0.59	33	30	0.5718	O. IZQ.
			0.44	11	30	0.192	
			0.29	38	30	0.6582	
			0.14	60	30	1.038	
			0.06	60	30	1.038	
1	S	0.46	0.36	11	30	0.192	
			0.27	20	30	0.3474	
			0.18	22	30	0.3818	
			0.09	28	30	0.4854	
2	T	0.34	0.24	44	30	0.7618	
			0.2	58	30	1.0034	
			0.13	77	30	1.3316	
			0.06	71	30	1.228	
3	U	0.14	0.04	32	30	0.5546	
4	V	0.26	0.18	47	30	0.8136	
			0.15	46	30	0.7962	
			0.1	49	30	0.848	
			0.05	51	30	0.8826	
5	W	0.3	0.2	42	30	0.7272	
			0.18	53	30	0.9172	
			0.12	74	30	1.2798	
			0.06	82	30	1.4178	
6	X	0.26	0.16	35	30	0.6064	
			0.1	45	30	0.779	
			0.02	32	30	0.5546	
7	Y	0.24	0.14	8	30	0.1428	
			0.09	11	30	0.192	
			0.05	14	30	0.2438	
7.2	Z	0	0	0	30	0	O DER.

Los perfiles de flujo correspondientes a cada punto se presentan en la Figura 31 y en la Figura 32.

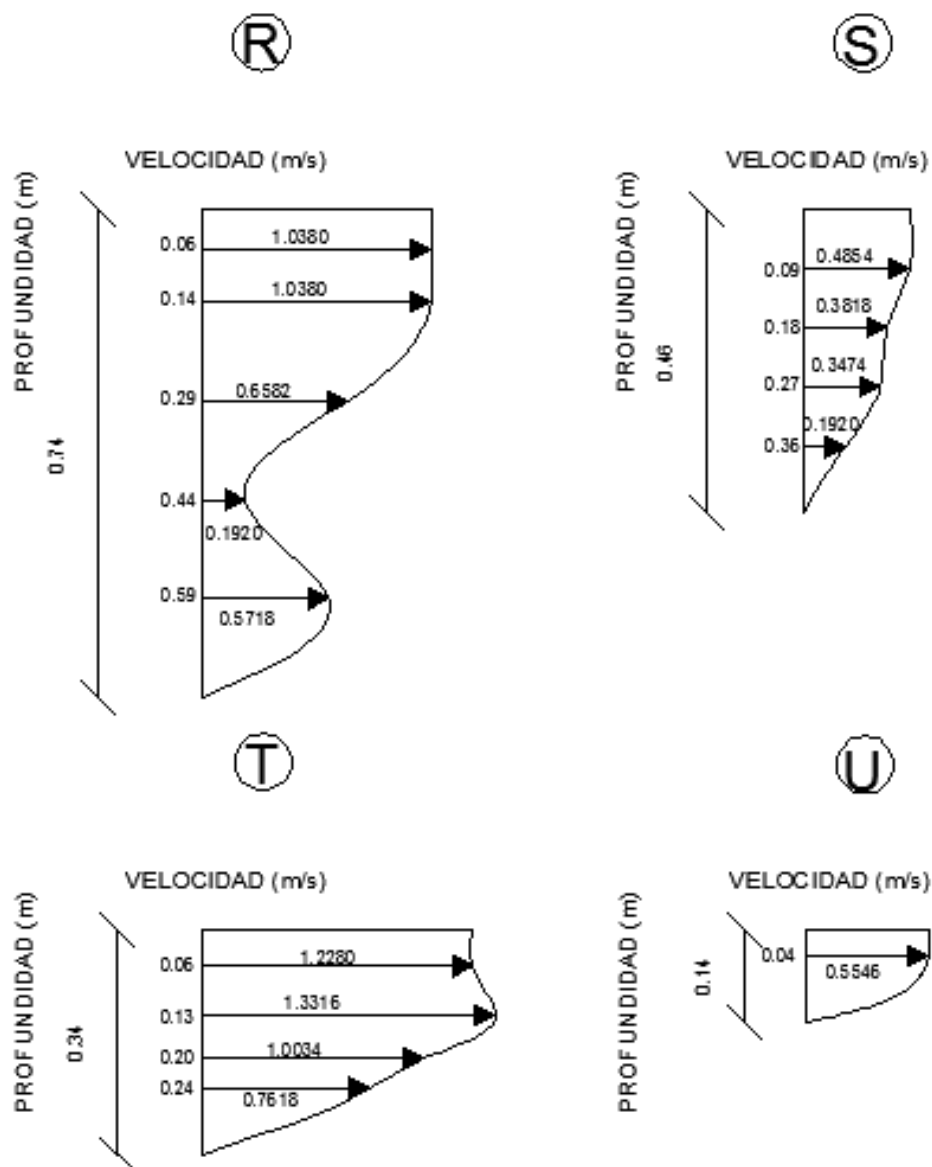


Figura 31. Perfiles de Flujo en los puntos R, S, T y U de la Sección 2.

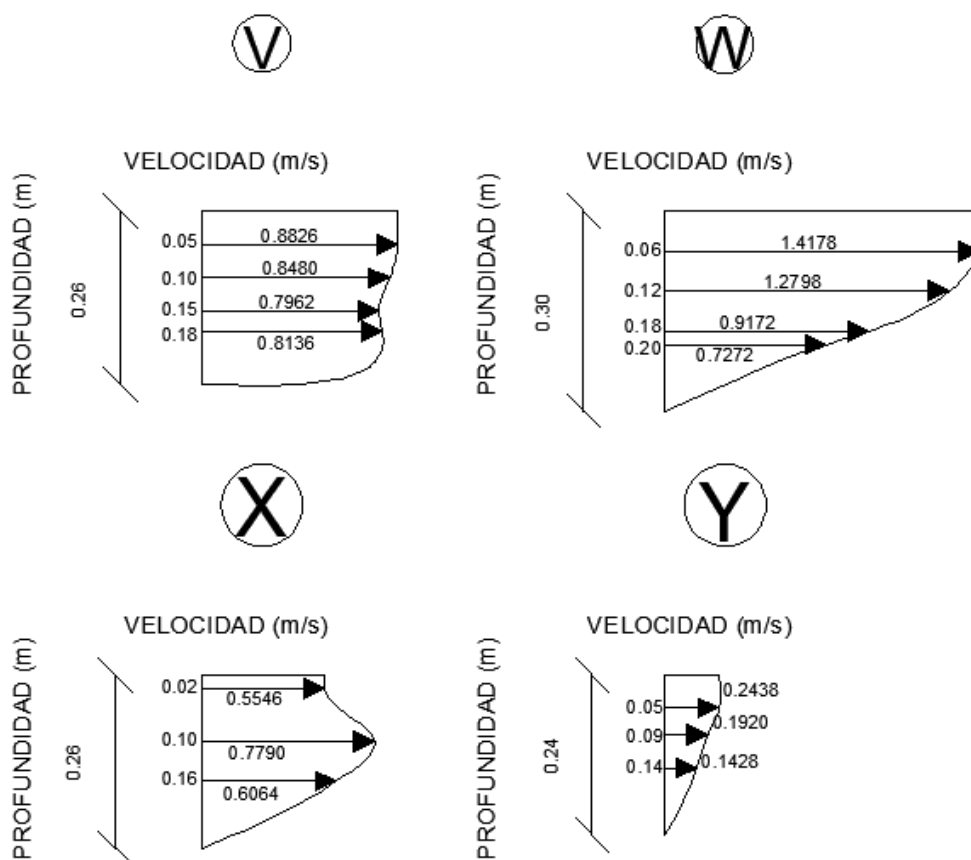


Figura 32. Perfiles de Flujo en los puntos V, W, X y Y de la Sección 2.

El resumen de resultados correspondiente al cálculo de los parámetros hidráulicos de la Sección de Control 2, se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Resultados del Aforo en la Sección de Control 2

RESULTADOS DEL AFORO SECCIÓN DE CONTROL 1	
ANCHO DE LA SECCIÓN (m):	7.2
CAUDAL LÍQUIDO CALCULADO (m ³ /seg):	1.444
ÁREA DE LA SECCIÓN (m ²):	2.274
VELOCIDAD MEDIA (m/s):	0.635
VELOCIDAD MÁXIMA (m/s):	1.417



PROFUNDIDAD MÁXIMA (m):	0.74
PERÍMETRO MOJADO (m):	8.126
RADIO HIDRÁULICO (m):	0.279
TIRANTE (m):	0.315
VELOCIDAD SUPERFICIAL MEDIA (m/s):	0.792
MANNING: F. Hidráulico:	1.484
MANNING: F. Geométrico:	0.972
CHEZY: Hidráulico	1.2
STEVENS: $A(D)^{**0.5}$	1.278
STEVENS: $A(R)^{**0.5}$	1.202
GRISHANING: F. Cauce:	0.761
GRISHANING: F. Caudal:	0.414
GRISHANING: F. Tirante:	0.837
NÚMERO DE FROUDE:	0.361

En la **Tabla 24**, se puede observar que la sección transversal en el punto 1 (aguas abajo) presenta un mayor caudal que el de la sección transversal ubicada en el punto 2.

Tabla 24

Caudales resultantes del aforo con molinete

SECCIÓN TRANSVERSAL	CAUDAL (m ³ /s)
PUNTO 1	1.944
PUNTO 2	1.444

Estos caudales servirán para el modelo de la simulación de arrastre de sedimentos realizados en HEC-RAS

CAPÍTULO 4

SEDIMENTOLOGÍA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

4.1 SEDIMENTOLOGÍA

La pérdida de suelo y el arrastre de sedimentos en una cuenca hidrográfica cuenta con parámetros que están directamente ligados o que son los principales responsables de la erosión, teniendo en cuenta el grado de afectación en cada tipo de suelo. Entre los cuales se puede citar de manera general los agentes que pueden ser parte determinante en el estudio de la erosión

- Clima
- Vegetación
- Tipo de suelo
- Topografía
- Uso de la tierra

Para complementar de manera óptima a continuación se analizarán de manera breve y simple cada uno de los factores antes citados.

4.1.1 CLIMA

Los factores climáticos que afectan una cuenca hidrográfica son los parámetros con mayor incidencia en la pérdida de suelos. Dentro del clima uno de los principales elementos a tomar en cuenta es la lluvia, ya que tiene una gran influencia en la erosión de cualquier tipo de suelo. Además de tener gran impacto se debe tener claro que es un factor variable en el tiempo y en el espacio, es decir que depende o es relativo de la zona en estudio así como de la estación del año en la que se encuentre dicha zona. La precipitación media anual que tiene una cuenca hidrográfica es una medida que afecta directamente a la pérdida de suelo, ya que mientras mayor sea la

precipitación media anual, mayor también será el desprendimiento del suelo, así como también mayor será la escorrentía superficial de la cuenca.

Dentro del estudio de suelos también se podría hablar de la condición del suelo como un parámetro importante o influyente para la erosión del mismo, ya que un suelo saturado previamente a la presencia de una precipitación puede ser más propenso a la erosión o por lo menos más fácil su segregación.

4.1.2 TEMPERATURA MEDIA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

La cuenca del Río Santa Clara está ubicada en el Cantón Rumiñahui, el cual tiene tres tipos de clima: Ecuatorial frío húmedo, Ecuatorial Mesotérmico Húmedo y Páramo. El 75% del cantón se encuentra dentro del clima Ecuatorial Mesotérmico húmedo, el 15% del cantón se encuentra en Ecuatorial Frío Húmedo y el 10% en Páramo. El clima del Cantón Rumiñahui, corresponde a la zona subtropical de tierras altas, el cual oscila desde los 16 a 23 °C durante el día y en las noches baja hasta los 8 °C, siendo los meses más calurosos de Julio y Agosto (Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui, 2014).

La temperatura en una cuenca hidrográfica es un factor determinante para en la productividad de cultivos agrícolas. Para determinar la temperatura media de la cuenca del Río Santa Clara se tomó registro de temperaturas en las estaciones meteorológicas cercanas.

Las estaciones de registros de temperatura presentan información discontinua y periodos de registros distintos, lo que obliga a plantear diferentes períodos de análisis de este parámetro climático. Se calcularon para cada estación climática considerada, las temperaturas medias mensuales y anuales de todo el período histórico de registros (1985-2009). Se seleccionaron estaciones que proporcionen valores de temperatura media. (Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui, 2014)

Tabla 25**Temperatura media mensual y anual (°C)**

COD.	NOMBRE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	MEDIA
M112	PILALO	12.6	12.5	13.0	13.3	13.3	13.1	12.7	13.0	12.9	13.1	12.9	12.9	12.9
M168	INIAP SUPLENTARIA PORCINOS	14.3	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.5	14.5	14.4	14.2	14.3	14.4	14.3

Fuente: (Información Meteorológica del INAMHI)

En la Tabla 25 se presentan las temperaturas medias mensuales y la media anual en el periodo de 25 años (1985-2009), y se observa la temperatura promedio anual en las estaciones seleccionadas es de 13,6°C.

4.1.3 VEGETACIÓN

La vegetación presente en una cuenca hidrográfica es uno de los parámetros fundamentales para realizar el análisis de pérdidas de suelo de la misma, ya que la erosión de un suelo depende directamente del tipo de cobertura vegetal que tiene.

Entendiéndose como vegetación a la capa que se interpone en el recorrido de manera directa entre el suelo y una gota de agua proveniente de la lluvia. Esta capa puede ser constituida por árboles, arbustos, hierbas, pastizales, entre otros. Aunque vegetación también puede ser el suelo que está siendo tratado para su posterior uso agrícola, debido a esto se determina que el impacto de la vegetación a la erosión depende del tipo de vegetación que se presente.

Para cuantificar la incidencia que la cobertura vegetal tiene en la producción de sedimentos o pérdidas de suelo hay que tomar en cuenta muchos factores acerca del tipo de vegetación presente en la cuenca, ya que no todo el tipo de plantas aporta en igual medida al comportamiento de la erosión del suelo. Por ejemplo la presencia de grandes árboles, si bien evitan que las gotas de lluvia caigan directamente sobre el suelo, también

afectan de manera negativa al momento que se acumulan mayores volúmenes de agua y caen desde sus altas ramas hacia el suelo. En muchos casos el desprendimiento de suelo que provoca la caída de agua acumulada en las ramas de los árboles altos es equivalente al de la caída de una gota de lluvia directamente hacia el suelo.

La cubierta vegetal conformada por ramas y hojas sirve para disminuir la velocidad de impacto de las gotas de lluvia, aunque depende mucho de la distribución en el espacio aéreo que ocupan y esto está directamente asociado con cada especie de árbol o arbusto. Una vez que la gota de lluvia tiene contacto con la hoja de un árbol podría darse la disociación de la misma ya que muchas especies de árboles presentan unas texturas que no permiten el fácil tránsito de la gota de agua hacia el suelo. Una vez señalado esto, se hace hincapié en citar la importancia de diferenciar el tipo de cobertura vegetal que tiene una cuenca hidrográfica en toda su superficie.

De manera general la influencia que tenga una gota de agua lluvia en el suelo está relacionada con el trayecto que pueda tener dicha gota hasta llegar al suelo. Esto quiere decir que la gota podría tener un mayor grado de afectación hacia el suelo si es que logra conseguir un aporte de una u otra manera de la capa de vegetación entendiéndose como tal a las hojas, ramas e incluso corteza de un árbol que pueden ayudar a que una gota se disocie u obtenga mayor volumen siendo así de mayor importancia para la erosión.

La capa de vegetación a nivel de suelo puede proveer una superficie irregular lo que conlleva a que la escorrentía superficial no se produzca de manera fácil.

4.1.4 USO DE SUELO

Otro de los principales factores que afecta a un suelo, es el uso de la tierra, ya que en la actualidad y por la intervención del hombre es el agente con mayor incidencia dentro de la erosión del suelo. Hoy en día muchos son los usos que el hombre le puede dar a un determinado terreno y por ello se ha incluido la aplicación de maquinaria que aporta de gran manera a la

erosión, más aun en zonas que todavía están en etapa de exploración o que no están urbanizadas. Es por ello que gran cantidad de sedimentos presentes en los afluentes son producto de la intervención del ser humano.

Naturalmente el ser humano se ha convertido en sinónimo de contaminación es por ello que varias agrupaciones en pro del medio ambiente han desarrollado varios planes de contingencia en el caso de que se incumplan los reglamentos.

Muchas actividades de la humanidad en contra del medio ambiente y que de cierta manera impulsa su desarrollo como especie dominante, es la tala de árboles lo que significa quitar la protección natural que tiene el suelo contra la erosión y de esta manera también facilita la escorrentía superficial.

El uso agrícola de gran parte del suelo en el Ecuador, además de la presencia de ganado hace que se hable de un suelo consolidado o compactado, lo que conlleva a que esté libre de agua y que se genere escorrentía superficial y así facilitar la erosión del mismo.

Como país minero el Ecuador tiene varios yacimientos donde es palpable el problema al que está sujeto el suelo debido a la exposición a sustancias tóxicas lo que produce el difícil crecimiento de capas vegetales para su aprovechamiento como ya hemos visto, sino que también existe el problema de acarreo de sedimentos compuestos por estas sustancias perjudiciales.

Finalmente los incendios muchas veces provocados en los bosques o zonas protegidas hacen que los problemas ya expuestos antes sean aún más visibles y tengan un desarrollo que no es favorable para el entorno de una cuenca hidrográfica.

4.1.5 COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

La cobertura vegetal y uso de suelo de la superficie de la cuenca del Río Santa Clara se obtuvo mediante el mapa de Cobertura Vegetal del Cantón Rumiñahui del año 2013 (Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui, 2014).

Las áreas correspondientes a cada tipo de cobertura vegetal se las realizó mediante el uso de ARCGis 10.3, utilizando únicamente el área de la cuenca del Río Santa Clara, tal como se muestra en la Figura 33.

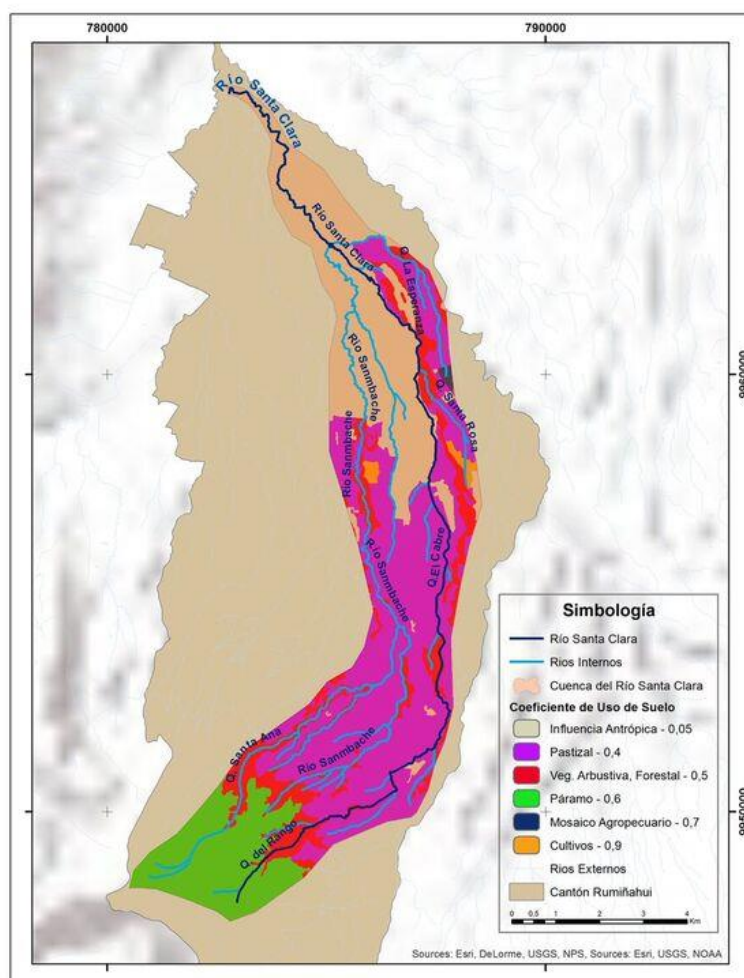


Figura 33. Cobertura vegetal y uso de suelo de la Cuenca del Río Santa Clara.

De acuerdo a lo presentado en la Figura 33, cada tipo de cobertura en la cuenca del Río Santa Clara, tiene las áreas presentadas en la Tabla 26:

Tabla 26

Cobertura vegetal y uso de suelo en la cuenca del Río Santa Clara.

Cobertura	Área (km²)
Área Poblada, Cuerpo de Agua, Infraestructura Antrópica	13.582774
Pastizal	22.597356
Vegetación Arbustiva, Plantación Forestal	7.22703
Páramo	6.829412
Mosaico Agropecuario	0.120399
Cultivo	0.376453

4.1.6 TIPO DE SUELO

El tipo de suelo es un factor determinante para la erosión, ya que a su vez se subdivide en otros parámetros que son de gran importancia para la determinación de la capacidad de un suelo a erosionarse.

Dichos parámetros pueden variar de un suelo a otro de manera muy significativa y más hablando de su composición, es decir en el caso de suelos granulares son más propensos a la erosión por la presencia de agua, por el contrario los suelos cohesivos presentan mayor resistencia a la disgregación como por ejemplo la arcilla la cual se encuentra con mayor frecuencia en las cuencas orientales del país. Una medida aproximada que nos sirve para determinar qué tan alto es el grado de erosión de un tipo de suelo es el porcentaje de material limoso que se encuentra en el mismo, debido a que este tipo de material cumple con las condiciones de suelo orgánico, heterogéneo, no cohesivo.

La presencia de materia orgánica en un suelo por medio del aporte de nutrientes al suelo ayuda al crecimiento de vegetación, la misma que disminuye el impacto de la erosión.

La diferencia entre un suelo granular y cohesivo indica la permeabilidad del mismo porque de manera directa la presencia de agua afecta a la estructura del suelo como tal llevando a aumentar o disminuir la erosión del mismo.

4.1.7 ORDEN DE SUELOS EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

El orden de suelos de la cuenca del Río Santa Clara se obtuvo mediante el mapa de orden de suelos del cantón Rumiñahui (Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui, 2014)

Las áreas correspondientes a cada tipo de suelo se las realizó mediante el uso de ARCGis 10.3, utilizando únicamente el área de la cuenca del Río Santa Clara, tal como se muestra en la Figura 34.

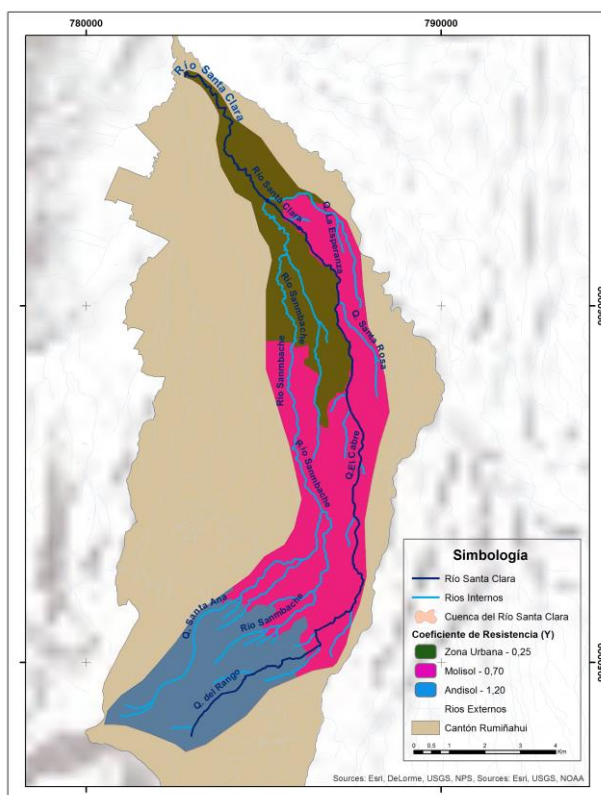


Figura 34. Orden de suelos de la Cuenca del Río Santa Clara.

En el cantón Rumiñahui se observó un paisaje caracterizado por relieves desde muy bajos a altos de origen volcánico asociados a las Formaciones Cangahua y Chiche, y Volcánicos Pasochoa y Sincholagua, donde los suelos son en su mayoría francos y franco arenosos. (Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui, 2014)

La zona norte de la cuenca no presenta suelo caracterizado ya que actualmente se encuentra ocupada por la zona urbana.

Hacia la parte central, la cual corresponde a la zona de menor altitud encontramos relieves de origen tectónico erosivo asociados a la Formación Chiche, Cangagua y Volcánicos del Sincholagua donde los suelos corresponden al orden de los molisoles.

En el sur, siendo la zona de mayor altitud, se observó principalmente un paisaje caracterizado por unidades morfológicas de origen volcánico como son los flancos de volcán, flujos de lava y vertientes de flujo de lava, en donde los suelos corresponden al orden de los Andisoles.

De acuerdo a lo presentado en la Figura 33, cada tipo de cobertura en la cuenca del Río Santa Clara, tiene las áreas presentadas en la Tabla:

Tabla 27

Orden de suelos en la cuenca del Río Santa Clara

Orden de suelo	Área (km²)
Zona Urbana	11.962793
Molisoles	25.62847
Andisoles	13.14536

4.1.8 TOPOGRAFIA DE LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

La topografía de un terreno es el análisis conjunto de la planimetría y altimetría de toda la superficie de la cuenca hidrográfica. La altimetría en especial es muy importante ya que la pendiente de la cuenca es un elemento fundamental para determinar la escorrentía superficial que se produce en toda la extensión de la misma.

La cuenca puede estar constituida por una topografía irregular o montañosa y es de suma importancia determinar el tipo de terreno que se encuentra en la zona de estudio.

La pérdida de suelo que se presenta en una cuenca hidrográfica varía directamente de acuerdo al porcentaje de pendientes que presenta su topografía

El mapa de pendientes que presenta la cuenca del Río Santa Clara se la realizó mediante el uso de ARCGis 10.3, utilizando el modelo digital del terreno, tal como se muestra en la Figura 35.

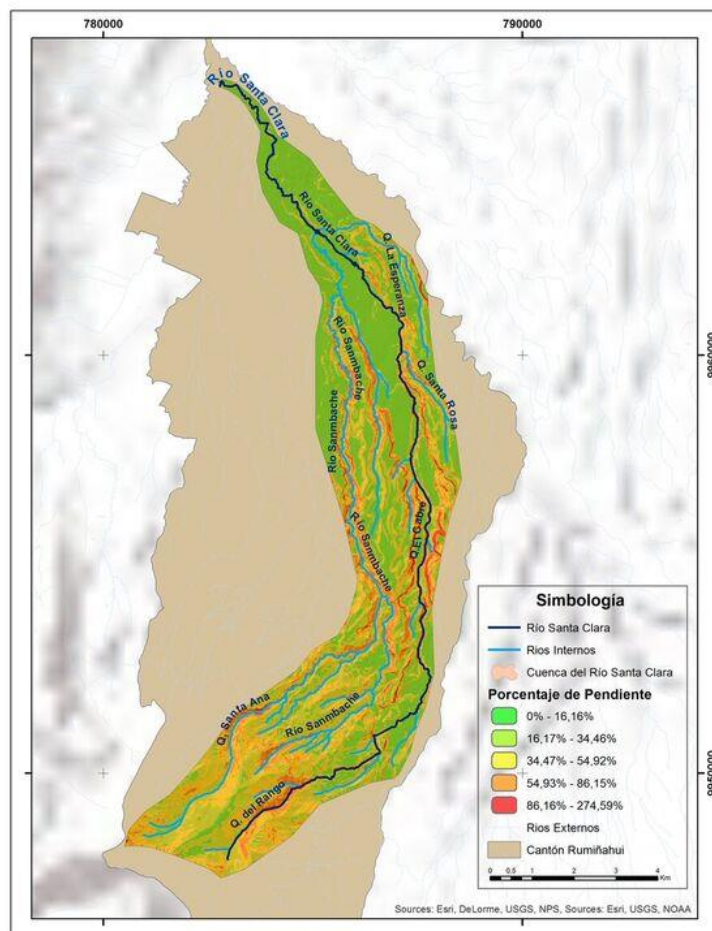


Figura 35. Porcentaje de pendientes en la Cuenca del Río Santa Clara.

4.2 PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS EN LA CUENCA DEL RÍO SANTA CLARA

La producción de sedimentos en una cuenca hidrográfica responde a muchos factores que son interpretados y cuantificados en varios métodos de estimación. En el presente estudio se adoptó la metodología de Gavrilovic, debido a que toma en cuenta los principales parámetros que implica la producción de sedimentos tales como: temperatura media anual, precipitación media anual, superficie de la cuenca, uso de suelo, cobertura vegetal, pendiente superficial, longitud de afluentes y del cauce principal.

Estos parámetros están definidos para la cuenca del Río Santa Clara en los capítulos anteriores.

De acuerdo a (Spalletti & Brea, 2006), la erosión superficial ocurre principalmente debido al impacto de las gotas de lluvia en el suelo y al escurrimiento del agua sobre la superficie, por lo que los procesos erosivos son el resultado de la interacción de factores tales como topografía, clima, tipo de suelo, uso del suelo, vegetación, características geológicas, geomorfología, entre otros, por lo que las formulaciones desarrolladas para estimar estos fenómenos intentan incluir estas variables con un adecuado peso relativo.

4.2.1 APLICACIÓN DEL MÉTODO DE GAVRILOVIC

La metodología propuesta por Gavrilovic, estima la cantidad de material producido por erosión superficial en una cuenca hidrográfica que será transportada a la sección de cierre de la misma (Gavrilovic, 1988), y puede calcularse mediante la expresión:

$$G = W \cdot R \left(\frac{m^3}{año} \right)$$

Dónde:

W: producción media anual de sedimento por erosión superficial.

R: coeficiente de retención de sedimentos.

La producción media anual de sedimento por erosión superficial (W), se determina con la siguiente expresión:

$$W = T \cdot h \cdot \pi \cdot Z^{3/2} \cdot F$$

dónde:

T: coeficiente de temperatura, que se obtiene de:

$$T = [(t/10) + 0.1]^{1/2}$$

t: temperatura promedio anual (°C).

h: precipitación media anual (mm/año).

F: superficie de la cuenca (km²).

Z: coeficiente de erosión, cuyo cálculo se lo realiza con la expresión:

$$Z = X \cdot Y \cdot (\phi + I^{1/2})$$

X: coeficiente de uso del suelo y cobertura vegetal.

Y: coeficiente de resistencia del suelo a la erosión.

ϕ : coeficiente que evalúa los procesos erosivos observados.

I: gradiente de la pendiente superficial (en %).

Los coeficientes X, Y y ϕ representan, respectivamente, el grado de protección del suelo dado por la vegetación y la intervención antrópica, el grado de erodibilidad del suelo, y el estado de inestabilidad de la cuenca. (Spalletti & Brea, 2006)

El factor X, que es el que depende del uso del suelo y cobertura vegetal en la cuenca hidrográfica varía entre 0.05 y 1. En el caso de la cuenca del Río Santa Clara, el uso del suelo y cobertura vegetal se puede observar en la Figura 33. El valor de X se adopta mediante los valores registrados en la **Tabla 28**.

Tabla 28

Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic

X	COBERTURA Y USO DEL SUELO
1	suelo desnudo
0.9	barbecho



0.7	viñedos, cultivos
0.6	pastizales de montaña
0.5	bosques, vegetación arbustiva
0.4	pastizales
0.05	superficie antrópica

Fuente: (Beyer Portner, 1998)

El factor Y depende del tipo de suelo superficial que tiene la cuenca hidrográfica, indica la resistencia del suelo a ser erosionado y varía entre 0.25 y 2. En el caso de la cuenca del Río Santa Clara, el orden de suelos se puede observar en la Figura 34. El valor de Y se adopta mediante los valores registrados en la **Tabla 29**.

Tabla 29

Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic

Resistencia del suelo a la erosión	Y
Material duro, resistente a la erosión	0.25-0.6
Material con resistencia moderada a la erosión	0.6-1.0
Esquistos, material débil	1.0-1.3
Sedimentos, morrenas, materiales con poca resistencia	1.3-1.8
Sedimentos finos y suelos sin resistencia a la erosión	1.8-2.0

Fuente: (Beyer Portner, 1998)

El coeficiente ϕ está asociado a los procesos de erosión y varían entre 1 y 0.1. La pendiente superficial de la cuenca del río Santa Clara se obtuvo con Modelos Digitales de Elevación como se puede observar en la Figura 35.

Para determinar el grado de erodabilidad del suelo de acuerdo a la pendiente del terreno se utilizó la clasificación de pendientes de (Zuidam, 1986), que se puede observar en la **Tabla 30**.

Tabla 30

Clasificación de pendientes

Pendiente (%)	Condiciones del terreno
0-2	Planicie, sin denudación apreciable
2-7	Pendiente muy baja, peligro de erosión
7-15	Pendiente baja, peligro severo de erosión
15-30	Pendiente moderada, deslizamientos ocasionales, peligro de erosión severo
30-70	Pendiente fuerte, procesos denudacionales intensos (deslizamientos), peligro extremo de erosión de suelos.
70-140	Pendiente muy fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales intensos, reforestación posible
>140	Extremadamente fuerte, afloramientos rocosos, procesos denudacionales severos (caídas de rocas), cobertura vegetal limitada.

Fuente: (Zuidam, 1986)

De acuerdo a este análisis, se pudo obtener los valores de ϕ para la cuenca del Río Santa Clara en base a la **Tabla 31**.

Tabla 31

Factores descriptivos utilizados en el modelo de Gavrilovic

TIPO DE PROCESO EROSIVO Y ESTADO	\emptyset
Sin erosión o pocos signos de erosión	0.1-0.2
Erosión laminar y regueros en un 20-50% de la cuenca	0.3-0.5
Erosión en ríos y cárcavas, depósitos aluviales.	0.6-0.7
50-80% de la cuenca afectada por erosión superficial y deslizamientos	0.8-0.9
Toda la cuenca afectada por erosión	1

Fuente: (Beyer Portner, 1998)

El coeficiente de retención de sedimentos (R), indica la relación entre el volumen de sedimento que efectivamente pasa por la sección de cierre de la cuenca y el volumen total de material producido por erosión superficial. (Spalletti & Brea, 2006). Su valor depende de parámetros que caracterizan a toda la cuenca, y la expresión su cálculo es:

$$R = [(O.D)^{1/2} \cdot (L + Li)] / [(L + 10) \cdot F]$$

dónde:

O: perímetro de la cuenca (km).

D: diferencia de nivel media en la cuenca (km).

Li: longitud total de los afluentes fluviales laterales (km).

L: longitud de la cuenca por el talweg del cauce principal (km).

F: superficie de la cuenca (km²).

Como se ha dicho, el valor de "R" depende de parámetros que caracterizan a cada cuenca en su totalidad, por lo que no se puede

trabajar con las celdas como unidad de cálculo, pues habrá un único valor de este coeficiente para cada cuenca, y por lo tanto, para todas las celdas incluidas en ella. (Spalletti & Brea, 2006)

Para la cuenca del Río Santa Clara el factor R se determinó con los siguientes datos:

$$O = 48.51 \text{ km}$$

$$D = 0.835 \text{ km}$$

$$L_i = 115.659 \text{ km}$$

$$L = 26.313 \text{ km.}$$

$$F = 50.749 \text{ km}^2$$

Al aplicar la ecuación para el cálculo de R, se obtiene el siguiente resultado:

$$R = 0.49$$

Los parámetros X, Y, ϕ e I, son valores que varían en toda la superficie de la cuenca, por lo que para la aplicación del método de Gavrilovic, para el cálculo de la producción media anual de sedimento superficial en la cuenca del Río Santa Clara se utilizó el software ARCGis 10.3, utilizando formatos raster de cada parámetro, con el fin de aplicar la ecuación a cada celda o pixel con sus valores correspondientes. De esta manera se obtiene un mapa en el que se puede apreciar las zonas de la cuenca que más susceptibles son a producir sedimentos, además se tiene un valor mucho más exacto de la producción de sedimentos anual de toda la cuenca. Cada pixel o celda al que se le asignaron valores en los formatos raster representan una superficie de diez metros por diez metros.

El modelo cartográfico para la aplicación del modelo de Gavrilovic en los formatos raster es el que se presenta en el flujograma de la Figura 36.

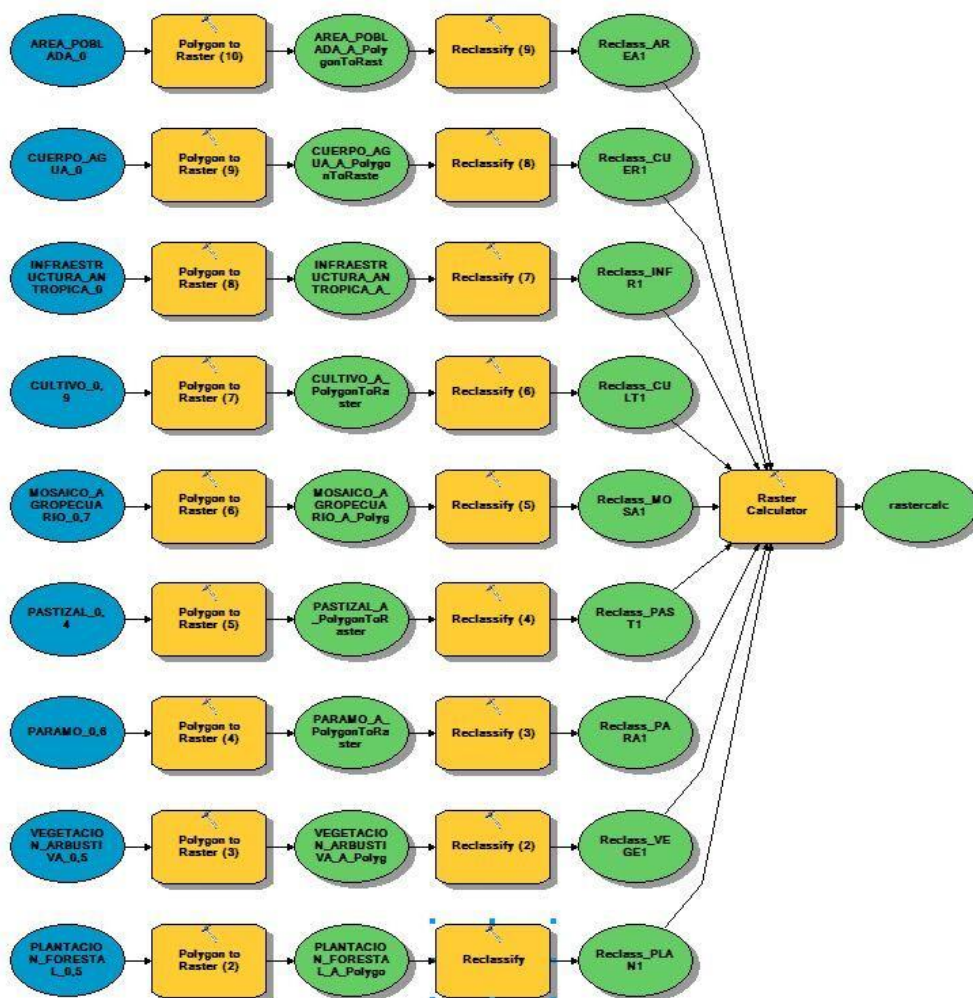


Figura 36. Flujograma del modelo cartográfico para la aplicación del método de Gavrilovic en ArcGis 10.3.

Una vez asignados los valores correspondientes de “X”, “Y”, “ ϕ ” e “I” a cada celda, se calculó el parámetro “Z”, como se puede observar en la Figura 37.

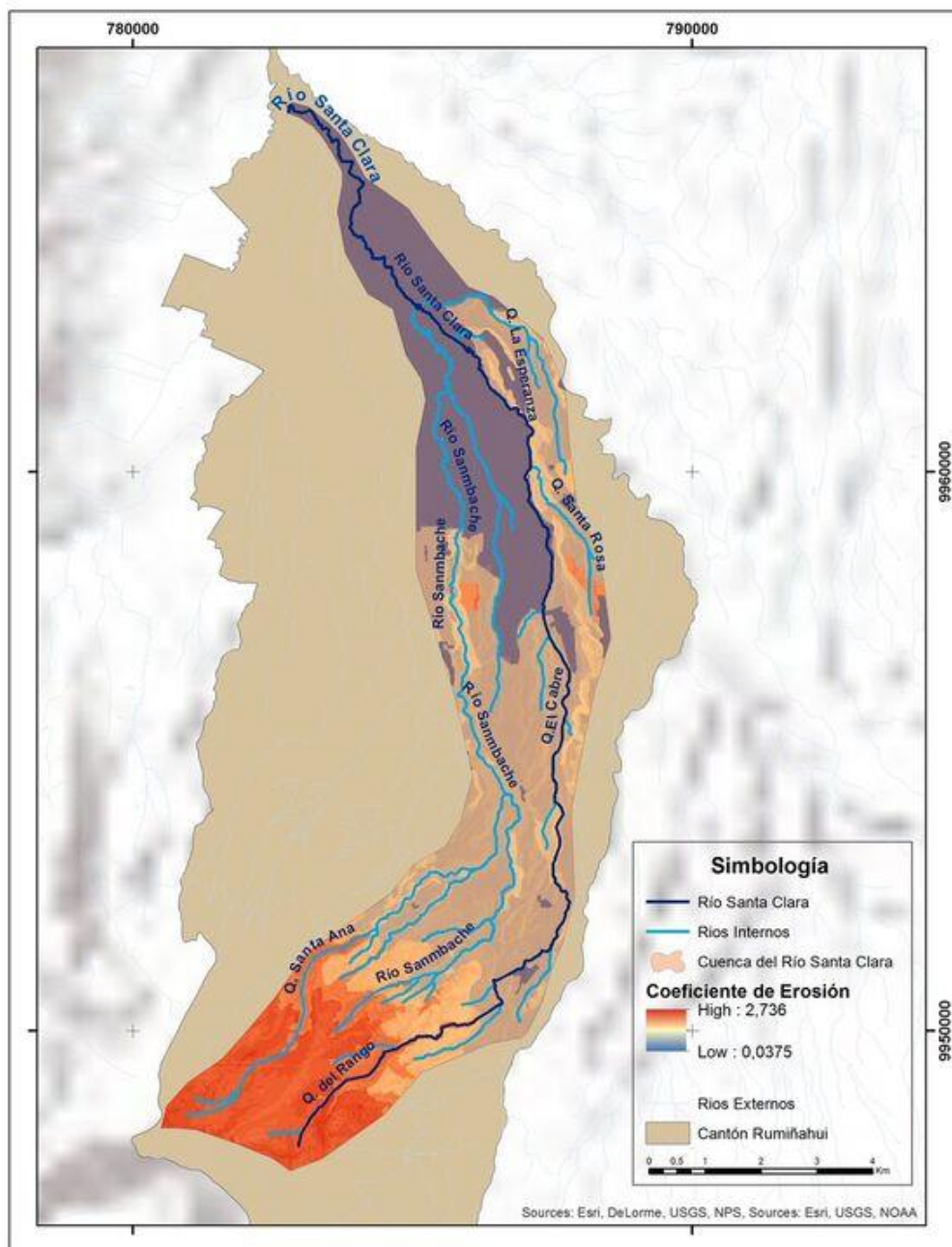


Figura 37. Coeficiente de erosión Z en la cuenca del Río Santa Clara.

Con el mapa de los valores de “Z” y los valores de “T”, “h” en la cuenca del Río Santa Clara, se aplicó la fórmula de W con el fin de obtener el valor de producción media anual de sedimento por erosión superficial de cada

celda ($\text{m}^3/\text{año km}^2$), que se muestra en la Figura 38. Este mapa indica claramente las zonas más susceptibles de ser atacadas por erosión superficial.

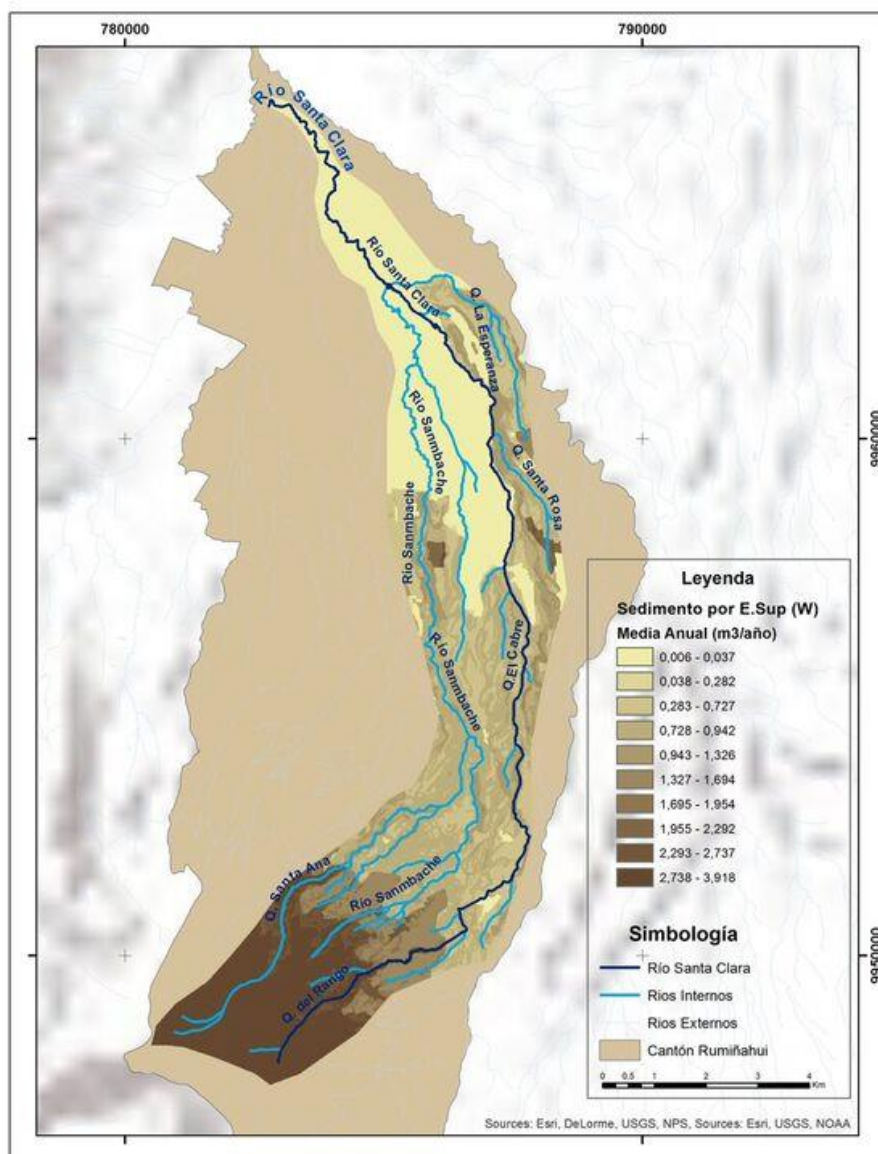


Figura 38. Producción media anual de sedimento (W) por erosión superficial de cada celda en la cuenca del Río Santa Clara.

Al mapa que representa la producción media anual de sedimento por erosión superficial de cada celda (W) presentado en la Figura 38, se afectó

por el valor de coeficiente de retención de sedimentos (R) y se obtiene el mapa del volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca (G) en cada celda de la cuenca del Río Santa Clara.

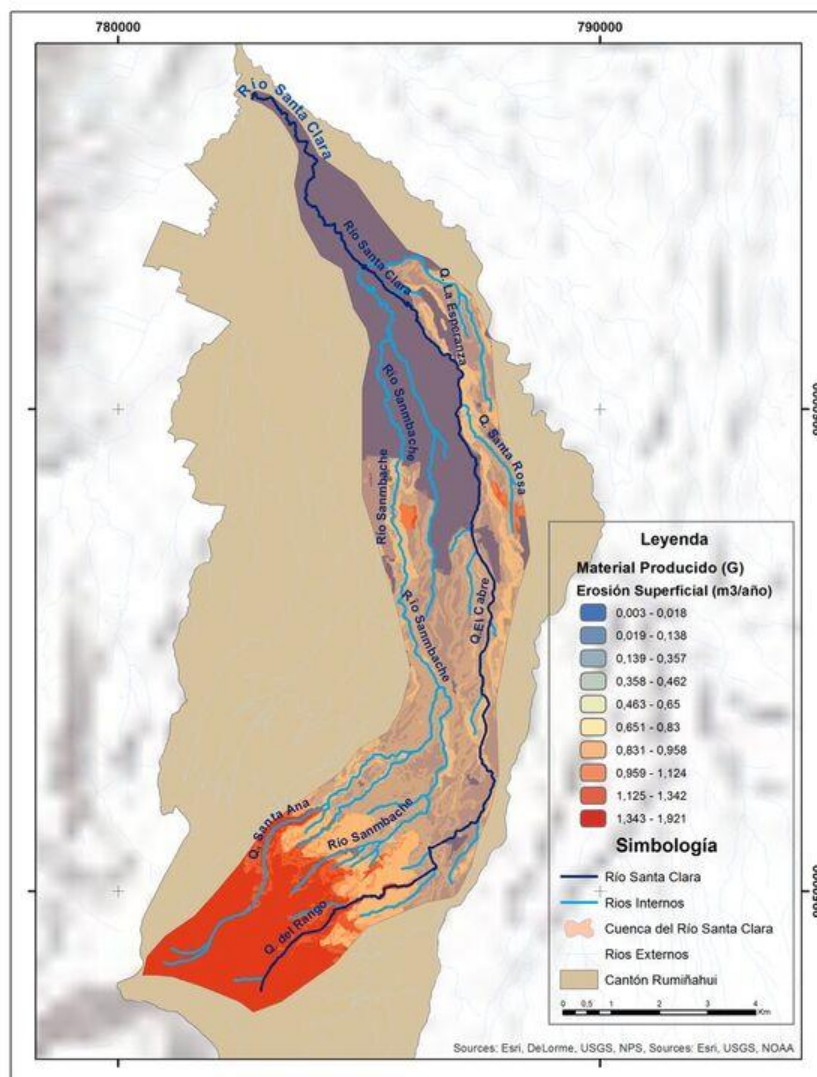


Figura 39. Volumen de sedimento producido por erosión y transportado a la sección de cierre de la cuenca del Río Santa Clara.

Sumando los valores de G_n de todas las celdas pertenecientes a la cuenca, se obtuvo el valor de G total, que representa la cantidad del

sedimento erosionado en el área de aporte que llega al punto donde desemboca el Río Santa Clara.

El total de material de sedimento producido por erosión superficial y transportado a la sección final de la cuenca del Río Santa Clara, es de 268719.89 m³/año, que dividido para el área de la cuenca representa una erosión media de 5.29 mm

CAPÍTULO 5

MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN EN HEC-RAS

5.1 MODELAMIENTO EN HEC-RAS

HEC-RAS es un software desarrollado por el Hydrologic Engineering Center (HEC) del US Army Corps of Engineer, con el que se realizará el modelamiento y simulación de caudales y arrastre de sedimentos a lo largo del Río Santa Clara.

Para realizar el modelamiento de caudales y sedimentos en el Río Santa Clara, se definen los parámetros requeridos.

5.1.1 RED DE TRIÁNGULOS IRREGULARES TIN

La red de triángulos iguales TIN (*Trianguled Irregular Network*), se realiza a través del modelo digital del terreno, que en el caso de la cuenca del Río Santa Clara fue obtenido del Gobierno del Cantón Rumiñahui en escala 1:5000, en el cual se detalla la topografía e hidrografía de toda la superficie de la cuenca. El modelo TIN se lo realizó en ARCGis 10.3 a través de su extensión 3D analyst. El modelo TIN permite obtener la geometría de las secciones transversales del Río Santa Clara.

Para el modelamiento en HEC-RAS Es necesario el trazo del cauce total del Río Santa Clara y se asignan coordenadas espaciales en X, Y, Z.

5.1.2 PENDIENTE DEL RÍO SANTA CLARA

El cálculo de la pendiente del Río Santa Clara se presentó en el capítulo 2, y presenta el siguiente resultado:

$$PENDIENTE = 0.05161$$

El perfil del Río Santa Clara se presenta en la **Figura 7**.

5.1.3 CAUDALES DE MODELAMIENTO

Los caudales con los que se realizará el modelamiento de transporte de sedimentos son los siguientes:

- Caudal Medio calculado para la cuenca del Río Santa Clara
CAUDAL 1 = 1.03 m³/s
- Caudal calculado con molinete en la sección transversal del Punto 1 (capítulo 3):
CAUDAL 2 = 1.444 m³/s
- Caudal calculado con molinete en la sección transversal del Punto 2 (capítulo 3):
CAUDAL 3 = 1.94 m³/s
- Caudal máximo para un periodo de retorno de 10 años
CAUDAL 4 = 68.9 m³/s

5.1.4 COEFICIENTE DE RUGOSIDAD DE MANNING (n)

El coeficiente de rugosidad de Manning determina la capacidad de transporte de una sección de acuerdo a la rugosidad de su superficie. Esta es una de las variables que más influyen en el comportamiento del modelo hidráulico, motivo por el cual es preciso considerar adecuadamente los valores de n para los tramos analizados.

Los valores de los coeficientes de rugosidad adoptados para el modelo en HEC-RAS del Río Santa Clara, se tomaron de los valores recomendados para cauces naturales por (Chow, 2000), que además son los que el propio HEC-RAS recomienda también en sus tablas de ayuda. De esta manera los valores para los diferentes tramos del Río Santa Clara son los siguientes:

- Para el tramo del río con cotas comprendidas entre los 33797.98 msnm y 3218 msnm, de acuerdo a (Chow, 2000):
“Cursos montañosos, cause de cantos rodados y grandes rocas”

$n = 0.07$

- Para el tramo del río con cotas comprendidas entre los 3218 msnm y 2830 msnm, de acuerdo a (Chow, 2000):

“Cursos montañosos, cause de grava, cantos rodados y algunas rocas”

$n = 0.05$

- Para el tramo del río con cotas comprendidas entre los 2830 msnm y 2440 msnm, de acuerdo a (Chow, 2000):

“Cursos en planicies, meandros con algunas piedras y pastos”

$n = 0.05$

5.1.5 TOMA DE MUESTRAS Y ENSAYO EN LABORATORIO

Para la caracterización de los sedimentos transportados en el río Santa Clara se tomaron muestras de agua en dos secciones del río, las cuales fueron ensayadas en Laboratorio Nacional de Calidad de Aguas y Sedimentos (LANCAS) del INAMHI.

Tabla 32

Coordenadas UTM de las secciones de control.

COORDENADAS UTM	ESTE	NORTE
PUNTO 1	783171,5817	9966461,9691
PUNTO 2	784783,859	9963256,6479

En cada una de las secciones de control se tomaron tres muestras para realizar el análisis de sólidos totales y sólidos suspendidos.

Las muestras de agua en la sección del Punto 1 fueron tomadas el 13 de agosto de 2016 a las 13h00. Los resultados de los análisis de las muestras, reflejan los siguientes resultados:

Tabla 33**Resultados de análisis en la sección del Punto 1.**

Parámetros	Unidades	Valor Muestra 1	Valor Muestra 2	Valor Muestra 3
Sólidos Totales	mg/L	290	282	276
Sólidos Suspendidos	mg/L	<44.7	<44.7	<44.7

Las muestras de agua en la sección del Punto 2 fueron tomadas el 13 de agosto de 2016 a las 16h15. Los resultados de los análisis de las muestras, reflejan los siguientes resultados:

Tabla 34**Resultados de análisis en la sección del Punto 2.**

Parámetros	Unidades	Valor Muestra 1	Valor Muestra 2	Valor Muestra 3
Sólidos Totales	mg/L	228	210	250
Sólidos Suspendidos	mg/L	<44.7	<44.7	<44.7

De acuerdo a los resultados se puede evidenciar que las muestras de agua tomadas en la sección del Punto 1, que se encuentra aguas abajo en relación a la sección del Punto 2, presenta valores mayores de sólidos totales. El valor de sólidos suspendidos en todas las muestras son menores a 44.7 mg/L.

Además se tomó una muestra de sedimentos de fondo en el lecho del río en el Punto 1 con un peso de 1013,76 gramos, a la cual se le realizó un ensayo de granulometría que presenta los siguientes resultados:

Tabla 35

Cálculo de porcentajes granulometría de sedimentos

TAMIZ N°	ABERTURA TAMIZ (mm)	PESO RETENIDO (gr.)	PESO RETENIDO ACUMULADO (gr.)	PORCENTAJE RETENIDO (%)	PORCENTAJE PASA (%)
3/4"	19	5.69	5.69	0.56	99.44
3/8"	9.5	7	12.69	0.69	98.75
4	4.75	9.67	22.36	0.95	97.8
10	2	20.64	43	2.04	95.76
18	1	38.81	81.81	3.83	91.93
35	0.5	145.12	226.93	14.32	77.62
40	0.43	61.13	288.06	6.03	71.59
60	0.25	297.93	585.99	29.39	42.2
100	0.15	213.44	799.43	21.05	21.14
200	0.08	146.78	946.21	14.48	6.66
Pan		67.55	1013.76	6.66	0

La curva granulométrica correspondiente a la muestra de sedimentos de fondo es la siguiente:

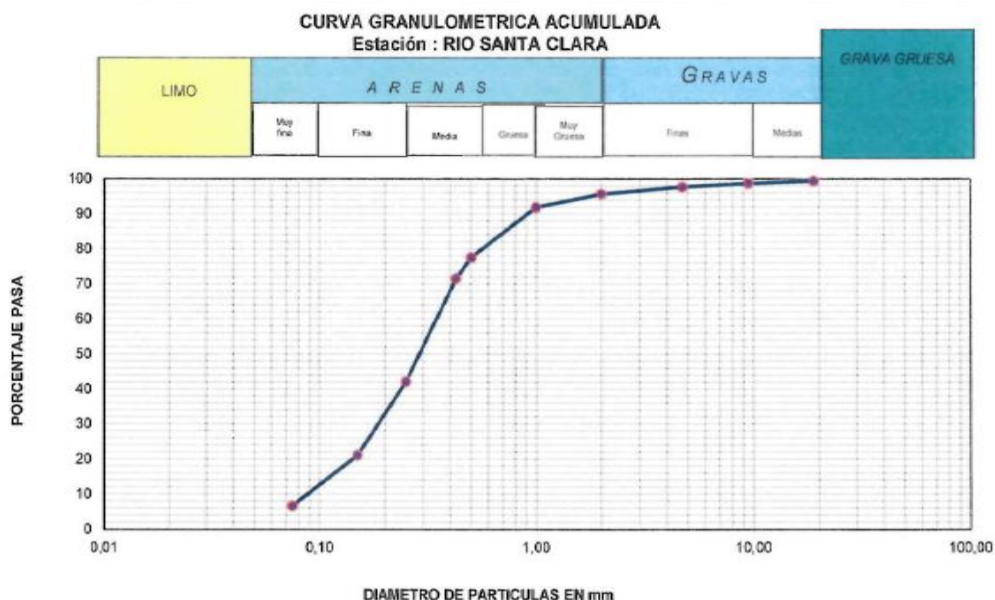


Figura 40. Curva Granulométrica de la muestra de sedimentos de fondo.

5.2 DESARROLLO DEL MODELO

Una vez caracterizados todos los parámetros necesarios, se procede con la creación del modelo en HEC RAS

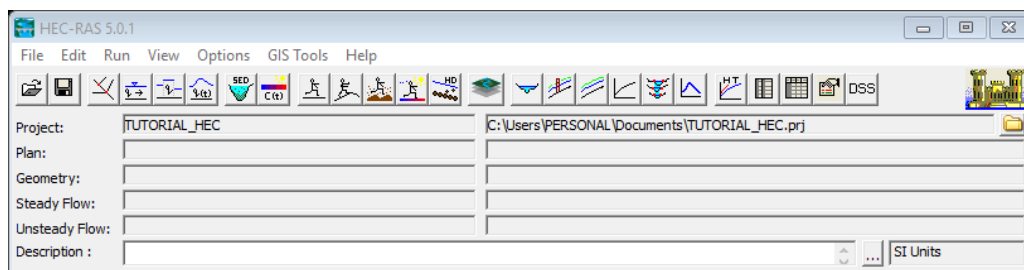


Figura 41. Ventana Principal de HEC-RAS 5.0.1

Se procede a definir el sistema métrico con el que se realizará el modelo

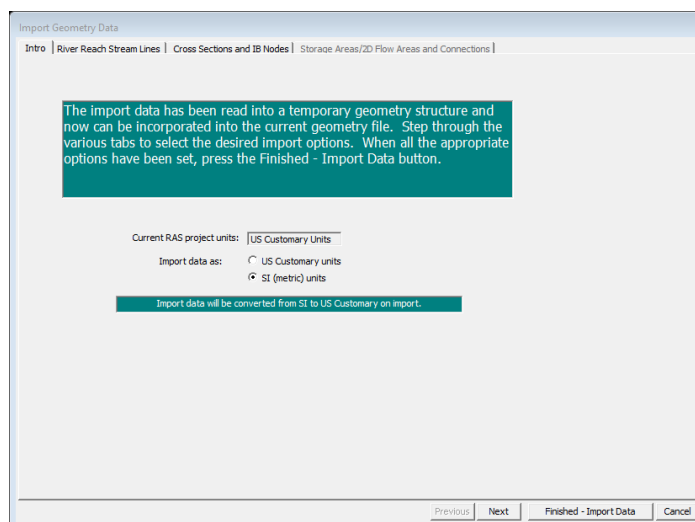


Figura 42. Definición de sistema métrico en HEC-RAS

5.2.1 DETERMINACIÓN DE SECCIONES TRANSVERSALES

Las secciones transversales se las realiza cada 100 metros dando un total de 327 secciones transversales de los cuales dos fueron calculados manualmente.

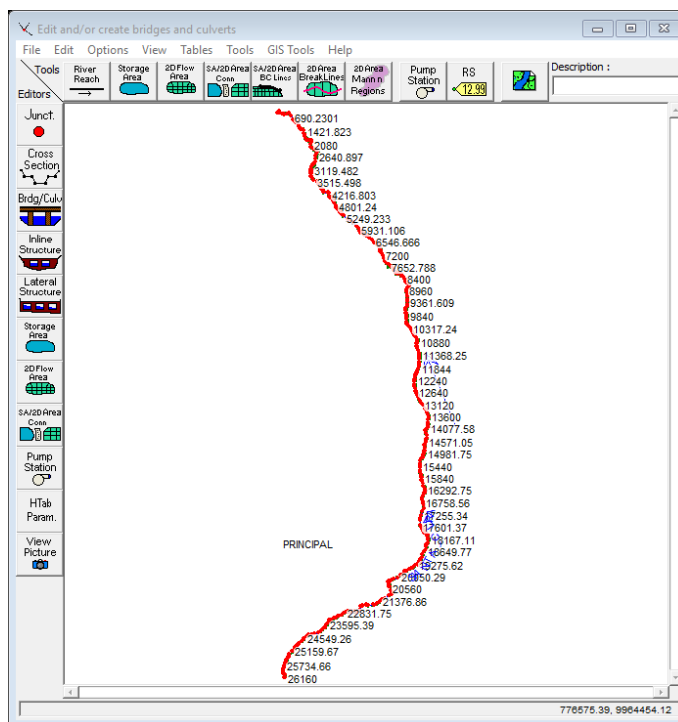


Figura 43. Geometría del río Santa Clara en HEC-RAS

Se coloca el coeficiente de Manning y los datos correspondientes a los valores obtenidos de la caracterización de sedimentos.

Edit Manning's n or k Values

River: (All Rivers) Edit Interpolated XS's Channel n Values have a light green background

Reach: All Regions

Selected Area Edit Options

Add Constant ... Multiply Factor ... Set Values ... Replace ... Reduce to L Ch R ...

	River	Reach	River Station	Frctn (n/k)	n #1	n #2	n #3
124	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	16355.99	n	0.07	0.07	0.07
125	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	16292.75	n	0.07	0.07	0.07
126	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	16216.34	n	0.07	0.07	0.07
127	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	16164.05	n	0.07	0.07	0.07
128	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	16066.99	n	0.07	0.07	0.07
129	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15966.17	n	0.07	0.07	0.07
130	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15840	n	0.07	0.07	0.07
131	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15774.75	n	0.07	0.07	0.07
132	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15674.99	n	0.05	0.05	0.05
133	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15600	n	0.05	0.05	0.05
134	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15520	n	0.05	0.05	0.05
135	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15440	n	0.05	0.05	0.05
136	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15360	n	0.05	0.05	0.05
137	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15291.46	n	0.05	0.05	0.05
138	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15200	n	0.05	0.05	0.05
139	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15127.14	n	0.05	0.05	0.05
140	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	15052.02	n	0.05	0.05	0.05
141	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14981.75	n	0.05	0.05	0.05
142	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14880	n	0.05	0.05	0.05
143	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14800	n	0.05	0.05	0.05
144	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14700.85	n	0.05	0.05	0.05
145	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14640	n	0.05	0.05	0.05
146	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14571.05	n	0.05	0.05	0.05
147	SANTA_CLAF	PRINCIPAL	14497.98	n	0.05	0.05	0.05

OK Cancel Help

Figura 44. Asignación de parámetros en HEC-RAS

Una vez definidos todos los parámetros solicitados por el programa se realiza la modelación en HEC-RAS.

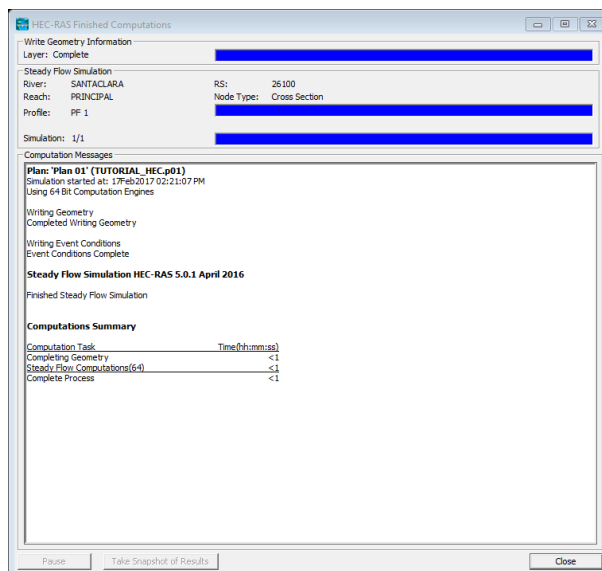


Figura 45. Modelación en HEC-RAS

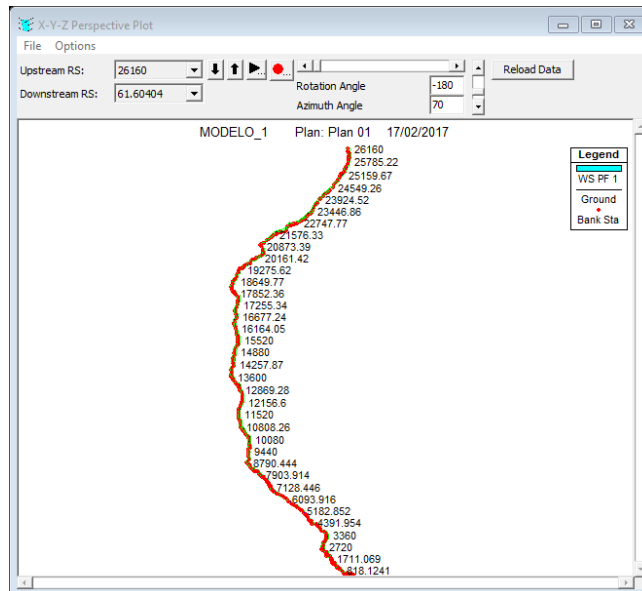


Figura 46. Modelación del Río Santa Clara en HEC-RAS

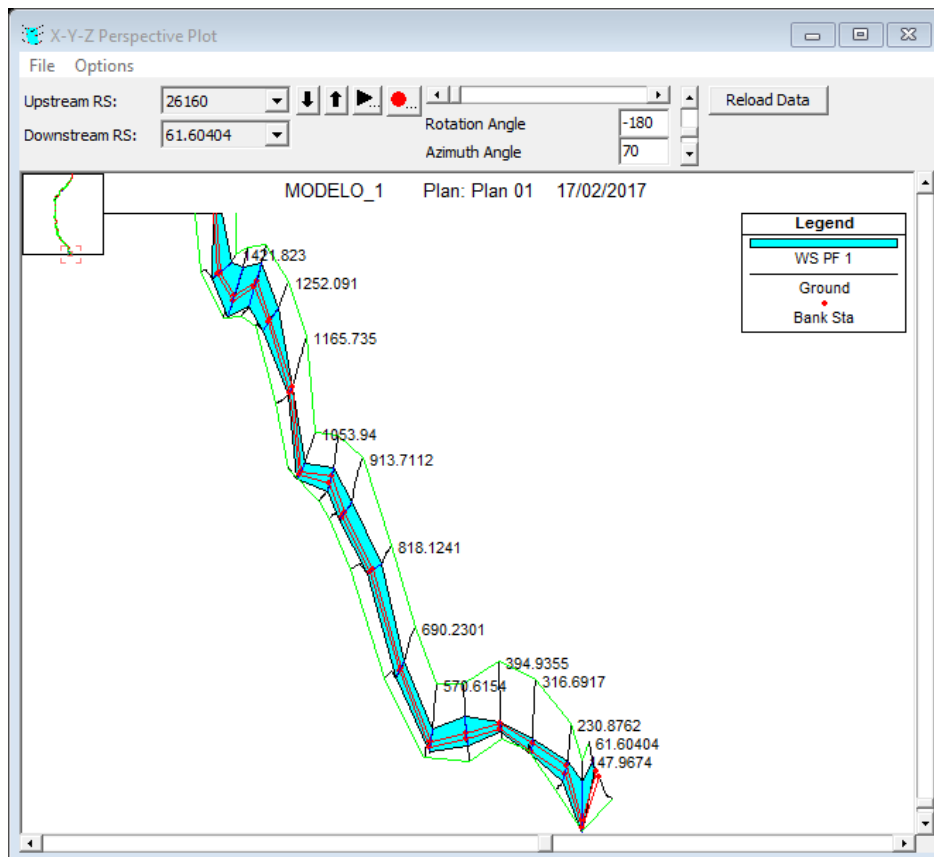


Figura 47. Visualización de coordenadas X, Y, Z del Río Santa Clara

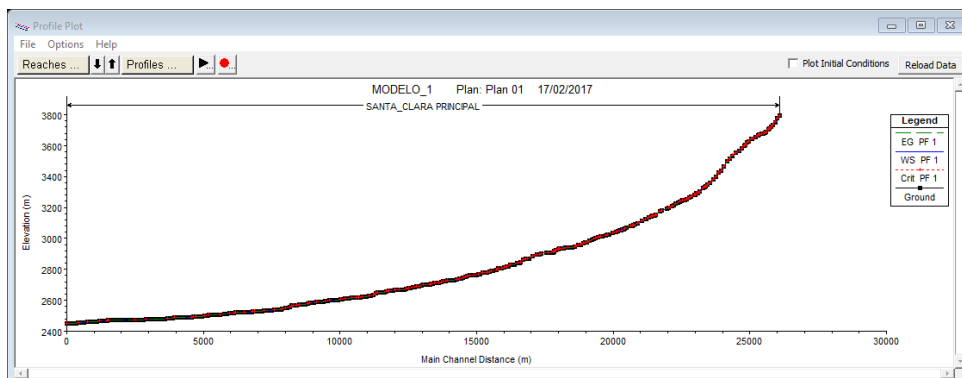


Figura 48. Perfil longitudinal del río Santa Clara en HEC-RAS

A continuación se presenta varios cortes de las secciones transversales HEC RAS, modeladas con el caudal medio calculado para la cuenca del Río Santa Clara $Q_0 = 1.03\text{m}^3/\text{s}$

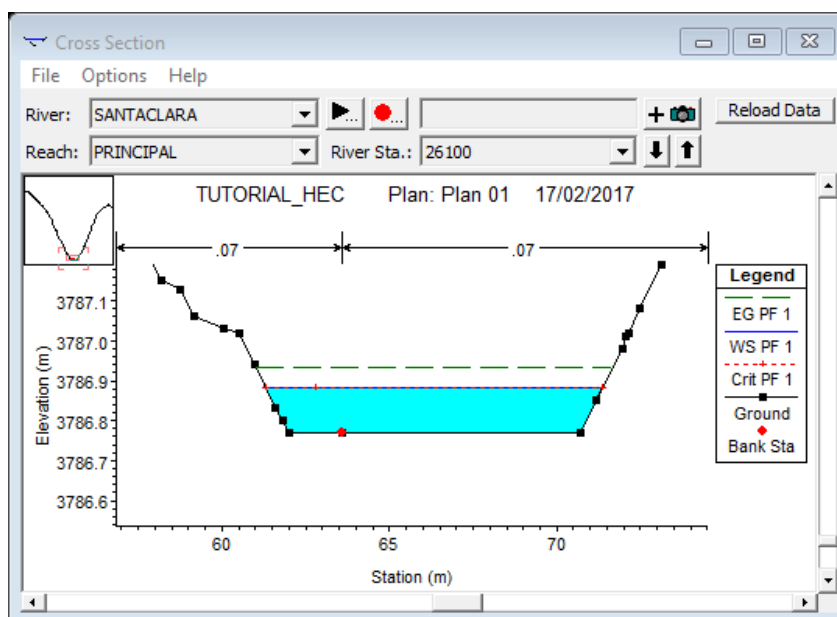


Figura 49. Sección transversal en la abscisa 26100 del Río Santa Clara

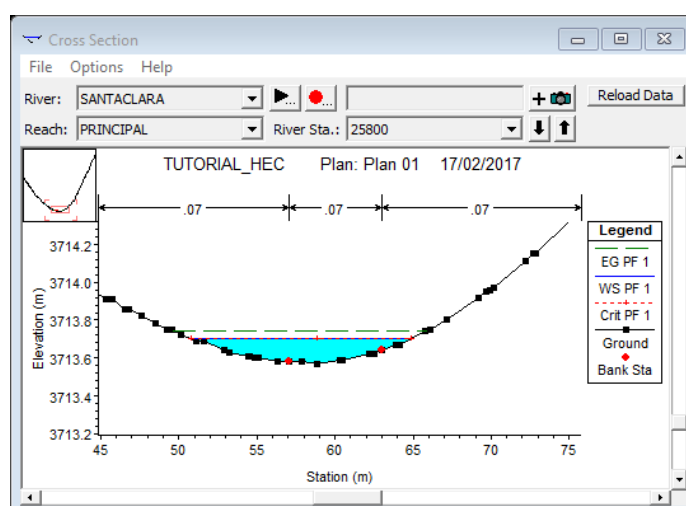


Figura 50. Sección transversal en la abscisa 25800 del Río Santa Clara

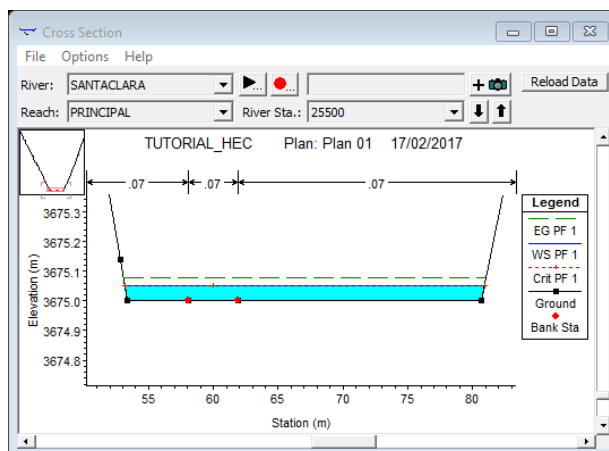


Figura 51. Sección transversal en la abscisa 25500 del Río Santa Clara

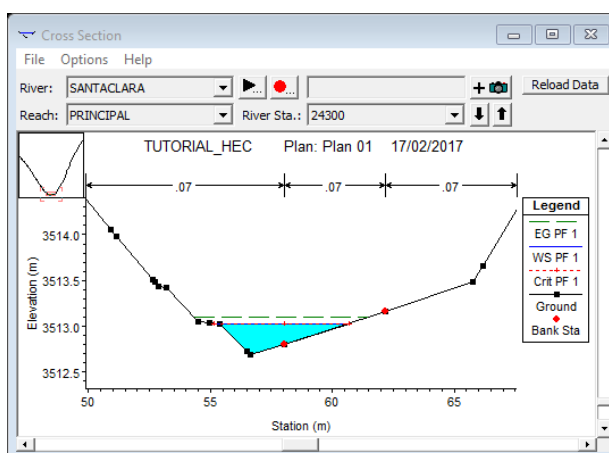


Figura 52. Sección transversal en la abscisa 24300 del Río Santa Clara

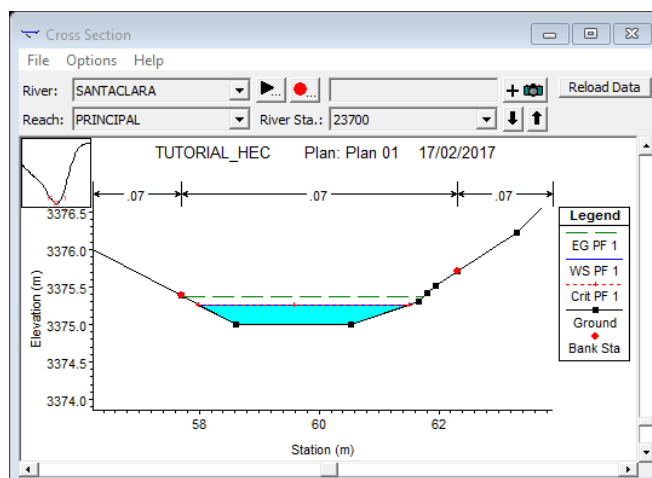


Figura 53. Sección transversal en la abscisa 23700 del Río Santa Clara

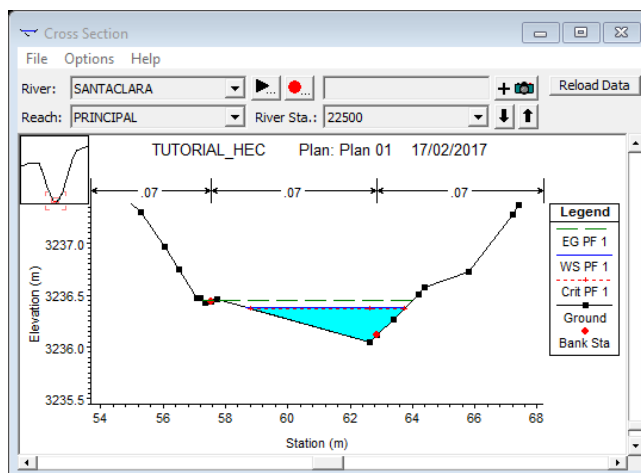


Figura 54. Sección transversal en la abscisa 22500 del Río Santa Clara

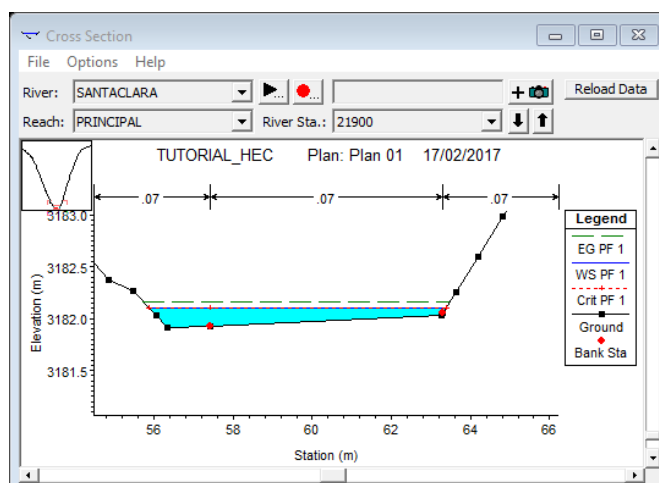


Figura 55. Sección transversal en la abscisa 21900 del Río Santa Clara

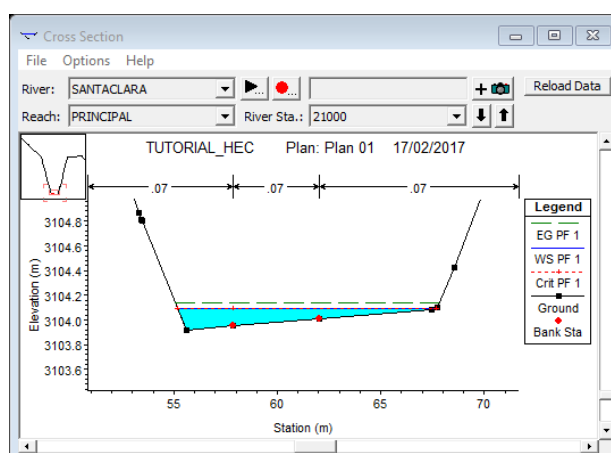


Figura 56. Sección transversal en la abscisa 21000 del Río Santa Clara

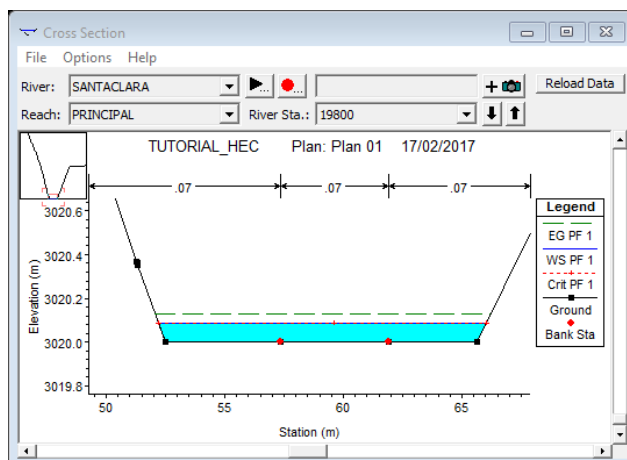


Figura 57. Sección transversal en la abscisa 19800 del Río Santa Clara

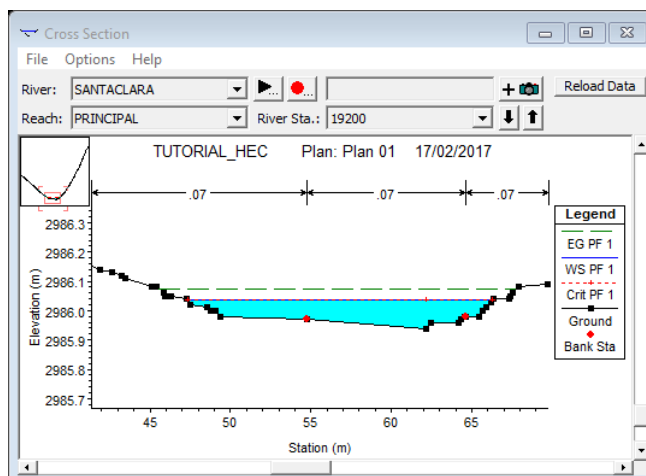


Figura 58. Sección transversal en la abscisa 19200 del Río Santa Clara

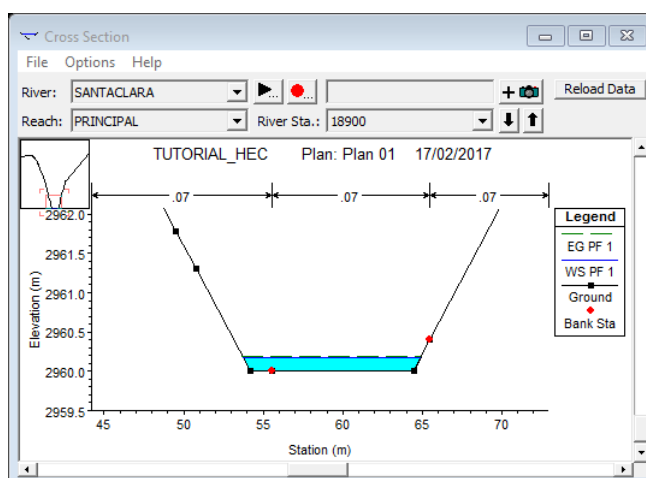


Figura 59. Sección transversal en la abscisa 18900 del Río Santa Clara

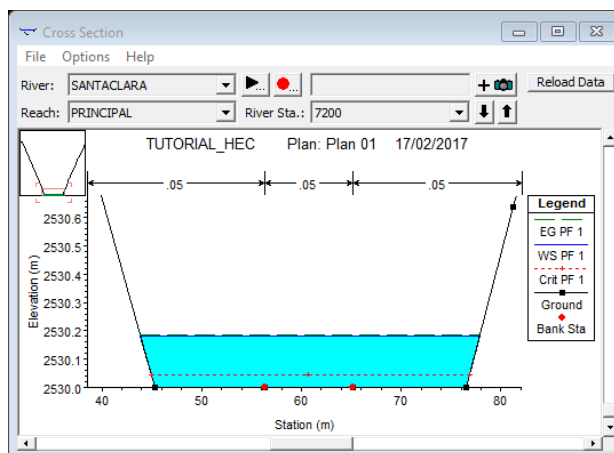


Figura 60. Sección transversal en la abscisa 7200 del Río Santa Clara

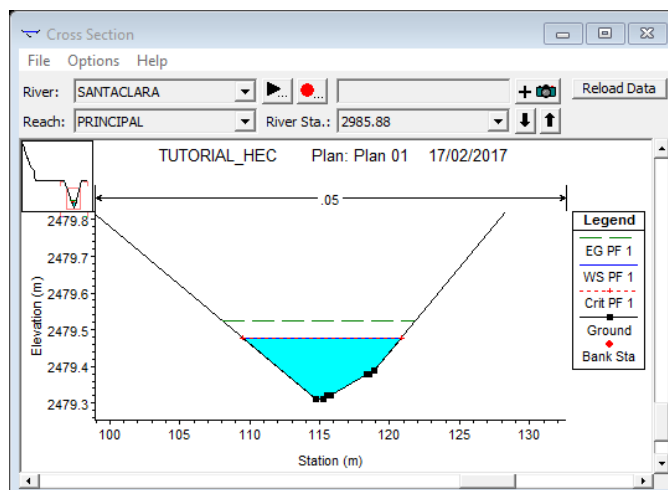


Figura 61. Sección transversal en la abscisa 2985.88 del Río Santa Clara

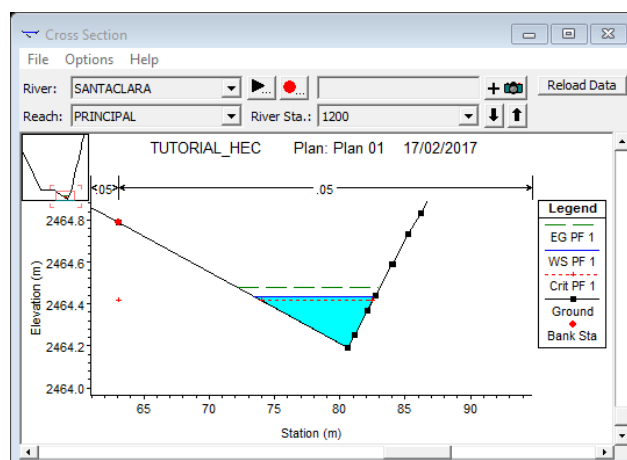


Figura 62. Sección transversal en la abscisa 1200 del Río Santa Clara

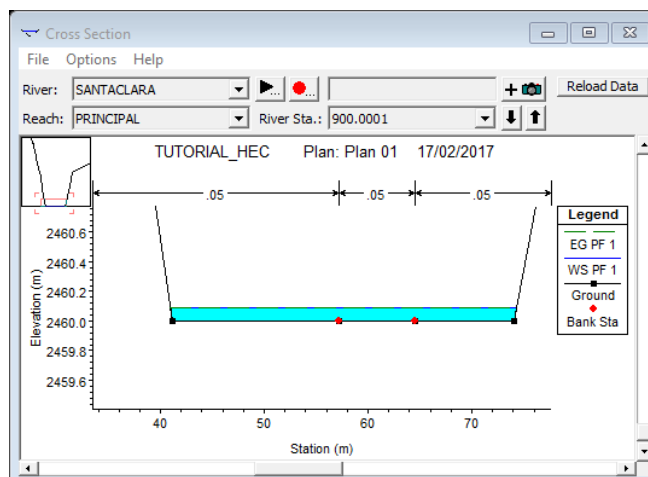


Figura 63. Sección transversal en la abscisa 900 del Río Santa Clara

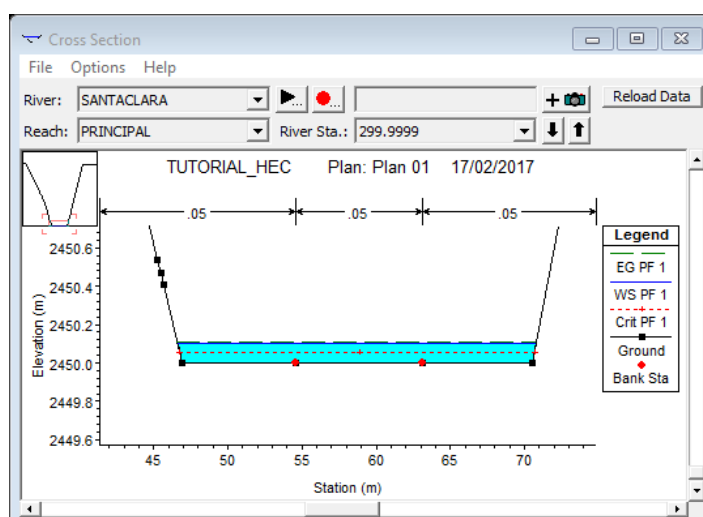


Figura 64. Sección transversal en la abscisa 300 del Río Santa Clara

5.3 SIMULACIÓN EN HEC RAS

La simulación de caudales y sedimentos para el Río Santa Clara se realizó en el tramo con mayor densidad poblacional que atraviesa el cauce del río, definido por las coordenadas UTM 17S (784783.859; 9963256.6) m, como punto aguas arriba y (783171.581; 9966461.9) m, para aguas abajo. La distancia total del tramo del río es de 4.4676 Km. Ver Figura 65.



Figura 65. Mapa de ubicación de tramo de la simulación.

5.3.1 DESARROLLO DE LA SIMULACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS EN HEC-RAS

Para realizar la simulación de caudales y sedimentos en el tramo seleccionado se genera el modelo digital del terreno DEM en HEC-RAS.

Se delimita la malla de trabajo y se establece las condiciones de borde aguas arriba y aguas abajo.

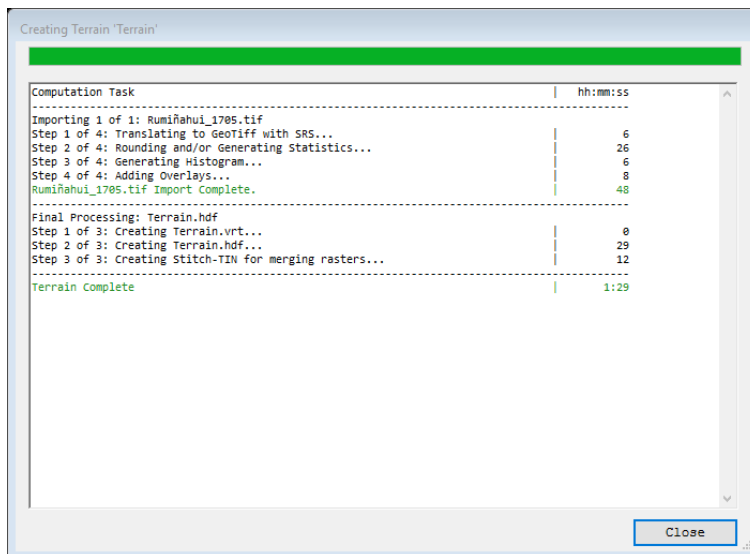


Figura 66. Generación del DEM en HEC-RAS.

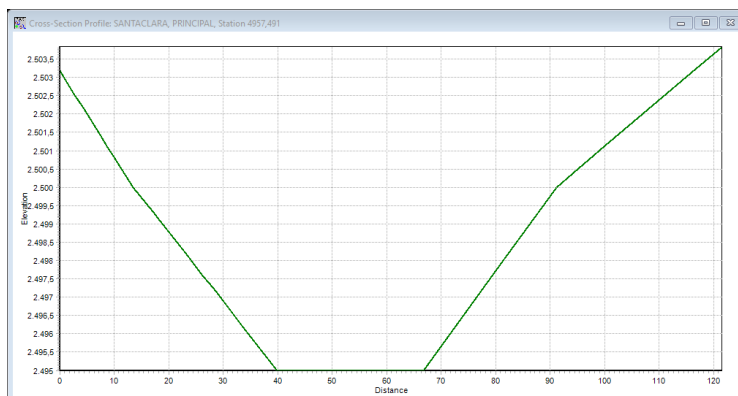


Figura 67. Perfil de corte transversal aguas arriba

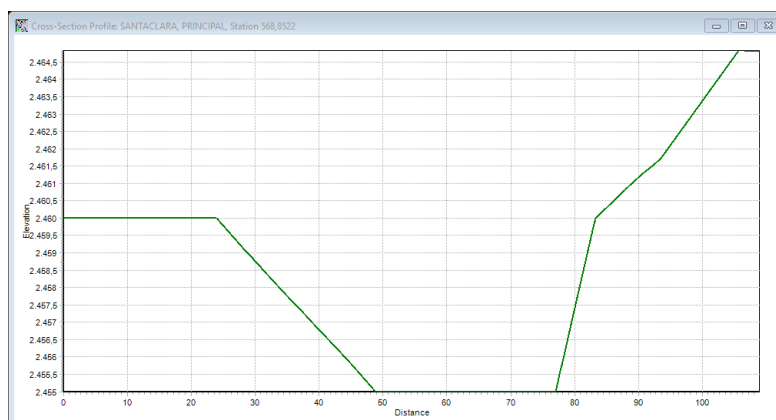


Figura 68. Perfil de corte transversal aguas abajo

Se realiza la grilla con la que se realizará la simulación en el tramo seleccionado.

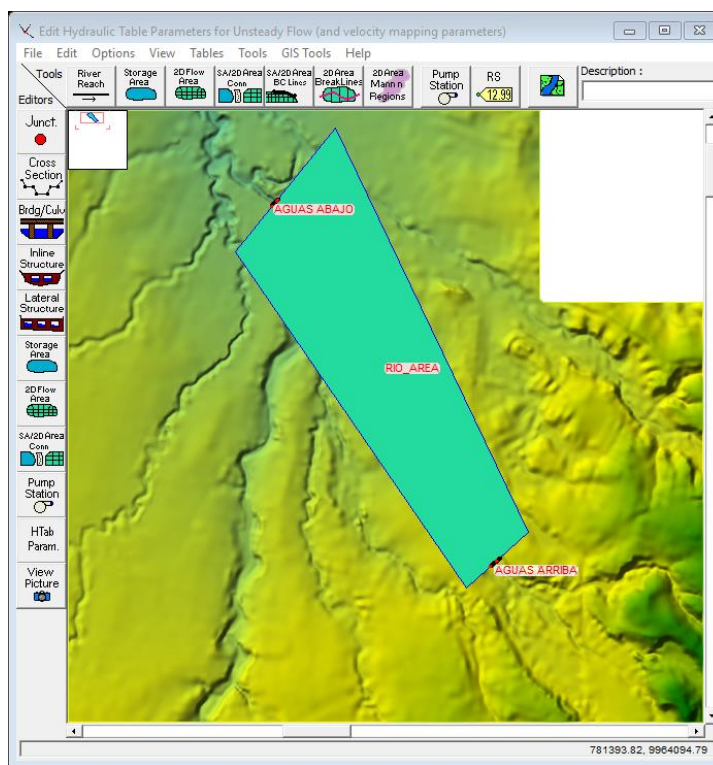


Figura 69. Generación de la grilla para la simulación

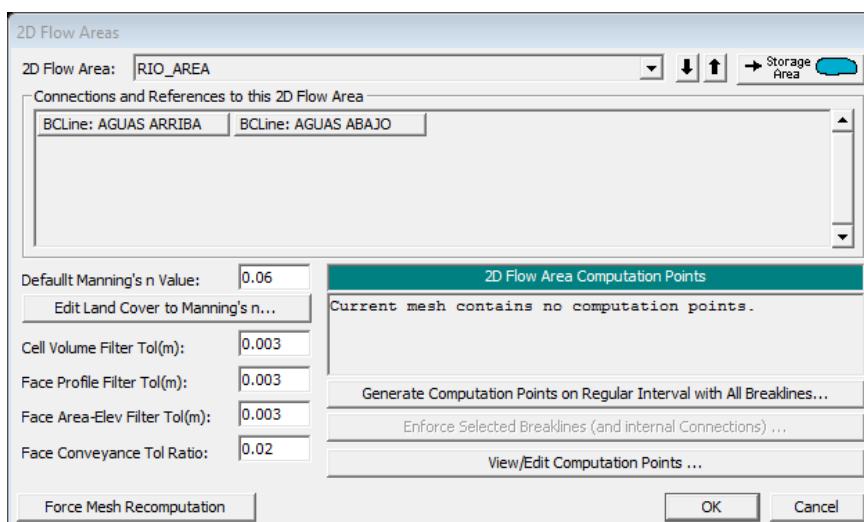


Figura 70. Asignación de parámetros en el área de simulación

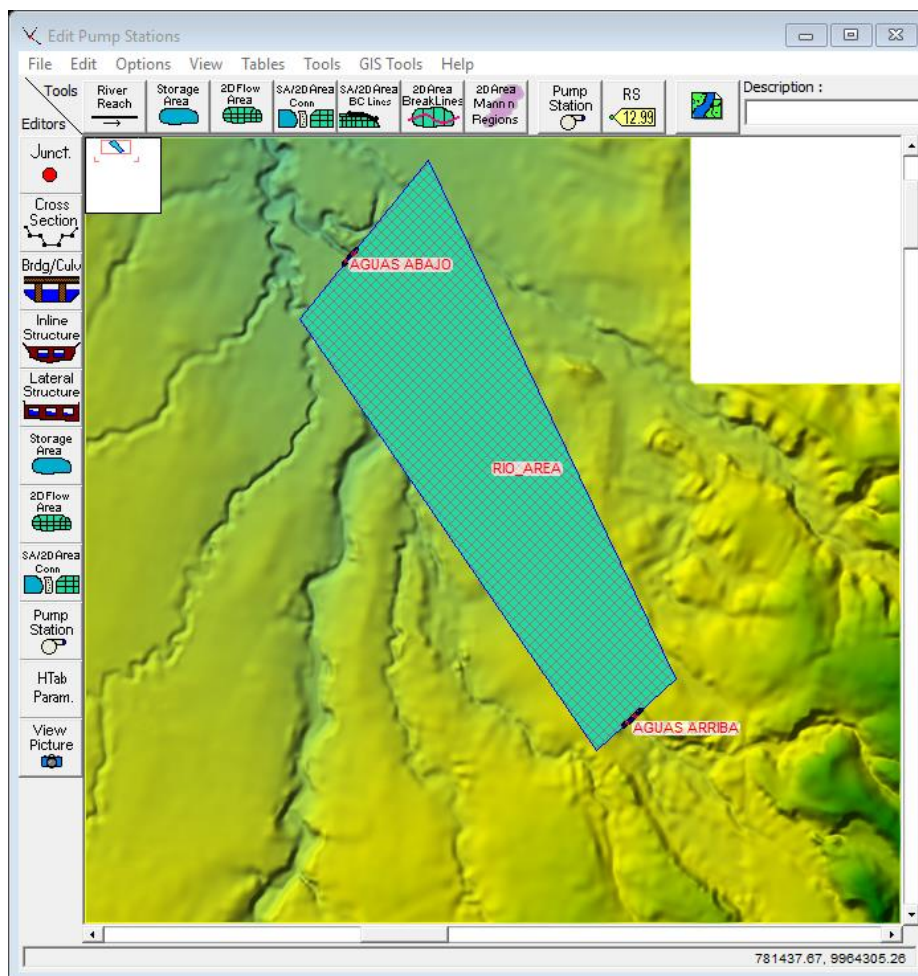


Figura 71. Generación de la grilla para la simulación

Es necesario definir las condiciones de la simulación (borde y valor de la pendiente para el tramo del río seleccionado)

5.3.2 CALCULO DE LA PENDIENTE

Se realiza el cálculo de la pendiente del tramo del río Santa Clara en el que se realizará la simulación

$$COTA\ MAXIMA = 2495.8\ m$$

$$COTA\ MINIMA = 2450.9\ m$$

$$LONGITUD\ DEL\ RIO = 4467.6\ m$$

$$PENDIENTE = \frac{COTA\ MAXIMA - COTA\ MINIMA}{LONGITUD\ DEL\ RIO}$$

$$PENDIENTE = 0.01005$$

Flow Hydrograph

SA: RIO AREA BCLine: AGUAS ARRIBA

Read from DSS before simulation Select DSS file and Path

File:

Path:

Enter Table Data time interval: 1 Hour

Select/Enter the Data's Starting Time Reference

Use Simulation Time: Date: Time:

Fixed Start Time: Date: 01SEP2008 Time: 01:00

No. Ordinates Interpolate Missing Values Del Row Ins Row

Hydrograph Data			
	Date	Simulation Time (hours)	Flow (m3/s)
88	04Sept2008 1600	87:00	1.97
89	04Sept2008 1700	88:00	1.93
90	04Sept2008 1800	89:00	1.88
91	04Sept2008 1900	90:00	1.84
92	04Sept2008 2000	91:00	1.79
93	04Sept2008 2100	92:00	1.75
94	04Sept2008 2200	93:00	1.71
95	04Sept2008 2300	94:00	1.66
96	04Sept2008 2400	95:00	1.62
97	05Sept2008 0100	96:00	1.57
98	05Sept2008 0200	97:00	1.53
99	05Sept2008 0300	98:00	1.48
100	05Sept2008 0400	99:00	1.44

Time Step Adjustment Options ("Critical" boundary conditions)

Monitor this hydrograph for adjustments to computational time step

Max Change in Flow (without changing time step):

Min Flow: Multiplier: EG Slope for distributing flow along BC Line:

Plot Data OK Cancel

Figura 72. Asignación de parámetros en el área de simulación

Una vez asignados todos los parámetros en el tramo del río, se ejecuta la simulación en HEC-RAS.

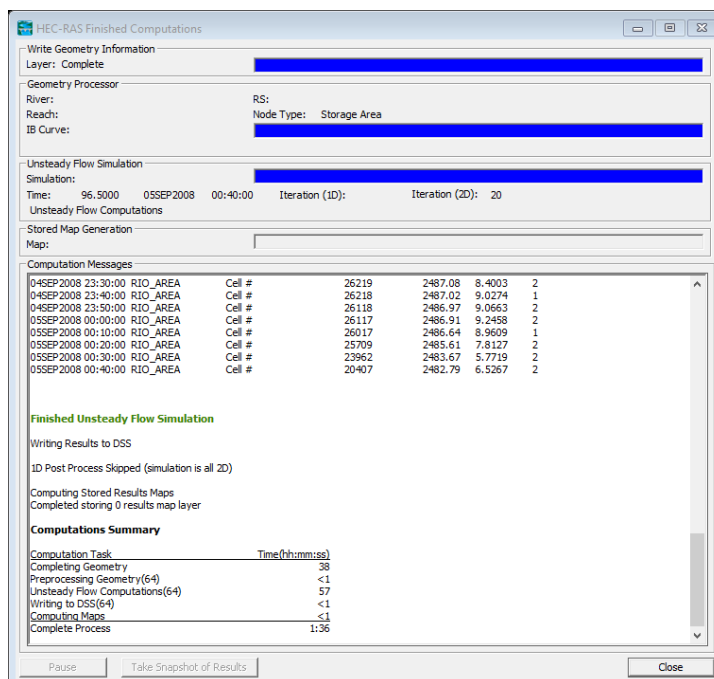


Figura 73. Ejecución de la simulación en HEC-RAS

A continuación se presentan las figuras resultantes de la simulación de sedimentos con los diferentes caudales:

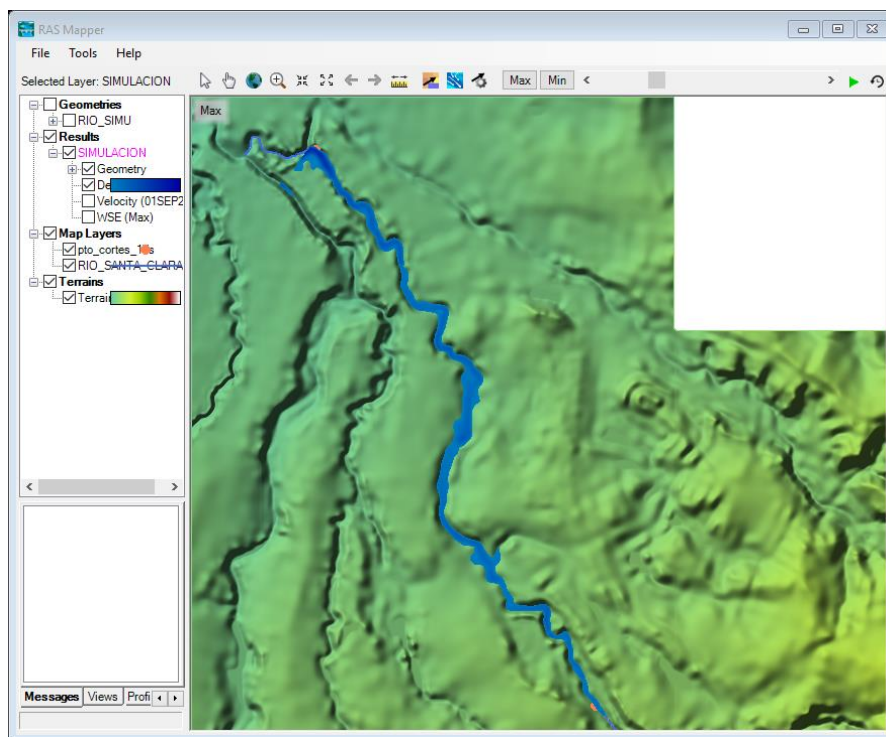
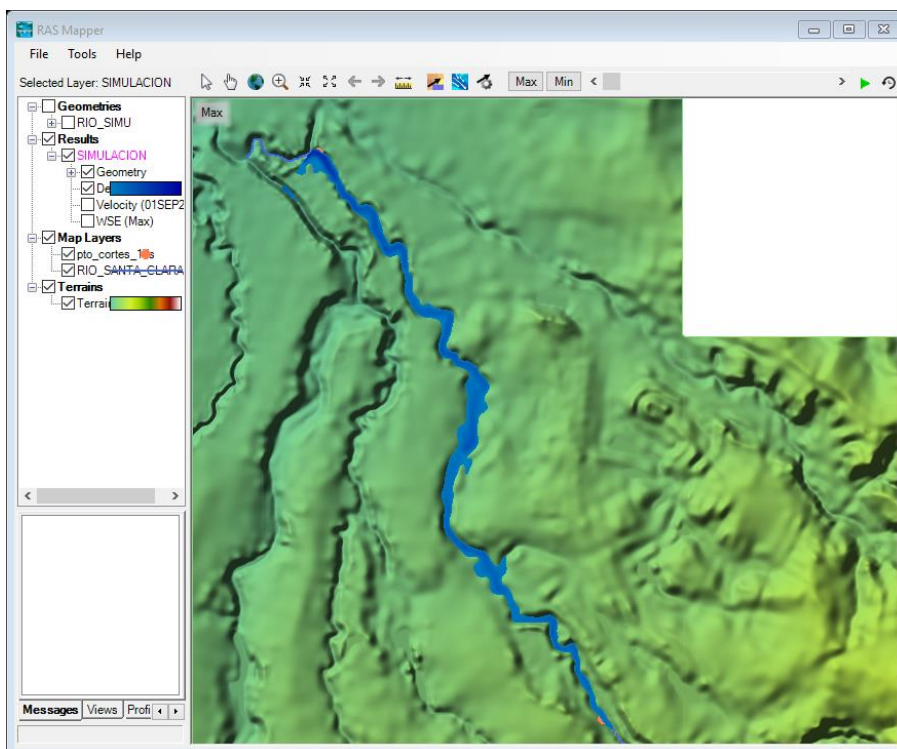
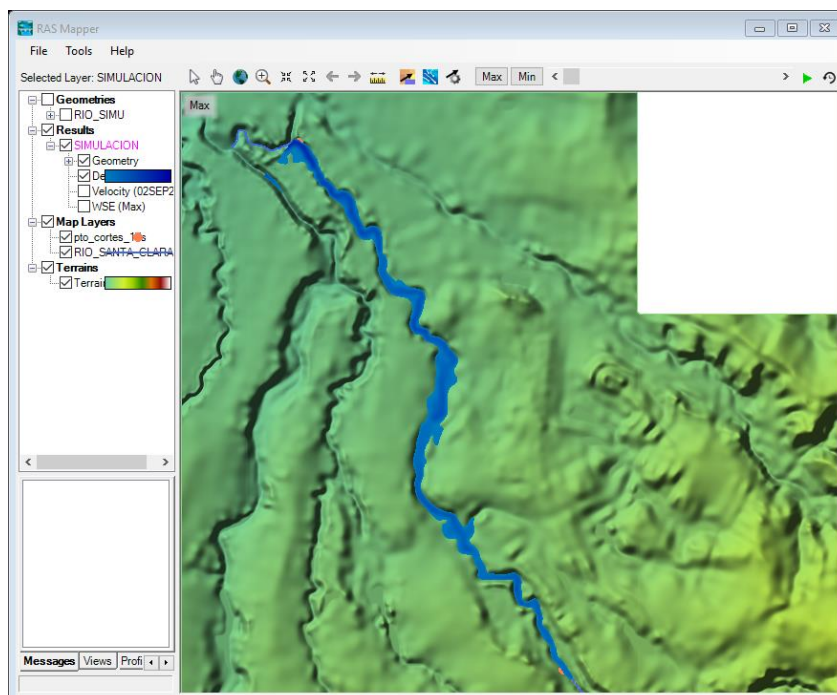


Figura 74. Simulación con CAUDAL 1.03 m³/s

Figura 75. Simulación con CAUDAL 1.44 m³/sFigura 76. Simulación con CAUDAL 1.94 m³/s

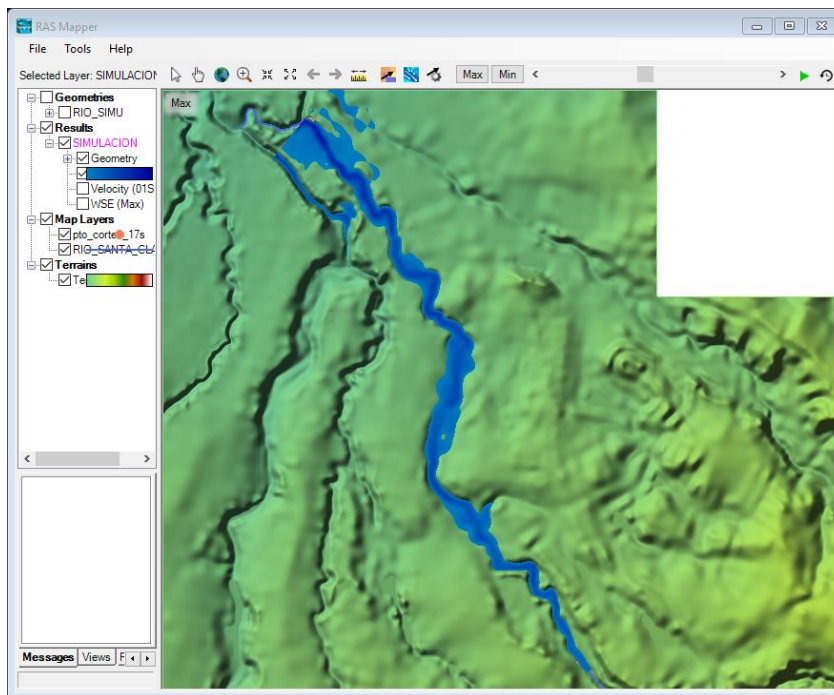


Figura 77. Simulación con CAUDAL 68.9 m³/s

Se presenta además cortes transversales en cuatro secciones del río Santa Clara con la simulación de los cuatro caudales en análisis.

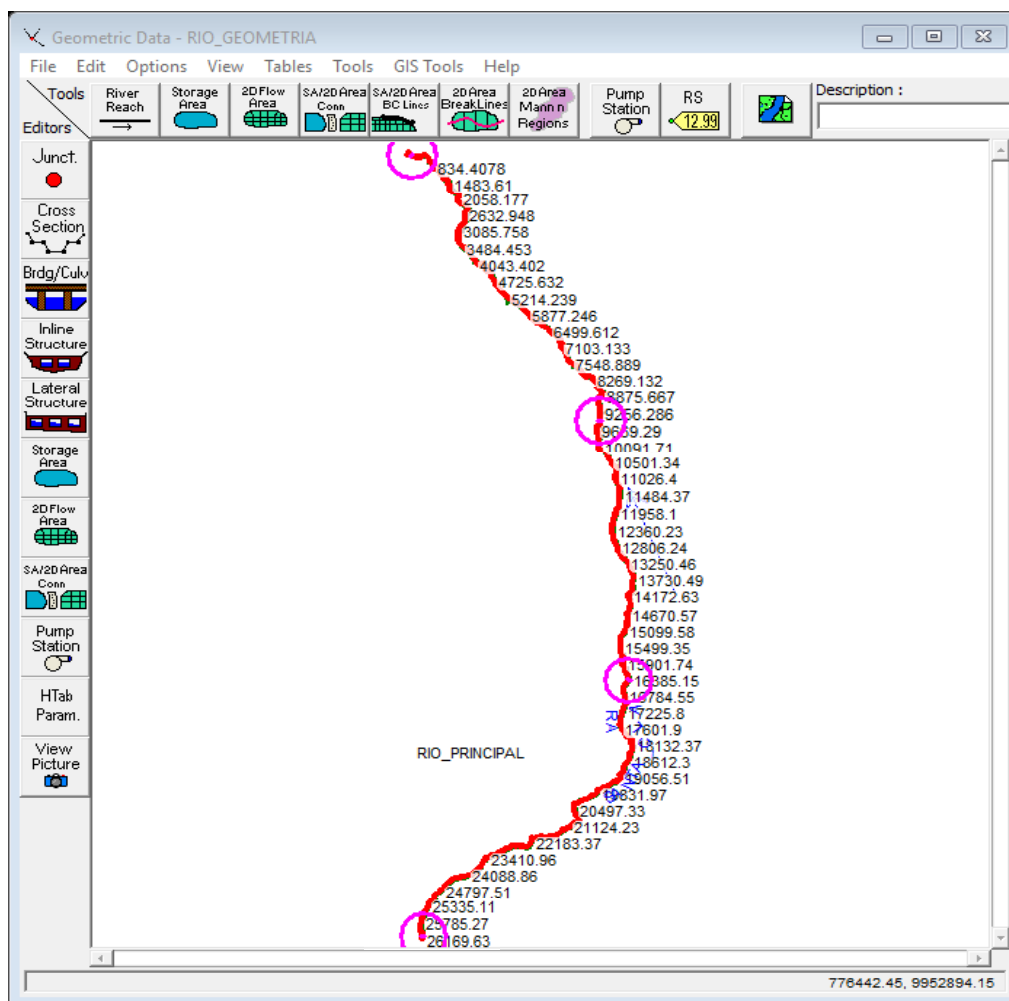


Figura 78. Ubicación de las secciones en el Río Santa Clara

5.3.3 CORTES TRANSVERSALES AGUAS ARRIBA A 26169.63m DE DISTANCIA

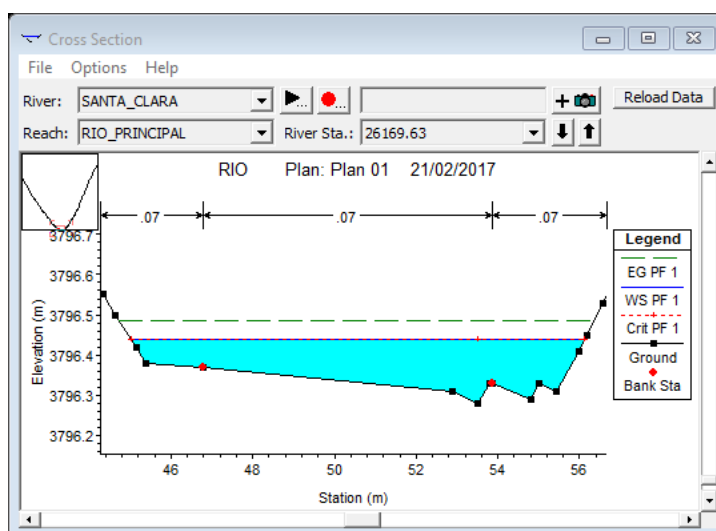


Figura 79. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m³/s

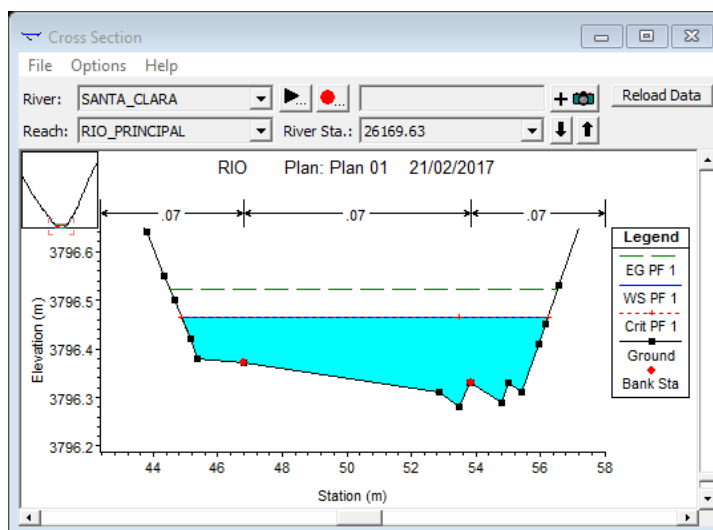


Figura 80. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m³/s

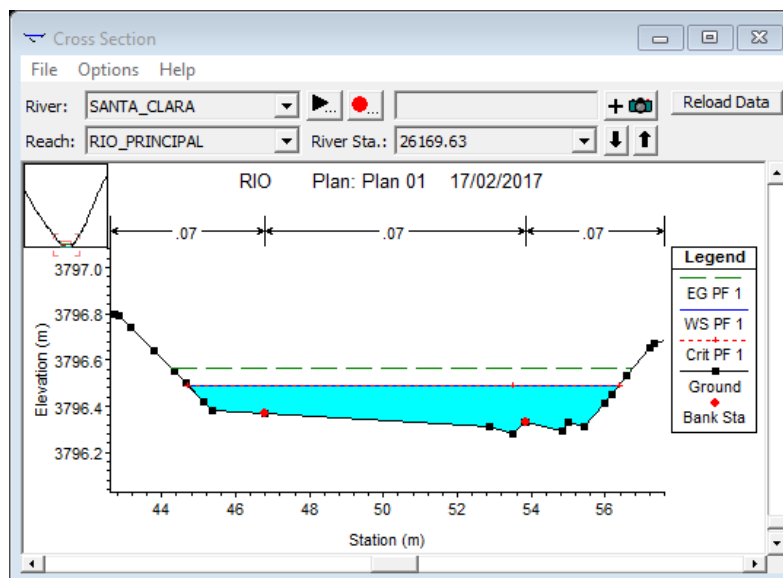


Figura 81. Sección transversal con simulación de CAUDAL $1.94 \text{ m}^3/\text{s}$

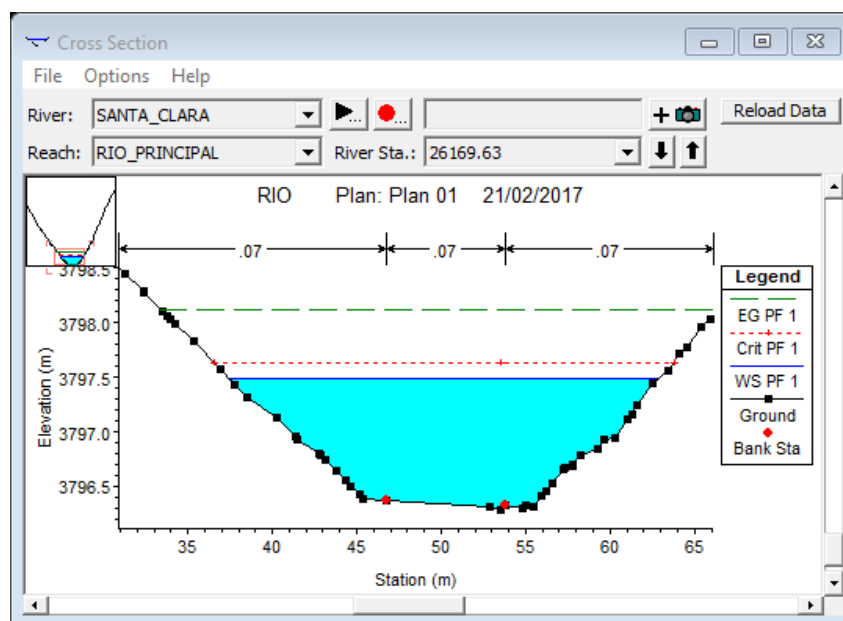


Figura 82. Sección transversal con simulación de CAUDAL $68.9 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.4 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ARRIBA A 16385.15 m DE DISTANCIA

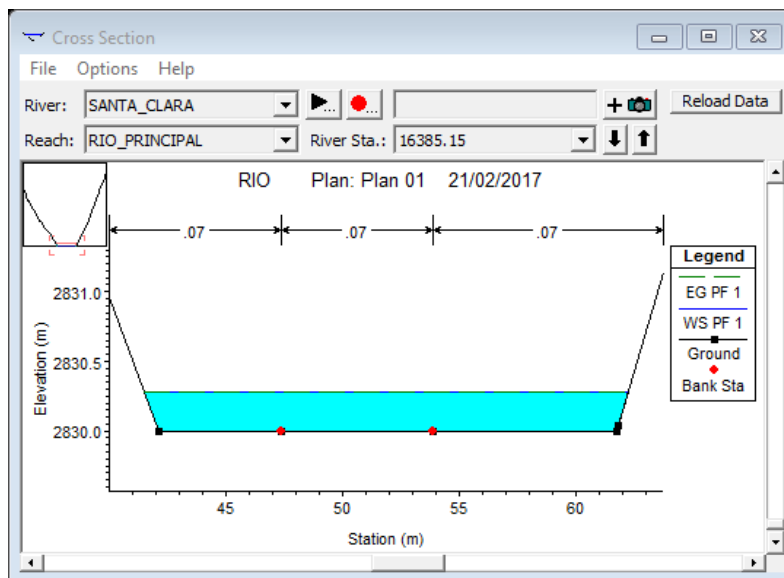


Figura 83. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m³/s

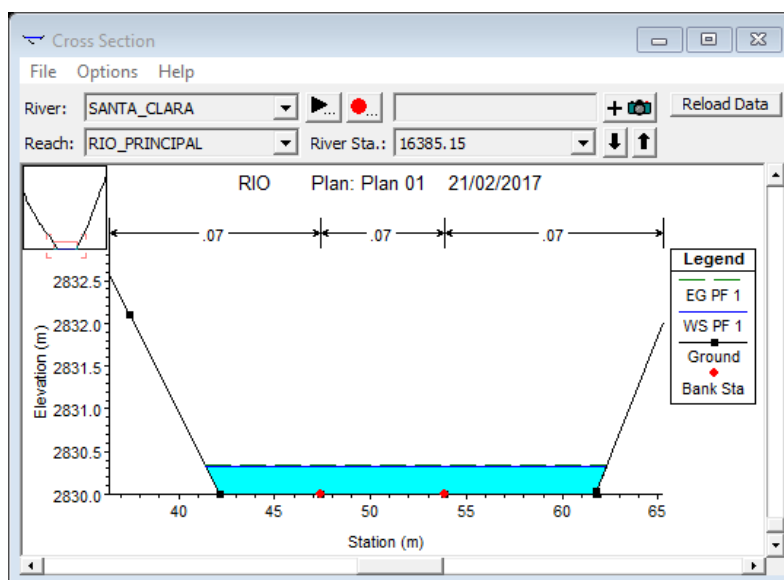


Figura 84. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m³/s

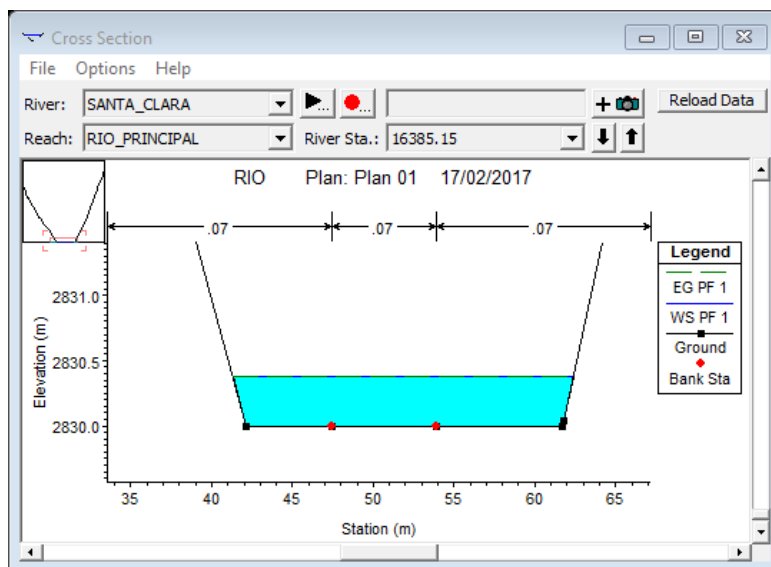


Figura 85. Sección transversal con simulación de CAUDAL $1.94 \text{ m}^3/\text{s}$

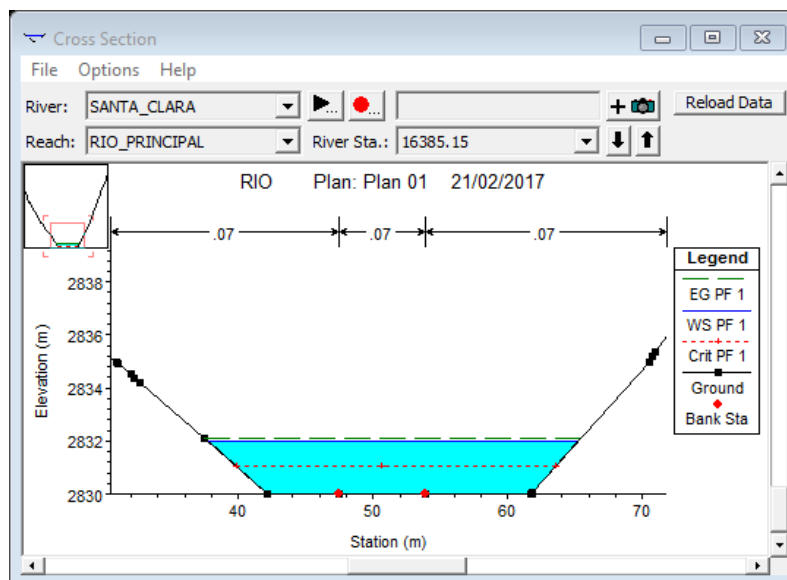


Figura 86. Sección transversal con simulación de CAUDAL $68.9 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.5 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ABAJO A 9354.10 m DE DISTANCIA

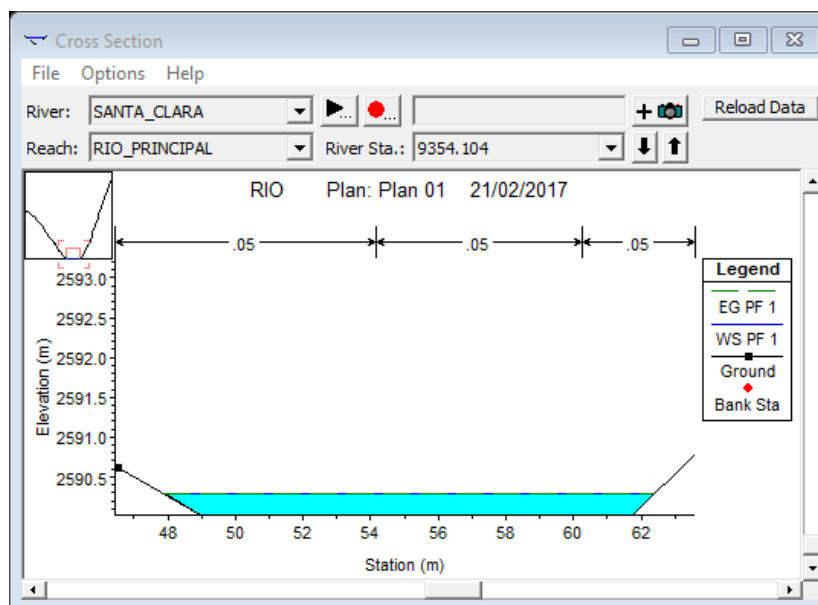


Figura 87. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m³/s

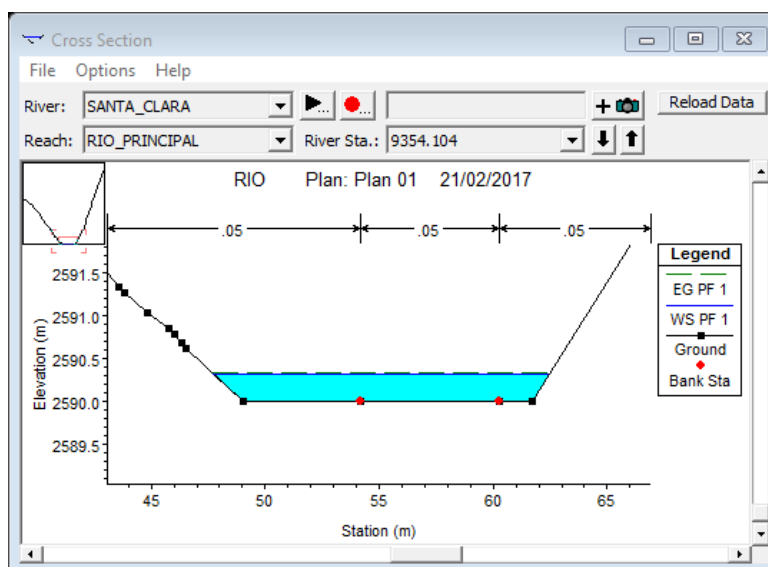


Figura 88. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m³/s

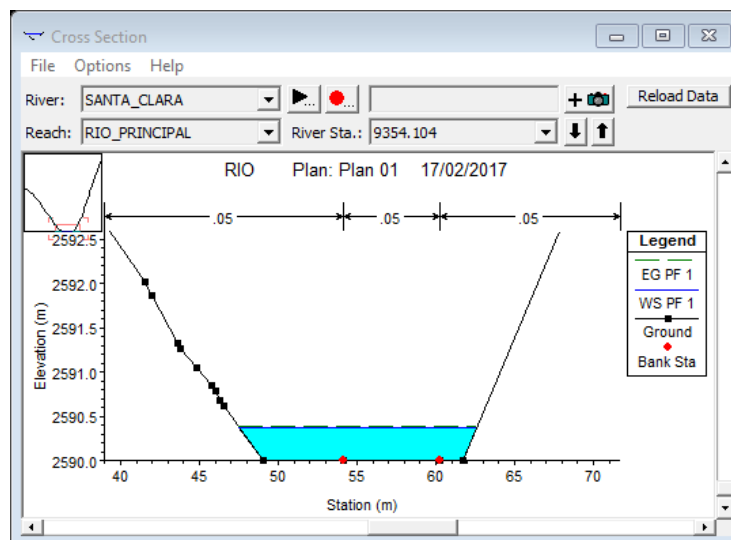


Figura 89. Sección transversal con simulación de CAUDAL $1.94 \text{ m}^3/\text{s}$

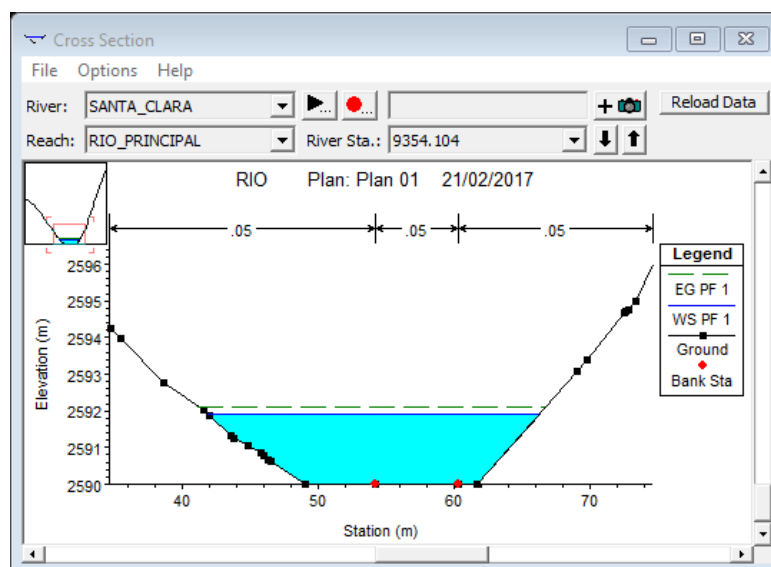


Figura 90. Sección transversal con simulación de CAUDAL $68.9 \text{ m}^3/\text{s}$

5.3.6 CORTE TRANSVERSAL AGUAS ABAJO A 280.31 m DE DISTANCIA

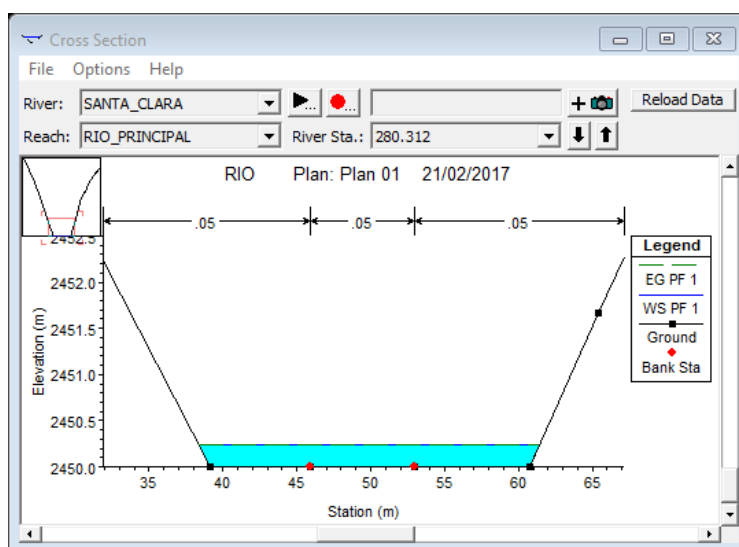


Figura 91. Sección transversal con simulación de CAUDAL=1.03 m³/s

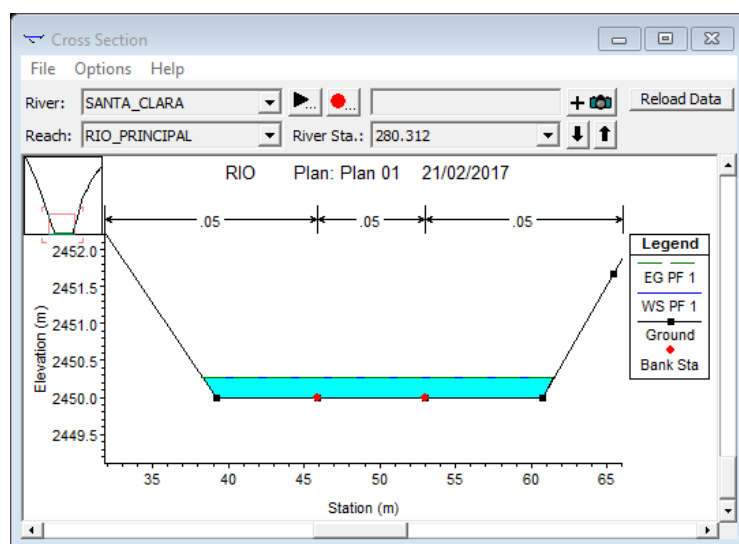


Figura 92. Sección transversal con simulación de CAUDAL 1.44 m³/s

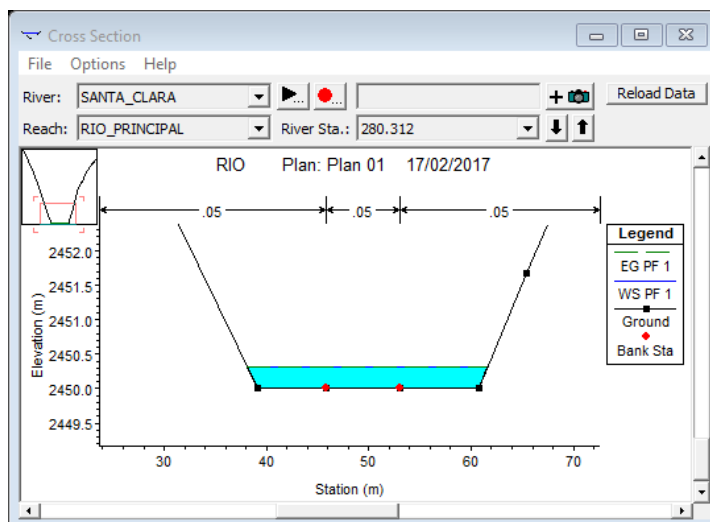


Figura 93. Sección transversal con simulación de CAUDAL $1.94 \text{ m}^3/\text{s}$

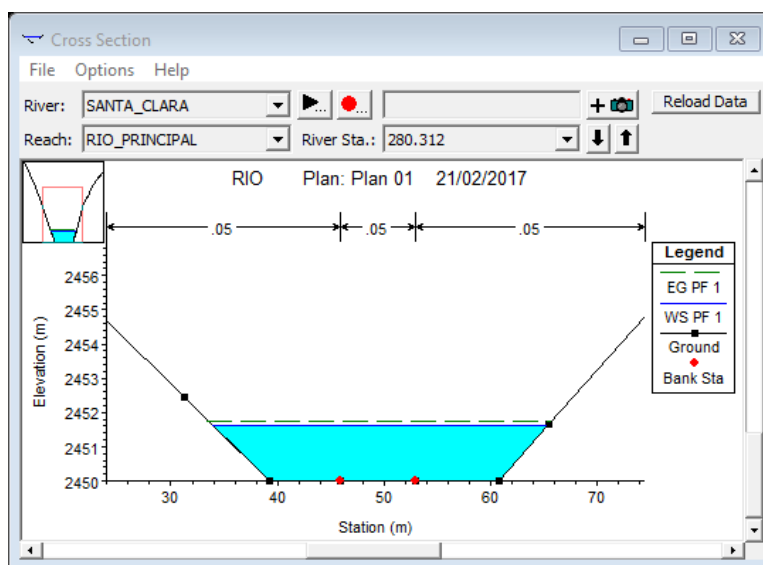


Figura 94. Sección transversal con simulación de CAUDAL $68.9 \text{ m}^3/\text{s}$

5.4 MAPA DE MODELAMIENTO DE SEDIMENTOS Y CAUDALES DEL RÍO SANTA CLARA

Una vez obtenido el modelamiento de sedimentos y caudales del Río Santa Clara, se exportan los datos a ARCGIS 10.3 para presentar el mapa de modelamiento con los caudales considerados para el diseño. Los mapas representan una sección del río de 4.5 km en la zona con mayor densidad poblacional que atraviesa el Río Santa Clara

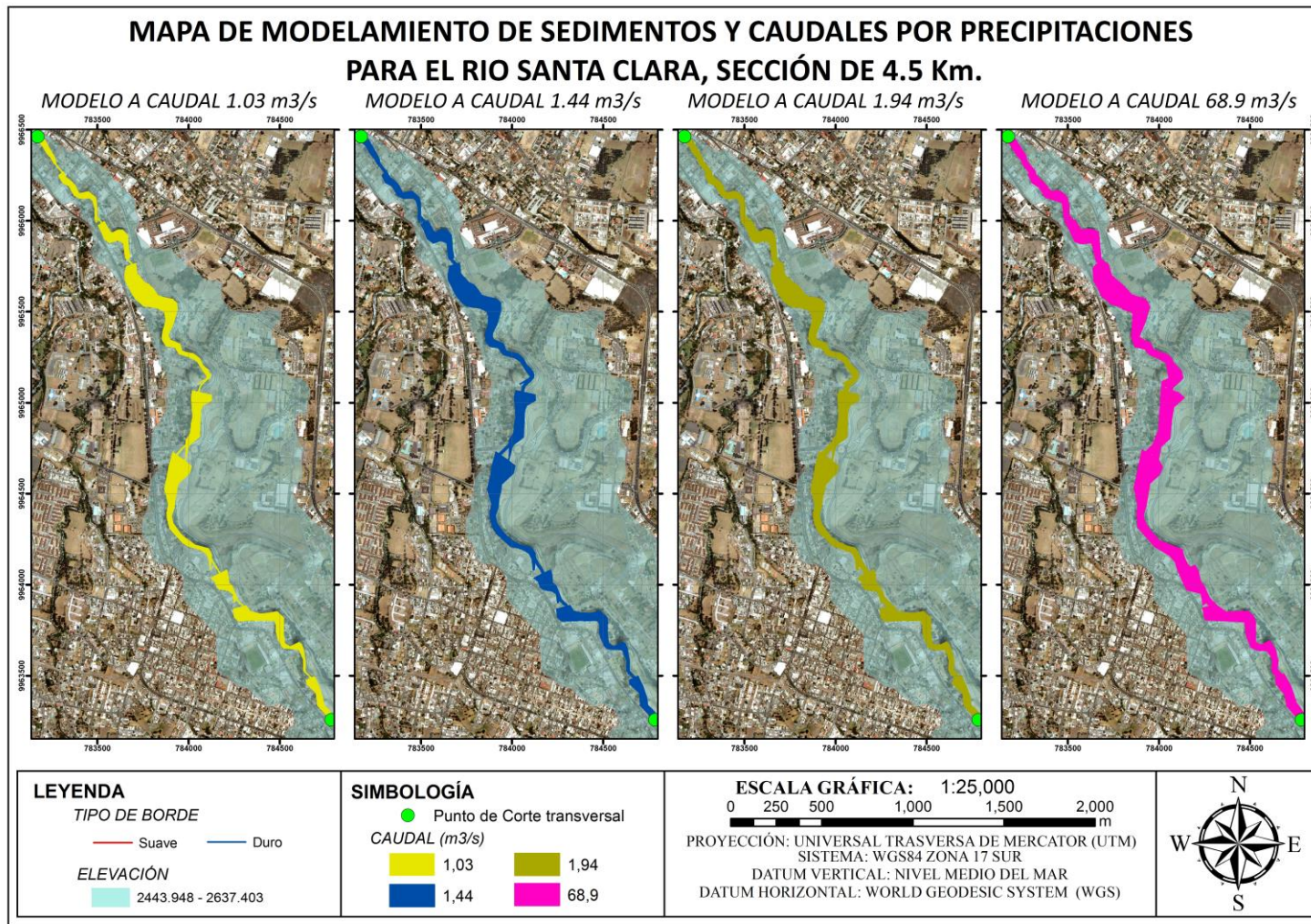


Figura 95. Mapa de modelamiento de sedimentos y caudales en el Río Santa Clara

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Una vez realizado el trabajo de campo en el cual se ubicaron secciones a lo largo del cauce del río Santa Clara, se realizó el aforo correspondiente utilizando la metodología de flotadores y molinetes y con la ayuda de los datos meteorológicos de las precipitaciones en la zona de estudio, se determinó el caudal medio del río Santa Clara $Q_0 = 1.03 \text{ m}^3/\text{s}$, en tanto que los caudales aforados son de $1.44 \text{ m}^3/\text{s}$ y $1.94 \text{ m}^3/\text{s}$. Con la aplicación de la ecuación para determinar caudales en cuencas con poca información hidrológica del Dr. Washington Sandoval, se obtuvo que el caudal máximo del río Santa Clara para un periodo de retorno de diez años es de $68.9 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Con la caracterización de los parámetros geomorfológicos de la cuenca del río Santa Clara, se determinó que la cuenca tiene una forma alargada y una topografía escarpada, con una pendiente media del 28%. Además se determinó que la densidad de drenaje es alta, lo que indica que la cuenca tiene suficiente drenaje para soportar tormentas. De acuerdo a la curva hipsométrica, se concluye que es una cuenca sedimentaria en fase de vejez.
- La producción de sedimentos por erosión superficial que llega al punto de cierre de la cuenca del Río Santa Clara, fue determinado por el método de Gavrilovic, el cual toma en cuenta factores ambientales como la temperatura, precipitación media anual, uso y cobertura del suelo, así como la topografía del terreno y se obtuvo el valor de $268719.89 \text{ m}^3/\text{año}$. Como resultado se presentan mapas de producción de sedimentos, que son una herramienta importante para la toma de decisiones acerca de la identificación de zonas de mayor producción, y la evaluación de los

procesos de estabilización (forestación, obras de control) o recuperación de dichas zonas.

- Una vez obtenidos los parámetros hidrometeorológicos se procedió a elaborar mapas temáticos, los cuales simulan el comportamiento de los caudales calculados, así como también el arrastre de sedimentos producidos en la superficie de la cuenca.

6.2 RECOMENDACIONES

- Debido a que la producción de sedimentos por erosión superficial está directamente relacionada al uso y cobertura vegetal, se recomienda implementar un plan de manejo ambiental que reduzca el impacto de las actividades antrópicas en la cuenca del río Santa Clara, con el fin de que a mediano plazo no se genere mayor cantidad de sedimentos que puede ocasionar el desbordamiento del río en las zonas pobladas.
- La acumulación de sedimentos de fondo en el lecho del río, ocasiona modificaciones en las secciones transversales del mismo, lo que a largo plazo puede ocasionar el desbordamiento del río. Por este motivo se recomienda realizar la limpieza del lecho del río en las zonas donde mayor acumulación de sedimentos se produce.
- Se recomienda además establecer prácticas de control de la erosión, como por ejemplo la reforestación ya que la cobertura vegetal filtra sedimentos, reduce las velocidades en los escurrimientos, estabiliza las orillas o margen de la corriente y la protege en contra de las inundaciones.
- Fomentar la construcción hacia áreas no inundables y limpiar constantemente los tramos del río donde ya existen edificaciones cercanas a la orilla del río.

Bibliografía

- Beyer Portner, N. (1998). *Erosion des bassins versant alpines suisses par ruissellement de surface*. Lausana: (Doctoral dissertation, PhD thesis, EPFL).
- CATIE. (2006). Curso de especialización en Gestión integral de cuencas hidrográficas. Turrialba, Costa Rica.
- Chow, V. (2000). *Hidráulica de canales abiertos*. McGraw Hill.
- Delgadillo Santander, A., & Moreno Barrios, A. (2013). *MORFOLOGÍA DE CUENCAS*. Mérida, Venezuela: UNIVERSIDAD DE LOS ANDES.
- Gavrilovic, Z. (1988). *The use of an empirical method (Erosion Potential Method) for calculating sediment production and transportation in unstudied or torrential streams*. England: Wallingford.
- GOBIERNO MUNICIPAL DE RUMIÑAHUI. (30 de 01 de 2017). <http://www.ruminahui.gob.ec/>. Obtenido de http://www.ruminahui.gob.ec/index.php?option=com_content&view=article&id=34&Itemid=158&lang=es
- Gobierno Municipal del Cantón Rumiñahui. (2014). *Plan de Desarrollo y Ordenamiento territorial 2012-2025*. Sangolquí.
- Gregory, K., & Walling, D. (1973). *Drainage basins forms and processes: a geomorphological approach*. London: Arnold.
- Guevara, E., & Cartaya, H. (1991). *Hidrología: una introducción a la ciencia hidrológica aplicada*. Universidad de Carabobo Venezuela.
- HORTON, R. (1932). *Drainage-basin characteristics*. Eos, Transactions American Geophysical Union.
- Ibáñez Asencio, S., Moreno Ramón, H., & Gisbert Blanquer, J. (2011). *Morfología de las Cuencas Hidrográficas*. Obtenido de Universidad Politécnica de Valencia: <http://hdl.handle.net/10251/10782>

- INEC. (30 de 01 de 2010). *Censo de Población y Vivienda 2010*. Obtenido de <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/inec-presenta-sus-proyecciones-poblacionales-cantonales>
- LEOPOLD, I., & J.P., W. M. (1964). *Fluvial Processes in Geomorphology*. San Francisco: Freeman.
- Morgan, R. (2005). *Soil erosion and conservation* (Tercera ed.). Oxford: Blackwell Science Ltd.
- Pérez, J. (1979). *Fundamentos del ciclo hidrológico*. Caracas, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería. Departamento de Meteorología e Hidrología.
- Pourrut, P. (1995). *El Agua en el Ecuador. Clima, precipitaciones, escorrentía*. Quito: Corporación Editora Nacional.
- Ruiz, D. (2001). *Hidrología evolución y visión sistémica*. Barinas: UNELLEZ.
- SAGARPA. (10 de 02 de 2017). *HIDROLOGÍA APLICADA A LAS PEQUEÑAS OBRAS HIDRÁULICAS*. Obtenido de www.sagarpa.gob.mx: www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/noticias/.../INSTRUCTIVO_HIDROLOGIA.pdf
- Sandoval Erazo, W. R., & Aguilera Ortiz, E. P. (2014). DETERMINACIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS CON POCA INFORMACIÓN HIDROLÓGICA. *Revista Ciencia UNEMI-Ecuador*, 100-110.
- SISTEMA NACIONAL DE INFORMACIÓN. (Julio de 2013). "GENERACIÓN DE GEOINFORMACIÓN PARA LA GESTIÓN DEL TERRITORIO A NIVEL NACIONAL ESCALA 1:25.000". Obtenido de MEMORIA TÉCNICA CANTÓN RUMIÑAHUI: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PDOT/ZONA2/NIVEL_DEL_PDOT_CANTONAL/PICHINCHA/RUMI%20C3%91AHUI/IEE/MEMORIA_TECNICA/mt_ruminahui_clima_hidrologia.pdf.
- Spalletti, P., & Brea, J. (2006). *Efecto de cambios de la cobertura vegetal en la producción de sedimentos. Caso de la Alta Cuenca del río Bermejo*. Buenos Aires: Instituto Nacional del Agua - Laboratorio de Hidráulica.

Strahler, A. (1964). *Quantitative geomorphology of drainage basin and channel networks*. Handbook of applied hydrology.

Zuidam, V. (1986). *Aerial photo-interpretation in terrain analysis and geomorphologic mapping*. Smiths publishers.

ANEXOS