

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ÁREA ACADÉMICA AGROFORESTAL
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN GESTIÓN DE RECURSOS
NATURALES Y TECNOLOGÍAS DE PRODUCCIÓN

MODELACIÓN HIDRÁULICA PARA EL ANÁLISIS Y
PROPUESTA DE OBRAS DE MITIGACIÓN DE
INUNDACIONES EN FINCA VALLE LA ESTRELLA

Trabajo Final de Graduación sometido al Tribunal del Área Académica
Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica para optar por el
grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías
de Producción

LAURA PATRICIA SEGURA SERRANO
RICARDO ANTONIO CASASOLA RAMÍREZ

Campus Cartago, Costa Rica

2011

DEDICATORIA

A mi esposa Amalia y a mis hijos Esteban, Ricardo y David.

R. Casasola

A mi mamá Leonor Segura y a mis amigos Jorge Guido y Abel Salazar; porque sin ellos no hubiera sido lo mismo.

L. Segura

AGRADECIMIENTO

Gracias a Dios.

A nuestras familias por su comprensión, motivación e inspiración.

Agradecemos de forma particular al Ms.C. Máximo Villón Béjar, el que fiel a su frase “conocimiento que no se comparte, se pierde”, nos acompañó y compartió valiosos aportes en la depuración y enriquecimiento de este trabajo.

Al Ph.D. Hernán Solís porque gracias a sus enseñanzas en la UCR y su afán de investigar, contamos con el material de apoyo para aventurarnos en este trabajo. También le damos gracias por aceptar ser nuestro lector y realizar la revisión y sus oportunas observaciones al documento.

Al coordinador del programa de Maestría Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción, Ms.C. Rodolfo Canessa por su constante atención y orientación.

A los profesores del programa de Maestría en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción por compartir su conocimiento y valiosas experiencias.

Agradecemos al Ing. Próspero Bruce S. por sus comentarios, observaciones y constante motivación.

Al Ing. Topógrafo Martín Molina Loaiza de la empresa Consultopo por su valiosa colaboración en la generación del TIN.

A la compañía Standard Fruit Co. de Costa Rica en particular al Sr. Jorge Víquez, Gerente de Recursos Humanos y al Ing. Juan Carlos Mora, Gerente de Servicios Técnicos, por su apoyo y disposición.

A la Ingeniera Andrea Tapia por su colaboración en el uso de las herramientas GIS.

Al Arquitecto Abel Salazar por todo su apoyo durante el proceso de la maestría y sus valiosos aportes al trabajo.

A los Ingenieros William Murillo y Jorge Guido por su disposición y acompañamiento.

Este Trabajo Final de Graduación fue aceptado por el Tribunal del Área Académica Agroforestal del Instituto Tecnológico de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Magister en Gestión de Recursos Naturales y Tecnologías de Producción.

**Ms.C. Máximo Villón Béjar
Profesor Tutor**

**Ph.D. Hernán Solís
Lector**

**Ms.C. Rodolfo Canessa
Coordinador del Área Académica Agroforestal**

**Laura Patricia Segura Serrano
Ricardo Antonio Casasola Ramírez
Sustentantes**

INDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCION	1
1.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	1
1.2. ANTECEDENTES	3
1.3. OBJETIVO GENERAL	5
1.3.1. <i>Objetivos específicos</i>	5
1.4. HIPÓTESIS	5
2. REVISION DE LITERATURA.....	6
2.1. CONCEPTO DE INGENIERÍA FLUVIAL.....	6
2.2. FLUJO Y PARÁMETROS HIDRÁULICOS DE LOS CANALES ABIERTOS	6
2.2.1. <i>Clasificación del flujo en canales abiertos respecto al tiempo y el espacio</i>	8
2.2.2. <i>Clasificación del flujo en canales abiertos respecto a las fuerzas viscosas</i>	10
2.2.3. <i>Clasificación del flujo en canales abiertos respecto a la fuerza de gravedad</i>	11
2.2.4. <i>Clasificación del flujo en canales abiertos respecto al número de coordenadas espaciales</i>	13
2.3. NOCIONES DE MORFOLOGÍA FLUVIAL.....	14
2.3.1. <i>Clasificación básica de los ríos</i>	14
2.3.1.1. Por su edad	14
2.3.1.2. Por su condición de estabilidad.....	15
2.3.1.3. Por tramos: en función al diámetro de las partículas de fondo, pendiente hidráulica.	16
2.3.1.4. Por los grados de libertad	16
2.3.1.5. Por el material de las margenes y el fondo.	17
2.3.1.6. Por geometría.	17
2.3.1.7. Por condición de transporte: En función a la carga de sedimentos, ya sea en fondo, mixto o en suspensión.	18
2.3.2. <i>Hidrología fluvial</i>	19
2.3.3. <i>Morfología fluvial</i>	19
2.4. LA MODELACIÓN HIDRÁULICA	20
2.5. MODELO HIDRÁULICO HEC RAS	21
2.6. SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA	22
2.7. APLICACIONES DE LOS SIG PARA LA GESTIÓN DE RECURSOS NATURALES.....	23
3. METODOLOGÍA.....	24

3.1.	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN CONCERNIENTE AL ÁREA DE ESTUDIO	24
3.1.1.	<i>Efectos del terremoto de Limón de 1991</i>	24
3.1.2.	<i>Efecto embudo</i>	29
3.1.3.	<i>Precipitación</i>	32
3.1.4.	<i>Inundaciones en el Valle La Estrella</i>	33
3.1.5.	<i>Obras de mitigación contra inundaciones</i>	40
3.2.	SOFTWARE UTILIZADOS	42
3.3.	DATOS RECOLECTADOS EN CAMPO PARA REALIZAR LA MODELACIÓN.	43
3.3.1.	<i>Generación del TIN</i>	44
3.3.2.	<i>Datos de n de Manning</i>	44
3.3.3.	<i>Datos de Caudal</i>	45
3.4.	PROCESO DE MODELACIÓN	47
3.4.1.	<i>Preproceso</i>	48
3.4.2.	<i>Proceso</i>	51
3.4.3.	<i>Postproceso</i>	56
3.5.	USO DE LOS MAPAS GENERADOS EN EL POSTPROCESO.	57
4.	RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS	58
4.1.	MORFOLOGÍA BÁSICA RÍO ESTRELLA	58
4.2.	PREPROCESO	58
4.3.	PROCESO	58
4.4.	CALIBRACIÓN DEL MODELO	64
4.4.1.	<i>Segundo Preproceso y Proceso para calibración: digitalización secciones transversales adicionales</i>	69
4.4.2.	<i>Tercer Preproceso y Proceso para la calibración del modelo: digitalización del río Estrella por segmentos</i>	71
4.5.	MODELACIÓN CON OTROS CAUDALES	98
4.6.	POSTPROCESO	101
4.7.	ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS, PROPUESTA Y PRIORIZACIÓN DE OBRAS	108
5.	CONCLUSIONES	110
5.1.	CON RESPECTO AL SOFTWARE DE MODELACIÓN	110
5.2.	CON RESPECTO A LAS OBRAS	112
6.	RECOMENDACIONES	113

6.1.	CON RESPECTO SOFTWARE DE MODELACIÓN.....	113
6.2.	CON RESPECTO A LAS OBRAS.....	114
7.	BIBLIOGRAFIA	115
8.	ANEXOS.....	118
8.1.	UBICACIÓN Y PLANTA Y SECCIONES TRANSVERSALES PARA MONITOREO DE SEDIMENTACIÓN.	118
8.2.	SECCIONES GENERADAS EN EL PROCESO DE AGUAS ARRIBA A AGUAS ABAJO.....	128

INDICE DE CUADROS

Cuadro 3.1: Levantamiento co-sísmico, terremoto Limón 1991, OVSICORI	26-27
Cuadro 3.2. Precipitación promedio anual en la estación Limón (mm), período de 1941-2010.	33
Cuadro 3.3. Registro de inundaciones extraordinarias finca Estrella.	37-38
Cuadro 3.4. Registro de caudales máximos instantáneos río Estrella	40
Cuadro 3.5. Cálculo de periodos de retorno	46
Cuadro 3.6. Caudales que se introducirán en el modelo HEC-RAS	47
Cuadro 4.1. Secciones y distancias de las secciones transversales del río Estrella, ubicadas de aguas arriba hacia aguas abajo.	60-61
Cuadro 4.2. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 1	76
Cuadro 4.3. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 2	80
Cuadro 4.4. Datos de altura y velocidad del agua para las secciones en tramos separados y tramos 1 y 2 juntos.	82
Cuadro 4.5. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 2	90-92
Cuadro 4.6 Diferencias en los niveles del agua en 3 secciones contiguas modelando diferentes caudales con y sin el Tramo 5.	97-98
Cuadro 4.7. Diferencias en los niveles del agua en la última sección aguas abajo del tramo 4 modelando diferentes caudales con y sin el Tramo 5.	99

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación geográfica del distrito Valle La Estrella, Cantón de Limón	1
Figura 1.2. Ubicación de finca La Estrella, Standard Fruit Co.	2
Figura 2.1 Elementos geométricos de la sección transversal de un canal	7
Figura 2.2. Clasificación del flujo en canales abiertos según el tiempo y el espacio	10
Figura 3.1. Ubicación espacial del epicentro Terremoto Limón 1991	25
Figura 3.2 Deslizamientos en la parte alta de la cuenca del Río Estrella.	28
Figura 3.3 Sedimentación del cauce del río Estrella.	29
Figura 3.4. Ubicación espacial del embudo natural	30
Figura 3.5. Sección transversal del río Estrella, aguas arriba del puente de Atalanta	31
Figura 3.6. Sección transversal del río Estrella, aguas abajo del puente de Atalanta	31
Figura 3.7. Sección de control río Estrella, Puente colgante en Pandora.	32
Figura 3.8. Daños por inundación en plantación de banano, finca Estrella	35
Figura 3.9 Daños a cuadrantes habitacionales por inundación, finca Estrella	35
Figura 3.10. Proceso de limpieza del cauce y mantenimiento de los diques, río Estrella	36
Figura 3.11 Relación entre caudal y área afectada por eventos extremos, río Estrella.	39
Figura 3.12. Ubicación de los diques en el área de estudio en la actualidad.	41
Figura 3.13. Área inundada en el área de estudio a raíz del evento de Noviembre	42
Figura 3.14. Vista del Río Estrella y planicies de inundación	45
Figura 3.15. TIN del área de estudio	49
Figura 3.16. Digitalización en el Preproceso	50
Figura 3.17. Ventana de datos geométricos importados de Arc View GIS	51
Figura 3.18. Figura de la Sección 23 sin corrección de los bancos.	52
Figura 3.19. Figura de la Sección 1 con corrección de los bancos.	53
Figura 3.20. Hidrograma caudales máximos instantáneos Río Estrella, evento 30 de noviembre 2002.	55
Figura 4.1. Esquema de la geometría importada del formato GIS	59
Figura 4.2. Sección 7796.354, correspondiente a la sección #34	61
Figura 4.3. Sección tomada en el campo aguas arriba del río Estrella.	62
Figura 4.4. Sección 7796.354 (sección 34) con el caudal de calibración	64
Figura 4.5. Sección 7796.354 (sección 34) con las áreas de flujo inefectivo definidas.	65
Figura 4.6. Sección 428.142 (sección 8), con el caudal de calibración.	66
Figura 4.7. Gráfica del perfil del agua con el caudal de calibración	67

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

Figura 4.8. Nueva geometría para calibración	69
Figura 4.9. Sección 420.782 que corresponde a la sección 428.142 (sección 8) del primer Preproceso.	70
Figura 4.10. Acercamiento de la geometría con los 4 nudos en la línea de centro.	71
Figura 4.11. Esquema del río Estrella para el tramo 1.	72
Figura 4.12 Sección 7782.586 del Tramo 1 que corresponde a la primera sección aguas arriba.	73
Figura 4.13. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 1	75
Figura 4.14. Esquema geométrico del Tramo 2	77
Figura 4.15. Sección 5996.115 del Tramo 2 que corresponde a la primera sección aguas arriba.	78
Figura 4.16. Sección 4339.128 del Tramo 2 que corresponde a la última sección aguas abajo.	78
Figura 4.17. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 1	79
Figura 4.18. Esquema geométrico de los Tramos 1-2	81
Figura 4.19. Esquema de la geometría del Tramo 3	83
Figura 4.20. Sección 4184.454 del Tramo 3 que corresponde a la primera sección aguas arriba.	84
Figura 4.21. Sección 2757.33 del Tramo 3 que corresponde a la última sección aguas abajo.	84
Figura 4.22. Esquema de la geometría del Tramo 4.	86
Figura 4.23. Sección 2679.695 del Tramo 4 que corresponde a la primera sección aguas arriba.	87
Figura 4.24. Sección 1046.801 del Tramo 4 que corresponde a la última sección aguas abajo.	87
Figura 4.25. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 3	88
Figura 4.22. Esquema de la geometría de los Tramos 1-2-3 y 4.	89
Figura 4.23. Sección 3571.507	90
Figura 4.24. Gráfica del perfil del caudal de calibración en los Tramos 1-2-3-4	92
Figura 4.26. Esquema geométrico del Tramo 5	93
Figura 4.27. Sección 723.959 del Tramo 5 que corresponde a la primera sección aguas arriba.	94
Figura 4.28. Sección 17.765 del Tramo 5 que corresponde a la última sección aguas abajo.	95
Figura 4.29. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 5	96
Figura 4.30 Primer TIN de la superficie del agua.	101
Figura 4.31. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración utilizando la opción "Levees" en HEC-RAS.	102
Figura 4.32. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración moviendo algunos diques de la margen derecha.	103
Figura 4.33. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo con los tramos 1-2-3-4.	104

INDICE DE FIGURAS (Continuación)

Figura 4.34. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo del Tramo 5.	105
Figura 4.35. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo para todo el río.	106
Figura 8.1. Planta de ubicación de secciones de monitoreo	116
Figura 8.2. Sección A-08-11	116
Figura 8.3. Sección A2-1-08-11	117
Figura 8.4. Sección A2-08-11	117
Figura 8.5. Sección A2-3-08-11	118
Figura 8.6. Sección A3-08-11	118
Figura 8.7. Sección A3-2-08-11	119
Figura 8.8. Sección B-08-11	119
Figura 8.9. Sección B-2-08-11	120
Figura 8.10. Sección B2-08-11	120
Figura 8.11. Sección B2-2-08-11	121
Figura 8.12. Sección B2-3-08-11	121
Figura 8.13. Sección B2-4-08-11	122
Figura 8.14. Sección C-08-11	122
Figura 8.15. Sección S-08-11	123
Figura 8.16. Sección D-08-11	123
Figura 8.17. Sección E-08-11	124
Figura 8.18. Sección F-08-11	124
Figura 8.19. Sección G-08-11	125

RESUMEN

Las inundaciones son fenómenos naturales que no pueden evitarse. Así mismo su impacto se incrementa debido a razones antropomórficas, como la reducción de los coeficientes de infiltración por cambios de uso del suelo, el calentamiento global y el asentamiento de poblaciones en las áreas de inundación.

Es claro, que para minimizar el impacto de las inundaciones, se requiere implementar un plan de gestión del riesgo integrado a nivel de cuenca hidrográfica. Dicho plan tiene que estar conformado por medidas de prevención, protección y preparación.

La elaboración de un plan de gestión del riesgo de inundaciones, es una labor que requiere mucho trabajo conjunto e investigación. Por lo tanto el uso de herramientas que permitan visualizar y entender el fenómeno de la inundación antes que ocurra; facilita y brinda un panorama más claro a la hora de tomar decisiones como: dónde ubicar diques y su altura, dónde realizar ampliaciones, rectificaciones del cauce y qué tanto; si vale la pena o no reubicar poblaciones y dónde; así como ubicar áreas donde se presentan fenómenos hidráulicos que afectan el comportamiento de la inundación.

Es así, como el uso del modelo hidráulico HEC-RAS integrado con la extensión GeoRAS, permite extraer la topografía del área de interés por medio de un TIN (triangulated irregular network); simular inundaciones con diferentes caudales y condiciones de rugosidad establecidos por el usuario y generar un nuevo TIN con las alturas y áreas cubiertas por el agua.

Con la información generada con el modelo es posible trabajar a nivel preventivo y correctivo, además de evaluar el funcionamiento de obras ya implementadas. Al simular diferentes situaciones, comparando costos de implementación de diferentes medidas es posible escoger el escenario más conveniente y así optimizar el proceso de gestión del riesgo.

Sin embargo; los modelos no son autosuficientes y es necesario del conocimiento y la experiencia de un profesional que le dé el tratamiento adecuado a la información de entrada y de salida del modelo.

Aprovechando la tecnología de modelación hidráulica, se decidió realizar una simulación en un segmento de 7,5 Km del Río Estrella, que atraviesa la finca bananera La Estrella de 2 200 ha; propiedad de Standard Fruit Co. En la provincia de Limón, Costa Rica.

Esta área presenta la ocurrencia de inundaciones periódicas, que se intensificaron en magnitud y frecuencia debido al terremoto ocurrido en el año 1991; el cual cambió drásticamente las condiciones físicas de la cuenca. Otra particularidad de la zona, es la presencia de una especie de embudo natural, que funciona como regulador del caudal que sale al mar. Este embudo crea diferentes condiciones que dificultan el análisis mediante modelos computacionales; por lo que es necesario el análisis profundo de la metodología y la información de salida del modelo.

1. INTRODUCCION

1.1. Ubicación del área de estudio

Finca La Estrella, propiedad de la empresa bananera Standard Fruit Co se localiza en la cuenca hidrográfica del río Estrella en el distrito Valle La Estrella, del cantón de Limón, Provincia de Limón.



Figura 1.1 Ubicación geográfica del distrito Valle La Estrella, Cantón de Limón.

Fuente IGN 2011

La cuenca hidrográfica del río Estrella tiene una extensión cercana a las 70,400 hectáreas (704 Km²), distribuidas en 12 sub cuencas hidrográficas y 3 áreas de drenaje disperso. Se localiza entre las coordenadas geográficas 9°35' – 9°50' de

latitud norte y $82^{\circ}50'$ – $83^{\circ}20'$ de longitud Oeste. Hacia el Norte limita con la Fila Matama, sobresalen las estribaciones Sikorbeta, Bekotumbeta, Carbón, Tigre y como principales tributarios se pueden citar al Suruy, Ley y el Niñey; al Sur limita con el Cerro Bobocara, Fila Suribeta y la Fila Carbón, los tributarios son el Abuy, Cerere, Seille, Duruy y el Bitey.

El Valle La Estrella se ubica en la parte inferior de la cuenca con un área de aproximadamente 5,500 hectáreas (55 km^2) superficie que representa un 7.8 % del total de la cuenca. La finca bananera La Estrella propiedad de Standard Fruit Co. se ubica entre las coordenadas Lambert 185 000 y 192 000 Latitud Norte; y 644 000 y 650 000 Longitud Este, y ocupa aproximadamente 2,200 ha lo que a su vez representa apenas un 3.1 % con respecto al total de la cuenca. (García, JD. 1993)

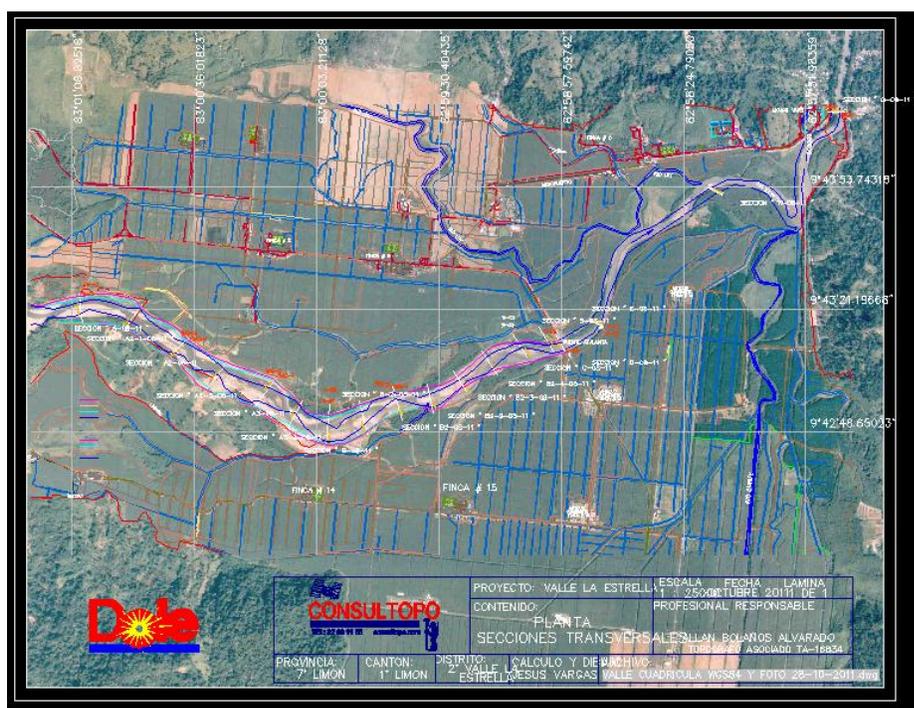


Figura 1.2. Ubicación de finca La Estrella, Standard Fruit Co.

Fuente: Consultopo 2011

1.2. Antecedentes

La historia registra cómo a raíz de la construcción del ferrocarril nace también la industria bananera en Costa Rica. A principios del siglo XIX, “el cultivo se extendió hacia el sur de Puerto Limón, a los valles de los ríos Banano, Estrella y Sixaola. Luego de 1913, la primera guerra mundial, la gran depresión, la enfermedad llamada mal de Panamá y el agotamiento de los suelos provocan un retroceso en la actividad y en 1942 termina la exportación de banano desde Limón (Casey, 1979). La provincia entró en un período de severa depresión económica hasta 1956 cuando la Standard Fruit Company (Casey 1979) inició en el Valle La Estrella el redesarrollo de la industria bananera, tanto en las áreas antiguamente cultivadas por la United, como en otras zonas ahora accesibles por la extensión de la línea vieja del ferrocarril.” (*Sociedad Interamericana de Desarrollos Ecológicos S.A.: Cambios en el uso de la tierra, Valle del río La Estrella, Limón, Costa Rica*)

La Escuela de Estudios Generales de la Universidad de Costa Rica en su documento sobre la Problemática Bananera en la zona Atlántica menciona que desde 1956 en el Valle La Estrella y como consecuencia de gran cantidad de mano de obra que particularmente esta actividad demanda, se construyeron cuadrantes habitacionales, canchas de fútbol, salones comunales, escuelas, fondas, y otras edificaciones; lo que a su vez generó la llegada de otros servicios como un establecimiento de Consejo Nacional de Producción, comisariatos, restaurantes, un cine, ferreterías, estación de combustible y otros. Así mismo la Standard Fruit Company facilitó los terrenos para la construcción del edificio de la clínica de la Caja Costarricense del Seguro Social, la Cruz Roja, la Sucursal del Banco de Costa Rica, Edificios del Instituto Costarricense de Electricidad, el Colegio Técnico Agropecuario de la zona.

No obstante, una característica importante de la región es la ocurrencia de inundaciones periódicas, identificándose dos comportamientos, el primero antes del terremoto de 1991, en esta etapa se presentaban inundaciones de magnitud importante entre 5-6 a 9-10 años, lo cual era más o menos soportable tanto para los pobladores como para la actividad bananera. Sin embargo a partir de 1991 la situación cambió de manera drástica, pues la magnitud y la frecuencia de las inundaciones aumentó abruptamente, presentándose ahora eventos extraordinarios cada año o cada dos años, inclusive se han presentado dos a tres eventos extraordinarios durante el mismo año, lo cual ha provocado pérdidas muy importantes a los pobladores así como a las diversas actividades productivas de la región. (Bruce, P. y Casasola, R. 2005)

Tal ha sido el cambio, que si bien hace unos 35 años se construyeron diques de protección contra las inundaciones del Río Estrella, la limpieza del sedimento acumulado en el cauce y el mantenimiento de los mismos no era muy frecuente; actualmente debido al cambio después del terremoto, los antiguos diques han requerido un mayor mantenimiento.

Gracias a los registros del departamento de hidrología del ICE, se puede establecer que un evento de magnitud importante en el pasado estaba en el orden de los 700 – 900 m³/s.; sin embargo luego de 1991 se han registrado eventos de 1,200, 1,700, 1,900, 2,515 y el máximo de 3,496 m³/s. (Bruce, P. y Casasola, R. 2005).

1.3. Objetivo general

Modelar hidráulicamente el segmento del río La Estrella que atraviesa la finca Valle La Estrella utilizando el modelo HEC-RAS 4.1.0 en conjunto con la extensión HEC-GeoRAS.

1.3.1. Objetivos específicos

1. Calibrar el modelo con el dato de caudal de un evento extraordinario.
2. Analizar el desempeño de las obras de mitigación de inundaciones existentes en la finca Valle de la Estrella con respecto al caudal de calibración.
3. Generar un mapa de inundación y zonas de amenaza dentro del área de estudio.
4. Proponer obras hidráulicas adicionales necesarias para la mitigación de inundaciones en el área de estudio.
5. Elaborar una propuesta que priorice la construcción de las nuevas obras hidráulicas.

1.4. Hipótesis

1. Las obras hidráulicas existentes en el área de estudio cumplen adecuadamente su función de mitigación de inundaciones.
2. La modelación utilizando HEC-RAS con la extensión HEC-GeoRAS para análisis del comportamiento hidráulico en ríos, es adecuada para la Vertiente Caribe de Costa Rica.

2. REVISION DE LITERATURA

2.1. Concepto de ingeniería fluvial

La ingeniería fluvial trata de las intervenciones humanas en los ríos para su adecuación al aprovechamiento de los recursos o a la reducción de riesgos de daño (Martín, JP. 2003).

El antecedente o punto de referencia más directo en los estudios de ingeniería para entender un río, es la hidráulica del régimen en lámina libre y las obras hidráulicas para transporte en lámina libre: los canales (Martín, JP. 2003). Sin embargo en el estudio de la hidráulica fluvial, además de los conceptos de canales se aúna el estudio de la hidrología geomorfología, transporte de sedimentos entre otros.

2.2. Flujo y parámetros hidráulicos de los canales abiertos

En los canales abiertos, la presión del flujo es la presión atmosférica ya que la superficie libre del líquido está en contacto con la atmósfera. Así mismo el agua circula debido a la acción de la gravedad (Villón, M. 2008).

Los canales cuentan con propiedades hidráulicas tales como geometría de la sección (área hidráulica, espejo de agua, perímetro mojado, pendiente, etc.), velocidad, rugosidad, tirante.

En la Figura 2.1 se muestran en color rojo los aspectos de la geometría de la sección transversal de un canal natural.

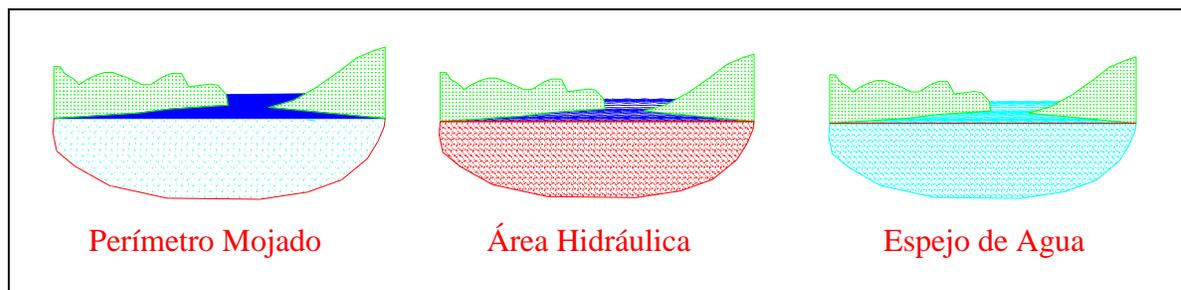


Figura 2.1 Elementos geométricos de la sección transversal de un canal

Fuente: Los Autores.

La rugosidad: Se representa por el tamaño y la forma de los granos del material que forma el perímetro mojado y que producen un efecto retardante sobre el flujo.

El tirante: se refiere a la profundidad del flujo (h); es la distancia vertical del punto más bajo de la sección del canal a la superficie libre.

La velocidad: debido a la presencia de la superficie libre y a la fricción a lo largo de las paredes del canal, las velocidades no están uniformemente distribuidas en su sección. La resistencia ofrecida por las paredes y por el fondo del canal, reduce la velocidad. En la superficie libre, la resistencia ofrecida por la atmósfera y por el viento (aunque este último tiene muy poco efecto) también influye sobre la velocidad. La velocidad máxima medida en canales será encontrada en la vertical, por debajo de la superficie libre a una distancia de 0.05 a 0.25 de la profundidad. La distribución de velocidades en una sección de canal depende también de otros factores, entre ellos la forma inusual de la sección, la presencia de curvas a lo largo del canal, etc. En una curva, la velocidad se incrementa de manera sustancial en el lado convexo, debido a la acción centrífuga del flujo (Chow, V T. 1959).

Para el cálculo de la velocidad en los canales se utiliza generalmente la fórmula de Manning, que se expresa como:

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

Donde:

v= velocidad (m/s)

n= coeficiente de rugosidad, adimensional

R= radio hidráulico

S = la pendiente del canal (adimensional)

El coeficiente de rugosidad n, es una constante muy importante y difícil de determinar ya que depende de la rugosidad de la superficie, la vegetación, la irregularidad del canal, el alineamiento del canal, de los depósitos y socavaciones, de las obstrucciones, tamaño y forma del canal y nivel y caudal. Debido a esta dificultad se han creado tablas con valores para las diferentes superficies por donde circula el agua.

Cabe destacar que si los canales son naturales las propiedades hidráulicas son esencialmente irregulares.

El flujo en un canal abierto se clasifica según la variable de referencia, tiempo, espacio y la acción de las fuerzas viscosas y las de gravedad sobre el fluido. Otra manera de clasificarlos es utilizando el número de direcciones coordenadas del flujo.

2.2.1. Clasificación del flujo en canales abiertos respecto al tiempo y el espacio

La siguiente clasificación se hace de acuerdo con el cambio en la profundidad del flujo con respecto al tiempo y al espacio. Al cambiar la profundidad consecuente

mente varían el resto de parámetros hidráulicos (tirante, perímetro mojado, radio hidráulico; etc.).

Flujo permanente y no permanente: se considera el tiempo como criterio. Se dice que el flujo en un canal abierto es permanente si la profundidad del flujo no cambia o puede suponerse constante durante el intervalo de tiempo en consideración.

Flujo uniforme y flujo variado: se considera el espacio como criterio. Se dice que el flujo en canales abiertos es uniforme si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal. El flujo es variado si la profundidad de flujo cambia a lo largo del canal.

A su vez existen diferentes clasificaciones que toman simultáneamente como criterio el tiempo y el espacio. Por ejemplo un flujo uniforme puede ser permanente o no permanente, según cambie o no la profundidad con respecto al tiempo. El flujo uniforme permanente es el tipo de flujo fundamental que se considera en la hidráulica de canales abiertos. La profundidad del flujo no cambia durante el intervalo de tiempo bajo consideración. El establecimiento de un flujo uniforme no permanente requeriría que la superficie del agua fluctuara de un tiempo a otro pero permaneciendo paralela al fondo del canal.

En la Figura 2.2 puede observarse un diagrama donde se explica la clasificación del flujo en un canal abierto con respecto a las variables citadas.

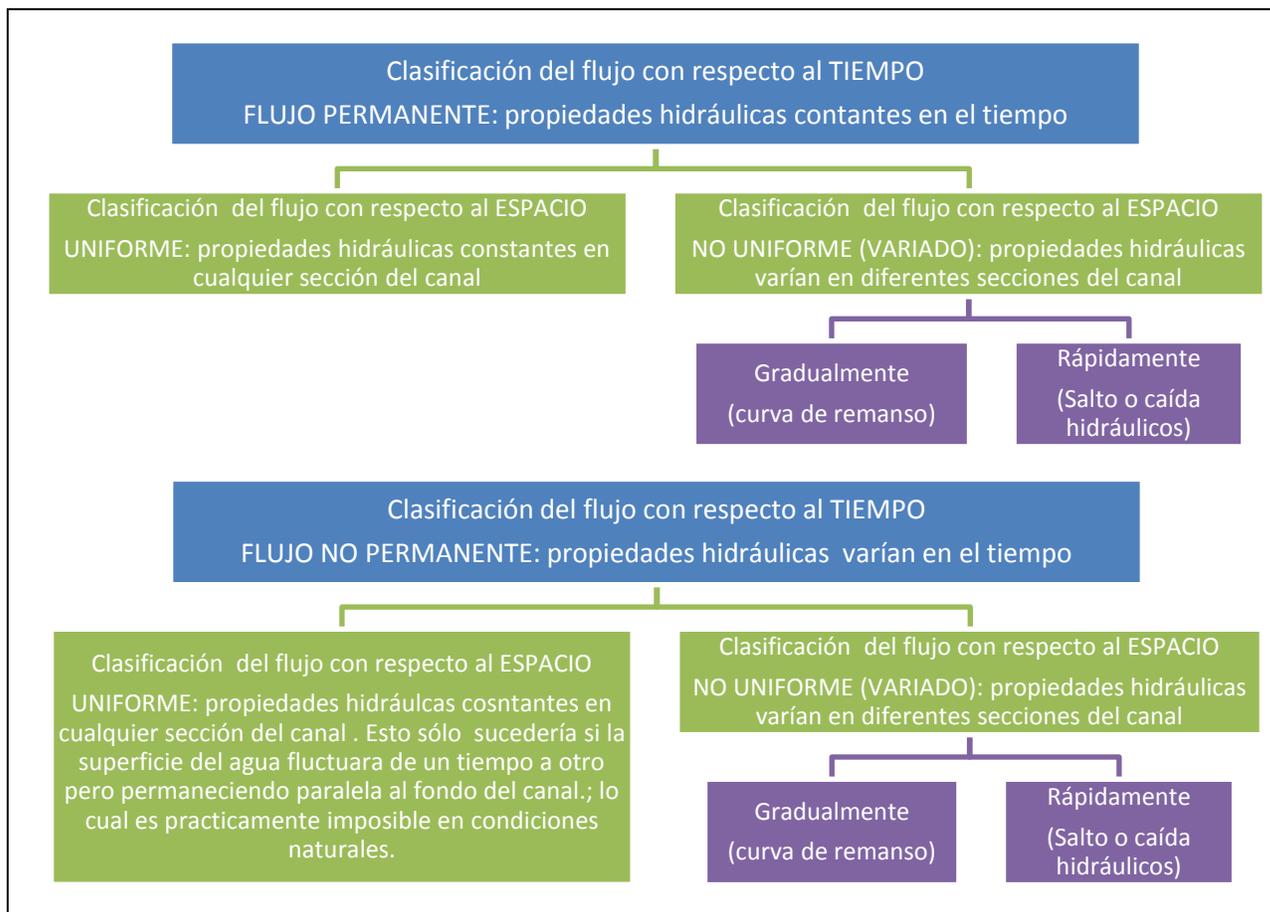


Figura 2.2. Clasificación del flujo en canales abiertos según el tiempo y el espacio.

Fuente: Los Autores.

2.2.2. Clasificación del flujo en canales abiertos respecto a las fuerzas viscosas

En relación con el efecto de la viscosidad, el flujo se clasifica utilizando el número de Reynolds (R_e) que relaciona las fuerzas de inercia con las fuerzas viscosas (Villón, M. 2008).

El número de Reynolds se expresa como: $R_e = \frac{vR}{u}$ (2.2)

Donde:

Re = número de Reynolds

R= radio hidráulico de la sección transversal, en metros (m)

v = Velocidad media (m/s)

ν = viscosidad cinemática del agua (m^2/s)

Si: Re < 500 → Flujo laminar
 Re > 500 → Flujo turbulento
 500 < Re < 1000 → Flujo transitorio

2.2.3. Clasificación del flujo en canales abiertos respecto a la fuerza de gravedad.

En función a la acción que la fuerza de la gravedad ejerce sobre el flujo, este se clasifica de acuerdo al número de Froude (Villón, M. 2008).

Para calcular el número de Froude y determinar el estado en que se encuentra el flujo se usa la siguiente relación:

$$F = \frac{v}{\sqrt{gD_H}} \quad (2.3)$$

En ella se relaciona la velocidad v , gravedad g y la profundidad hidráulica media D_H ; esta última está definida como el cociente entre el área mojada y el ancho del espejo de agua en el canal.

Flujo crítico

Este tipo de flujo presenta una combinación de fuerzas inerciales y gravitacionales que lo hacen inestable, convirtiéndolo en cierta manera en un estado intermedio y cambiante entre los otros dos tipos de flujo. Debido a esto es bastante inaceptable y poco recomendable, usarlo en el diseño de estructuras hidráulicas. Para éste tipo de flujo el número de Froude es igual a 1 y en esta condición no se generan resaltos hidráulicos (Villón, M. 2008).

Flujo supercrítico

En este tipo de flujo las fuerzas inerciales presentan una influencia mucho mayor que las fuerzas gravitacionales. Además de esto, el flujo se presenta a velocidades y pendientes altas, y a profundidades más pequeñas. Cuando existe un flujo de este tipo en un canal un aumento en la cantidad de energía provoca una disminución de la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude, en este caso, es mayor a 1. Este estado de flujo propicia la formación de resaltos hidráulicos, siempre y cuando pase a un flujo subcrítico; estos aumentan su capacidad de disipación de energía en ciertos intervalos, alcanzando la mayor capacidad para flujos con Froude mayores a 9 (Villón, M. 2008).

Flujo subcrítico

Para este régimen de flujo las fuerzas inerciales son sobrepasadas en importancia por las gravitacionales; en el flujo se tienen velocidades y pendientes bajas, pero las profundidades de la lámina del agua, por el contrario, son mayores que las que se presentan en el flujo supercrítico. Para este tipo de flujo un aumento en la

energía se traduce en un aumento en la profundidad de la lámina de agua. El número de Froude en este estado es menor a 1 (Villón, M. 2008).

2.2.4. Clasificación del flujo en canales abiertos respecto al número de coordenadas espaciales.

Al conocer las direcciones coordenadas se pueden describir los cambios en velocidad y propiedades de un campo de flujo. El flujo se puede clasificar según el número de estas coordenadas de la siguiente manera:

a) Tridimensional

Se presenta cuando sus características varían en el espacio, o sea que los gradientes del flujo existen en las tres direcciones. Este es el caso más general de flujo (Sotelo, G. 2000).

Para describir los cambios de velocidad y propiedades de un campo de flujo se necesitan las tres coordenadas (Roberson; Crowe. 1985).

b) Bidimensional

Se presenta cuando sus características son idénticas sobre una familia de planos paralelos, no habiendo componentes en dirección perpendicular a dichos planos, o bien ellas permanecen constantes; es decir, que el flujo tiene gradiente de velocidad o de presión (o tiene ambos) en dos direcciones exclusivamente (Sotelo, G. 2000).

c) Unidimensional

Se presenta cuando sus características varían como una coordenada curvilínea en el espacio, usualmente la distancia medida a lo largo del eje de la conducción. El flujo de un fluido real no puede ser completamente unidimensional debido al efecto de la viscosidad, ya que la velocidad en una frontera sólida es igual a cero, pero en otro

punto es distinta de cero; sin embargo, bajo la consideración de los valores medios de las características en cada sección, se puede considerar como unidimensional (Sotelo, 2000).

2.3. Nociones de morfología fluvial

La morfología de ríos estudia la estructura y forma de los ríos, la configuración del cauce en planta, la geometría de las secciones transversales, la forma del fondo y las características del perfil. La diversidad de los ríos es tan variada como las variaciones de clima, relieve, geología, hidrología, etc. Sin embargo, se pueden identificar algunas características morfológicas frecuentes que permiten el análisis comparativo. (Gracia, J. Maza, JA. 2008). Según estos autores hace la siguiente clasificación básica de los ríos.

2.3.1. Clasificación básica de los ríos.

2.3.1.1. Por su edad

a) Jóvenes: Se encuentran en los cauces de montaña, poseen pendientes altas y sección transversal tipo "V". Son muy irregulares y están generalmente en proceso de degradación.

b) Maduros: Se presentan en valles amplios, poseen pendientes relativamente bajas; la erosión de las márgenes ha reemplazado la erosión del fondo. Son estables y la sección transversal en cada tramo es capaz de transportar la carga de sedimentos en todo su recorrido.

c) Viejos: Se encuentran en valles amplios y planicies cuyo ancho es 15 a 20 veces mayor que el ancho de los meandros, presentan pendientes muy bajas. En esto se presentan depósitos naturales de sedimentos a lo largo de las márgenes. Frecuentemente se forman amplias planicies y pantanos en las zonas vecinas a las márgenes, y no presentan rápidas o caídas, pero cerca de ellos pueden haber lagos con forma de cuerno o herradura, producto de meandros abandonados y que se cortan en forma natural.

2.3.1.2. Por su condición de estabilidad

a) Estática: Cuando la corriente es capaz de arrastrar sedimentos, pero no puede mover y arrastrar las partículas o elementos de las orillas.

b) Dinámica: Cuando las variaciones de la corriente, los materiales de la plantilla y de las orillas y los sedimentos transportados han formado una pendiente y una sección que no cambian apreciablemente año con año. En esta condición, el río sufre desplazamientos laterales continuos en las curvas, con erosión en las márgenes exteriores y depósito de sedimento en las interiores. Todos los gastos, antes de producirse un desbordamiento, escurren por un único cauce que no tiene islas o bifurcaciones.

c) Inestabilidad dinámica: Al igual que la estabilidad dinámica, el río escurre por un solo cauce, pero se presenta un intenso desplazamiento lateral de los meandros, por lo que el corte natural de ellos ocurre muy frecuentemente. Por una parte el río trata de alcanzar su pendiente de equilibrio al desarrollar meandros y por otra estos se estrangulan rápidamente y se cortan, por lo que el tramo de río no alcanza a estabilizar su pendiente.

d) Morfológica: En cualquier cauce natural, la pendiente de un tramo, el ancho y el tirante de su sección transversal, así como el número de brazos en que se divide, depende del gasto que ocurre anualmente y de su distribución, de las características físicas de los materiales que forman el fondo y orillas y de la calidad y cantidad del sedimento transportando.

2.3.1.3. Por tramos: en función al diámetro de las partículas de fondo, pendiente hidráulica.

- a) Alta montaña
- b) Montaña
- c) Faldas de montaña
- d) Intermedio
- e) Planicie (cauce arenoso)
 - i. Río Caudaloso
 - ii. Río poco caudaloso

2.3.1.4. Por los grados de libertad

- a) Un grado de libertad: Si el fondo, las paredes y la pendiente no cambian al variar el gasto. En este no existe transporte de sedimentos.
- b) Dos grados de libertad: Cuando sólo varía el tirante y la pendiente. Las márgenes son muy resistente pero el fondo no.
- c) Tres grados de libertad: Si además del tirante y la pendiente, también pueden alterarse las márgenes y ajustarse al ancho.

2.3.1.5. Por el material de las márgenes y el fondo.

- a) Cohesivo: Son los cauces alojados en materiales predominantemente arcillosos.
- b) No cohesivos: Cauces alojados en material que no desarrolla cohesión, sino que está formado por partículas sueltas.
- c) Acorazados: Granulometría amplia, con arrastre de partículas finas, lo que permite la formación de una capa o coraza de material grueso en su superficie, la cual mantiene debajo de ella a toda la granulometría original.
- d) Bien graduados o con granulometría extendida: Sedimentos de fondo compuestos por una gran variedad de tamaños.
- e) Mal graduados o de granulometría uniforme: Cuando los tamaños de las partículas siguen una distribución log-normal o logarítmica.

2.3.1.6. Por geometría.

- a) Rectos: Normalmente ocurre en pequeños tramos y son transitorios, ya que con cualquier irregularidad en la forma del cauce o en su alineamiento, o con la formación de bancos, o bien alguna obstrucción temporal, se originan disturbios locales que producen flujos transversales que inician la formación de curvas o meandros.
- b) Sinuosos: La sinuosidad de un río es el índice que representa cuanto el trazado del río se aparta de una línea recta. Se mide por la relación entre la distancia que separa dos puntos a lo largo de la parte más profunda del cauce, o thalweg y la distancia en línea recta entre ellos. Un cauce en línea recta tiene una sinuosidad de 1.0 Los ríos son sinuosos cuando la sinuosidad es mayor a 1.2 pero menor a 1.5.

- c) Con meandros: Sinuosidad mayor a 1.5. Los cauces presentan curvas alternadas unidas por tramos rectos y cortos. Normalmente la pendiente es baja, estos cauces pueden presentar erosión en las márgenes exteriores de las curvas, principalmente en los tramos de aguas abajo. Existen profundas depresiones del fondo en las curvas y altas velocidades en la cercanía de las márgenes cóncavas. Los tirantes en las transiciones son menos profundos si se comparan con los que ocurren en las curvas.
 - i. Con curvas superficiales
 - ii. Con curvas en trinchera
- d) Trenzados: A lo largo de su recorrido continuamente se dividen en varios cauces que se entrelazan y se vuelven a separar. Cauces amplios y las márgenes no están bien definidas, con gastos bajos, existen dos o más cauces principales entrelazados y se forman cauces secundarios.
- e) Con islas: Se presentan islas en su interior, las cuales pueden desplazarse hacia aguas abajo.
- f) En estuario: Estos se presentan en las desembocaduras a los océanos y están altamente influenciados por las mareas.
- g) En pantano: Cauces muy amplios por no existir pendiente o ser muy pequeña, presentan zonas muertas y saturadas por altos niveles freáticos.
- h) Deltas: Estos ríos arrastran grandes cantidades de sedimento.

2.3.1.7. Por condición de transporte: En función a la carga de sedimentos, ya sea en fondo, mixto o en suspensión.

- a) Estable
- b) Con erosión
- c) Con depósito

2.3.2. Hidrología fluvial

Es el estudio de la secuencia en que se presentan los caudales en un río y se refiere al régimen hidrológico para indicar las explicaciones causales de las regularidades a través de un tiempo definido (Martí, JP. 2002).

2.3.3. Morfología fluvial

La morfología fluvial (Fluviomorfología) es el estudio de las formas que tienen los ríos. Cuando se habla de la forma de los ríos, es decir de su apariencia, debe entenderse que esto equivale a describirlos tal como se ven desde el aire (Martí, JP. 2002). Según el autor, a continuación se explican brevemente algunas de las características de los ríos según su morfología.

- 2.3.3.1. Perfil longitudinal del cauce: Describe la forma en el que éste varía su cota a lo largo de su longitud y recorrido; de tal modo que el perfil longitudinal reflejará la pendiente de cada tramo, determinada por las condiciones impuestas por el tramo aguas arriba.
- 2.3.3.2. Trazado del sistema fluvial: Se refiere a la forma de la trayectoria que desarrolla el río en su recorrido.
- 2.3.3.3. Geometría hidráulica: Se refiere a la sección transversal del cauce y su estudio se basa en las relaciones existentes entre el caudal y la anchura del cauce, la profundidad, la velocidad del agua y la carga de sedimentos entre otros.
- 2.3.3.4. Río en equilibrio: Una característica fundamental de los sistemas abiertos, es su capacidad para autor regularse, adaptándose a

factores externos de forma que mantengan el estado de equilibrio alcanzando cierta estabilidad.

En los cauces naturales este equilibrio está referido a la regulación de la morfología y dinámica ante las variables de control o independientes como son el régimen de caudales y sedimentos.

En un cauce estable o en equilibrio, la forma y trazado se mantienen en el tiempo.

- 2.3.3.5. Caudal dominante: Es el caudal que determina ciertos parámetros del cauce como la longitud de curvatura de meandros o el caudal que efectúa mayor trabajo en términos de transporte de sedimentos.

2.4. La Modelación hidráulica

En hidráulica el término modelo corresponde a un sistema que simula un objeto real, mediante la entrada de cierta información que se procesa y presenta en forma adecuada para emplearse en el diseño y operación de obras de ingeniería (Vergara, MA.1993).

La importancia de los modelos radica en que a través de éstos, se puede predecir lo que ocurrirá con el objeto y es posible llevar a cabo simulaciones que muestren diferentes escenarios, antes de llevar a cabo la construcción de la obra.

Los modelos pueden clasificarse como físicos, en los cuales se cumplen leyes de similitud geométrica, cinemática y dinámica entre el modelo y el objeto real (Vergara, MA.1993). Así mismo hay modelos analógicos donde se hacen analogías entre dos fenómenos físicos como por ejemplo el flujo laminar y el flujo turbulento (Vergara, MA.1993).

Otro tipo de modelos son los modelos matemáticos, que son un conjunto de hipótesis y relaciones de las variables que describen un fenómeno mediante ecuaciones. La precisión de los modelos matemáticos depende de la exactitud de los datos de entrada, el tipo de fenómeno a estudiar, la exactitud de las ecuaciones que rigen el fenómeno, la forma de aproximar las ecuaciones (Vergara, MA.1993); entre otros.

2.5. Modelo Hidráulico HEC RAS

HEC-RAS, es un modelo de uso libre, ampliamente utilizado para realizar la modelación hidráulica de canales naturales y artificiales bajo condiciones de flujo permanente y no permanente, y regímenes de flujo subcrítico, crítico, supercrítico y mixto. Claramente en el análisis de inundaciones las simulaciones para flujo permanente 1D no tienen en cuenta todos los efectos hidrodinámicos de una onda de creciente, que representa un proceso físico en dos dimensiones.

Por este motivo en HEC-RAS se incluyen procedimientos más sofisticados basados en la solución de la ecuación 1D de Saint Venant. Para incluir el efecto de desborde en la dirección perpendicular al flujo se requiere considerar una sección transversal compuesta que incluye un canal principal y una planicie de inundación, y realizar una serie de suposiciones adicionales planteadas por Fread (1997) y Barkau (1985), que se constituyen en la esencia del procedimiento de solución para flujo no permanente incluido en HEC-RAS. El modelo cuenta igualmente con la posibilidad de definir áreas de almacenamiento.

El modelo permite realizar el cálculo de perfiles de flujo solucionando las ecuaciones de continuidad y de momentum a través de un esquema implícito de diferencias finitas solucionado iterativamente utilizando la técnica de Newton-Raphson. El principal parámetro del modelo es el coeficiente de rugosidad n de Manning, para el cual no existen estrategias automáticas de calibración en el modelo, y por ende debe ser calibrado manualmente a partir de la comparación de niveles de agua registrados y simulados. Otros parámetros del modelo incluyen los coeficientes de pérdidas por expansiones y contracciones. (Cárdenas Panduro, A.).

La Extensión HEC-GeoRAS es un conjunto de procedimientos, herramientas y utilidades para el procesamiento de datos geospaciales en ArcGIS utilizando una interfaz gráfica de usuario. La interfaz permite la preparación de los datos geométricos para la importación en HEC-RAS desde ArcGIS y los resultados de los procesos de simulación se exportan a ArcGIS de HEC-RAS para elaborar mapas de las elevaciones del nivel del agua.

2.6. Sistemas de información geográfica

Según el documento Introducción al uso de ArcView 3.2; un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés Geographic Information System) es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos diseñada para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. Entre estos software se encuentran ArcView y ArcGis

ArcView es un producto del Environmental Systems Research Institute (ESRI), los fabricantes de ARC/INFO, el más importante software de sistemas de información geográfica (SIG).

El ArcGIS Desktop es un conjunto de aplicaciones integradas: ArcMap, ArcCatalog y ArcToolbox. Usando estas tres aplicaciones en conjunto se puede desarrollar cualquier actividad o tarea SIG, desde una muy simple hasta una muy avanzada, incluyendo mapeo, administración de datos, análisis geográfico, edición de datos y geoprocésamiento.

2.7. Aplicaciones de los SIG para la gestión de recursos naturales

Los SIG son una herramienta muy poderosa en todas las áreas referentes a la gestión de recursos naturales. Una de esas áreas es la gestión del riesgo de inundaciones.

Según las publicaciones de las Actas de las I Jornadas Técnicas SIGTEFOR; los sistemas de información geográfica tienen múltiples campos de aplicación en el análisis y la gestión del riesgo de inundaciones fluviales, desde aspectos del estudio de la peligrosidad, como regionalización de datos de precipitación, obtención de parámetros morfométricos y de la red, discretización de parámetros hidrológicos, delimitación de áreas inundables, cartografías de riesgo integradas; hasta la adopción de medidas de mitigación de carácter predictivo, preventivo o corrector (post-desastre), que comprenden la predicción meteorológica e hidrológica, la ordenación del territorio y los sistemas de aseguramiento, y los planes de protección civil y emergencias. Su empleo supone normalmente un ahorro de tiempo, esfuerzo y una garantía de objetividad y precisión.

3. METODOLOGÍA

3.1. Recopilación de información concerniente al área de estudio

Antes de iniciar el proceso de modelación es necesario hacer una recopilación de información que es clave para la toma de decisiones a la hora de ingresar los datos al modelo, así como para proceder en el análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones.

Esta información consiste en los efectos del terremoto de Limón del año 1991, el efecto embudo a la altura de Pandora y el comportamiento de las inundaciones antes y después del terremoto.

3.1.1. Efectos del terremoto de Limón de 1991

El terremoto de Limón del 22 de Abril de 1991 ($M_s = 7.6$) ocurrió en una región tectónicamente compleja. Su epicentro se localizó en el sector de Telire en la cordillera de Talamanca, cerca del límite entre las cuencas del Valle La Estrella y Sixaola, a unos 11 km. de Pandora, Valle La Estrella y a 23.5 km. de profundidad.

En la Figura 3.1 se puede observar la ubicación espacial del epicentro del sismo, además se observa la ubicación de la localidad de Pandora, límite el área de estudio del presente estudio.



Figura 3.1. Ubicación espacial del epicentro Terremoto Limón 1991

Fuente: OVSICORI-UNA, 1991.

El terremoto produjo severas y profundas alteraciones en las cuencas del río Chirripó, Banano, Bananito y especialmente en las cuencas del Sixaola y el Estrella. Sus manifestaciones siguen vigentes hoy y continuarán vigentes por varias décadas más, hasta que se logre una nueva estabilidad.

A raíz del sismo, se han podido identificar y cuantificar levantamientos, asentamientos, licuefacción, deslizamientos e inclusive se registró la ocurrencia de un tsunami (Denyer, P; Personius, S. y Arias, O. 1994).

A. Levantamiento co-sísmico

Estudios geológicos señalan el levantamiento de la línea costera como uno de los mayores efectos provocados por este sismo. (Denyer, P; Personius, S. y Arias, O. 1994).

La investigación realizada por Observatorio vulcanológico y sismológico de Costa Rica de la Universidad Nacional (OVSICORI-UNA), sobre el levantamiento

co-sísmico asociado al terremoto, indica que el sismo afectó la costa del Caribe desde Costa Rica hasta la provincia de Bocas del Toro, Panamá.

Esta alteración geológica ha provocado cambios severos en la dinámica de los ríos de la zona, afectando entre otros aspectos, la manera en la que estos descargan sus aguas al mar, ahora los ríos deben superar el levantamiento de la costa, esto ha ocasionado cambios en la velocidad del agua lo cual a su vez afecta la capacidad de arrastre de sedimentos tanto en suspensión como de fondo. Al romperse el equilibrio el río debe generar los cambios necesarios para lograr un nuevo equilibrio, lo cual llevará un tiempo considerable.

La magnitud del levantamiento de la plataforma costera se puede observar en el Cuadro 3.1, con una elevación máxima de 1,85 m registrada entre Piuta y Playa Bonita.

No.	Mapa	Localidad	Coordenada Geográfica		Variación del nivel Levantamiento (+) Subsidencia (-) Metros
			Latitud Norte	Longitud Oeste	
1	MN	Boca Río Matina	10°06'50"	83°09'45"	-0.50
2	MN	Boca Pantano	10°04'40"	83°09'45"	0.00
3	MN	Cocal	10°01'35"	83°07'15"	0.00
4	MN	Near Moín	10°00'12"	83°05'45"	+0.60
5	MN	Moín	10°00'05"	83°04'43"	+1.50
6	MN	Near Portete	10°00'45"	83°04'10"	+1.40
7	MN	Near Portete	10°00'50"	83°04'00"	+1.60
8	MN	Punta Blanca	10°01'00"	83°04'00"	+1.50
9	MN	Piuta - P. Bonita	10°00'45"	83°03'12"	+1.70
10	MN	Piuta - P. Bonita	10°00'48"	83°03'00"	+1.85
11	MN	Hotel Las Olas	10°00'40"	83°02'37"	+1.80

12	MN	Punta Piuta	10°00'30"	83°02'18"	+1.30
13	RO	Limón	09°59'57"	83°01'40"	+0.90
14	RO	Isla Uvita	09°59'40"	83°00'50"	+0.80
15	RO	Isla Uvita	09°59'50"	83°00'43"	+0.75
16	RO	Muelle Alemán	09°59'25"	83°01'32"	+0.80
17	RO	Westfalia	09°56'35"	83°00'40"	+0.70
18	SS	Playa Bananito	09°54'22"	82°59'00"	+1.05
19	SS	Esteros Negro	09°50'50"	82°56'15"	+0.55
20	CA	Tuba Creek	09°45'43"	82°52'20"	+0.60
21	CA	Playa Negra	09°45'20"	82°52'00"	+0.40
22	CA	Playa Negra	09°45'00"	82°51'30"	+0.40
23	CA	Cahuita	09°43'23"	82°50'25"	+0.40
24	CA	Parq. Cahuita	09°45'10"	82°49'00"	+0.30
25	CA	Parq. Cahuita	09°44'15"	82°44'40"	0.00
26	AI	Puerto Viejo	09°39'30"	82°45'28"	+0.50
27	SA	Cocles	09°39'05"	82°44'10"	+0.60
28	SA	Punta Cocles	09°38'50"	82°43'20"	+0.50
29	SA	Punta Uva	09°38'40"	82°41'10"	+0.60
30	SA	Punta Manzanillo	09°38'30"	82°38'50"	+0.50
31	SA	Punta Manzanillo	09°38'18"	82°37'50"	+0.45
32	SA	Punta Mona	09°38'10"	82°37'23"	+0.40
33	SA	Gandoca	09°36'10"	82°36'25"	+0.50

Cuadro 3.1: Levantamiento co-sísmico, terremoto Limón 1991, OVSI-CORI

Fuente: (Denyer, P; Personius, S. y Arias, O. 1994).

B. Deslizamientos y deforestación inducida por el terremoto

La mayoría de los deslizamientos podrían clasificarse como del tipo “flujo regolítico”, pues ocasionaron el desprendimiento y movilización de los horizontes del suelo residual y roca alterada. Gran parte de las laderas estaban originalmente cubiertas por bosque tropical primario. Este es tal vez el mayor desastre ecológico de los últimos tiempos en Costa Rica y tomará quizás varias décadas para recuperarse (Mora, S. y Mora, R. 1994).

En la Figura 3.2 pueden observarse deslizamiento de gran magnitud en la cuenca alta del río Estrella a raíz del terremoto.



Figura 3.2 Deslizamientos en la parte alta de la cuenca del Río Estrella.

Fuente: Casasola, R. 1991

El estudio sobre el cambio de uso del suelo del valle de la Estrella realizado por SIDESA, concluye: “La cuenca del río Estrella presentaba una estabilidad relativa en la cuenca superior y media hasta el sismo de 1991, que produjo una tasa de deforestación y sedimentación natural igual al producto de una deforestación inducida durante un período de unos 20 años. Los efectos de esa manifestación natural se han visto reflejados en la profunda alteración de los ambientes naturales de montaña, las cuencas de sedimentación (Valle de la Estrella) y en la acumulación forzada de detritos vegetales y minerales en la zona costera.”

C. Sedimentación de los cauces

Los fuertes deslizamientos de la cuenca media y alta en combinación con las lluvias de alta intensidad, han provocado el arrastre y deposición de inmensas

cantidades de sedimentos en el cauce del río Estrella, como se puede observar en la Figura 3.3. Esta situación ha provocado una pérdida importante en la capacidad hidráulica a lo largo del río, provocando que estos se desborden con suma facilidad.



Figura 3.3 Sedimentación del cauce del río Estrella.

Fuente: Casasola, R. 1991

3.1.2. Efecto embudo

La cuenca del río La Estrella presenta una característica morfológica generada a partir de un alineamiento tectónico, que ha conformado un estrangulamiento natural a la altura del poblado de Pandora, provocando que el valle pase de tener un ancho de varios kilómetros, hasta un poco más de 200 metros, casi de forma súbita.

Esta característica natural, marca el comportamiento de las inundaciones en la cuenca, pues se presenta un efecto de embudo, donde el aporte de la parte superior y media de la cuenca, se concentra en este sector medio, con una topografía muy plana, y limitado aguas abajo a la altura de Pandora, por dicho estrangulamiento. Su ubicación se muestra en la Figura 3.4.

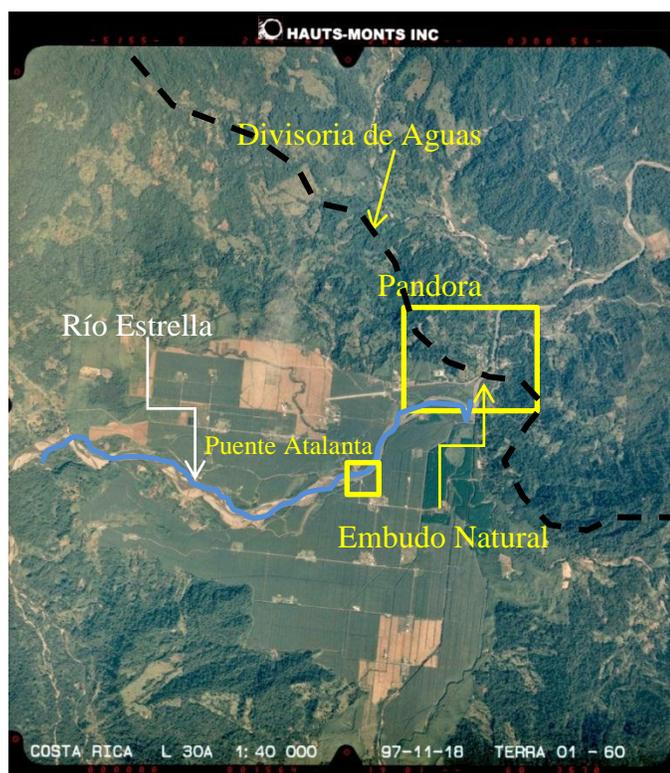


Figura 3.4. Ubicación espacial del embudo natural

Fuente: IGN. 1997

Conforme la corriente del río Estrella se acerca a este embudo natural, la velocidad del flujo disminuye a tal punto que se produce una abundante deposición de sedimentos finos especialmente limos y arcillas. En este mismo sector se ha observado como luego de las inundaciones el río inicia un proceso de auto-limpieza de sus riveras y fondo.

Situación contraria ocurre aguas arriba del puente de Atalanta, donde los materiales que llegan de las partes altas durante las inundaciones cuando los caudales y la energía de la corriente es alta, se ha notado que luego de la avenida el río no logra remover estos materiales, lo cual va provocando una significativa disminución de la sección hidráulica.

Esto se ha comprobado mediante el monitoreo topográfico frecuente de las secciones transversales fijas del río Estrella y ubicadas con este propósito, las cuales muestran una acelerada sedimentación.

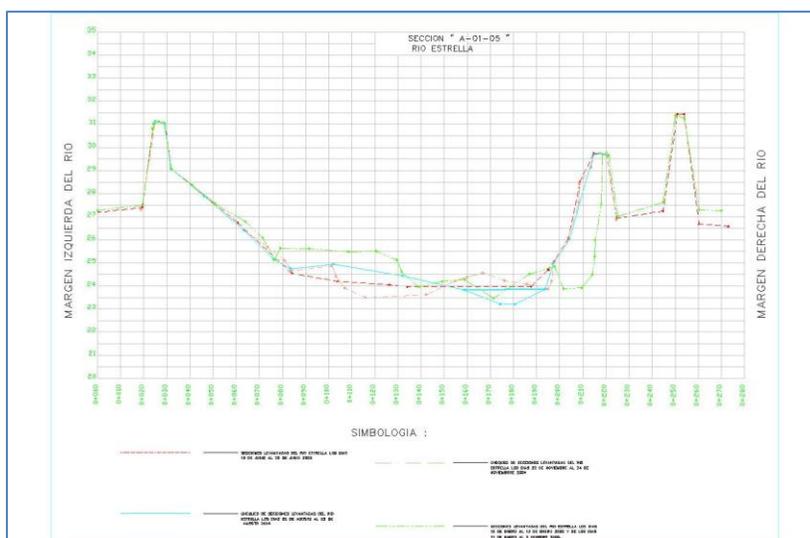


Figura 3.5. Sección transversal del río Estrella, aguas arriba del puente de Atalanta.

Fuente: Standard Fruit Co. C.R.

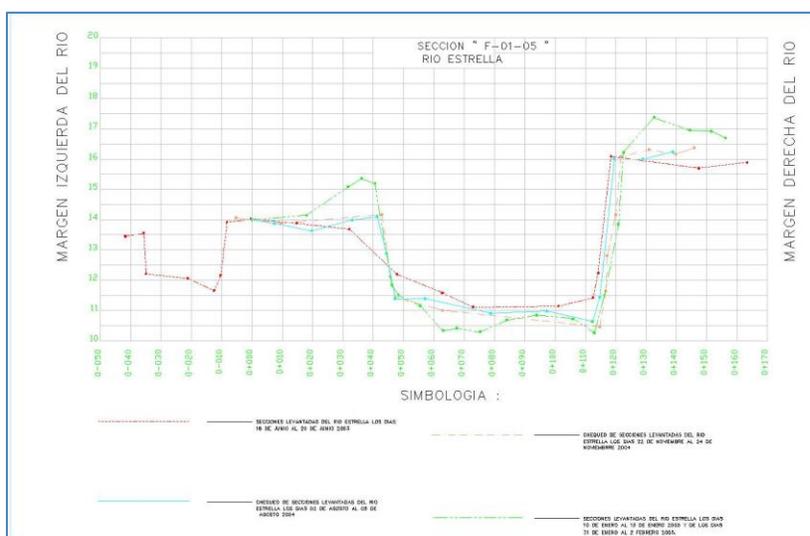


Figura 3.6. Sección transversal del río Estrella, aguas abajo del puente de Atalanta.

Fuente: Standard Fruit Co. C.R.

Mes	Valores Medios (mm)	Valores Máximos (mm)	Año
Enero	316.5	907.0	2005
Febrero	236.8	796.1	1997
Marzo	209.1	698.3	2006
Abril	265.5	925.1	1970
Mayo	335.2	1055.9	1997
Junio	292.1	877.2	1946
Julio	428.1	1139.5	1982
Agosto	304.5	691.5	1990
Setiembre	143.2	495.6	1976
Octubre	207.2	1266.5	1944
Noviembre	397.6	1008.9	1944
Diciembre	448.8	1299.8	1944
Promedio anual: 3584.6 mm			

Cuadro 3.2. Precipitación promedio anual en la estación Limón (mm), período de 1941-2010.

Fuente: IMN

3.1.4. Inundaciones en el Valle La Estrella.

La problemática de las inundaciones en la vertiente del Caribe no es un fenómeno reciente. En algunos documentos históricos del país que datan desde 1798 se hace referencia a las características del clima y de la zona que reflejan la preocupación que desde entonces había entre sus pobladores con respecto a las inundaciones. (Oreamuno, R. y Fernández A, R.J. 2009)

Por ejemplo, en el mes de diciembre de 1800 “...comenzó en Matina un fuerte temporal de viento y agua. Llovió sin cesar toda la noche, crecieron extraordinariamente los ríos y a causa de la inundación hubo considerables pérdidas.”

Otro documento histórico del país, con fecha de noviembre de 1828, en un despacho del jefe político don José María Peralta al Ministro General, le dice que: “...la inundación que casi anualmente se experimenta en el valle de Matina ocurre en el mes de noviembre, diciembre y a fines de marzo; y que en la reunión de los ríos Barbilla y Chirripó es en donde se advierte con más extensión.”

Esta información referente a la dinámica de los cauces en la Vertiente Caribe del país, indican que la problemática de las inundaciones en esa zona no es una situación reciente. La compañía ferrocarrilera también registró crecientes importantes en los años 1908, 1928 y 1949. El Instituto Meteorológico Nacional también se ha referido a las crecientes de los años 1970, 1996 y la del 2005 (Oreamuno, R. y Fernández A, R.J. 2009).

Como resultado del deterioro de la cuenca del río Estrella, tanto natural (terremotos) como el inducido (humano), en combinación con los fenómenos atmosféricos, los diferentes periodos de recurrencia de los diferentes eventos se han visto acortados, siendo mayor este hecho a partir del terremoto de 1991, y en consecuencia la sensibilidad y el riesgo se han visto incrementados, provocando grandes daños económicos tanto en la plantación bananera como a la comunidad en general.

La Figura 3.8 muestra parte de la plantación inundada, así mismo se observa gran cantidad de sedimento depositado sobre el terreno.



Figura 3.8. Daños por inundación en plantación de banano, finca Estrella

Fuente: Casasola, R. 2005

Frente a esta situación, la compañía bananera Standard Fruit Co. ha realizado importantes esfuerzos por mitigar los daños, siendo el principal objetivo salvaguardar las vidas humanas, amparados a la existencia de una situación de necesidad y sustentados en el principio de solidaridad.



Figura 3.9 Daños a cuadrantes habitacionales por inundación, finca Estrella

Fuente: Casasola, R. 2005.

Es así como en 1994 se reubicó el cuadrante de finca 13, en 1996 se reubicó el cuadrante de finca 17, en el 2001 se inició la reubicación del cuadrante de finca 16 y en el 2002 se inició la reubicación del cuadrante de finca 6. Así mismo ha sido necesario y determinante la reconstrucción y mantenimiento de los diques de protección especialmente luego de los eventos extraordinarios de Mayo, Noviembre del 2002 y Enero 2005.

La Figura 3.10 nos permite observar el proceso de limpieza de sedimentos y mantenimiento de los diques de protección del río Estrella con el empleo de equipo pesado.



Figura 3.10. Proceso de limpieza del cauce y mantenimiento de los diques, río Estrella.
Fuente: Casasola, R. 2002

El cuadro 3.3 corresponde al registro de eventos extraordinarios a partir de 1991, en donde se aprecia en efecto un aumento en la cantidad, magnitud y frecuencia de las inundaciones en el Valle La Estrella. Estos caudales fueron registrados mediante un limnógrafo del ICE, los que superaron la marca máxima fueron calculados mediante un hidrograma sintético generado por ingenieros de la Standard Fruit Co. C.R.

Año	Fecha Día/Mes	Precipitación			Caudal (m ³ /s) Máximo Instantáneo	Área Afectada (ha)
		Días Evento	Promedio Diario (mm)	Total mm		
1991	10-May	3	39.3	132.5	328	320
	12-May	2	18.0	58.7	287	406
	23-Jul	3	31.8	109.3	428	131
	26-Jul	1	56.4	66.8	226	124
	12-Ago	4	64.3	281.2	1,530	1,703
	25-Nov	5	35.8	191.5	636	403
	9-Dic	2	62.7	150.2	574	545
1992	26-Abr	4	65.0	125.0	670	522
	28-Dic	1	145.4	145.4	750	586
1993	31-Jul	2	30.2	60.4	311	242
	8-Dic	1	180.8	180.8	1,480	1,584
1994	7-Nov	2	35.2	70.4	385	240
	6-Dic	3	67.6	113.8	754	535
1995	9-Ene	3	79.4	120.8	367	271
	5-Feb	2	63.1	126.2	596	361
	12-Feb	2	183.5	367.0	1,700	1,605
1996	11-May	2	75.2	150.4	413	296
	27-Nov	3	96.9	290.6	813	350
	17-Dic	2	147.3	294.6	838	630
	14-Feb	3	96.8	290.4	1,150	730
	25-Feb	3	36.8	110.5	305	230
	4-May	3	94.2	282.7	673	294
1997	22-May	2	67.2	134.4	1,050	613
	3-Ago	2	98.6	197.1	813	350
	15-May	1	0.0	0.0	296	0
	16-May	1	0.0	0.0	280	0
1998	18-May	1	0.0	0.0	481	0
	21-May	1	0.0	0.0	255	0
	22-May	1	0.0	0.0	553	0
	24-Oct	2	76.5	152.9	1,010	179
1999	24-Abr	2	0.0	0.0	662	38
	4-Dic	3	0.0	0.0	1,130	427
2000	14-Ene	4	112.0	448.1	1,200	527
	28-Jun	2	28.8	57.7	1,150	316
2001	5-Jul	2	25.3	50.6		
	5-May	4	124.1	496.6	1,900	1,336

2002	15-Ago	2	89.7	179.4	1,390	300
	24-Nov	3	65.3	195.8	1,340	439
	30-Nov	2	156.9	313.7	3,496	1,282
2003	12-Dic	1	105.7	105.7	950	61
	7-May				797	0
2004	9-May				861	0
	25-Jun				500	0
	11-Jul				605	0
	8-Nov				1,184	234
	16-Nov				637	0
	20-Dic				506	0
	9-Ene			689.9	2,515	1,650
2005	17-Abr	4		373.6	945	73
	14-May				516	0
	20-Oct				521	0
	15-Ene				1,064	
2006	27-Ene				680	
	29-Mar				783	
2007	8-Nov					245
2008	22-Nov				1,750	339
2009	5-Feb					
2010	1-Dic					294

Cuadro 3.3. Registro de inundaciones extraordinarias finca Estrella.

Fuente: Standard Fruit Co. C.R.

La Figura 3.11 muestra los caudales máximos instantáneos registrados durante el período de 1991 a 2005 para el río Estrella y su relación con la magnitud de las inundaciones.

Los registros muestran que el caudal durante la época seca (Febrero - Abril y Setiembre - Octubre) promedia los 50 m³/s, mientras que el caudal para la época lluviosa (Mayo – Agosto y Noviembre – Enero) oscila en 150 m³/s. Así mismo y como una manifestación de la fuerte alteración provocada por el sismo de 1991, se puede observar el aumento en la frecuencia y magnitud de los eventos. La figura 3.11 refleja

el efecto de los trabajos de limpieza del cauce del río Estrella y el refuerzo en los diques de protección realizados en 1997, se nota que el nivel crítico se ubicaba a 500 m³/s. antes de 1997 y posterior a esa fecha se ubica a los 1,200 m³/s. Se observa como la relación entre el caudal y el área afectada va perdiendo su proporcionalidad.

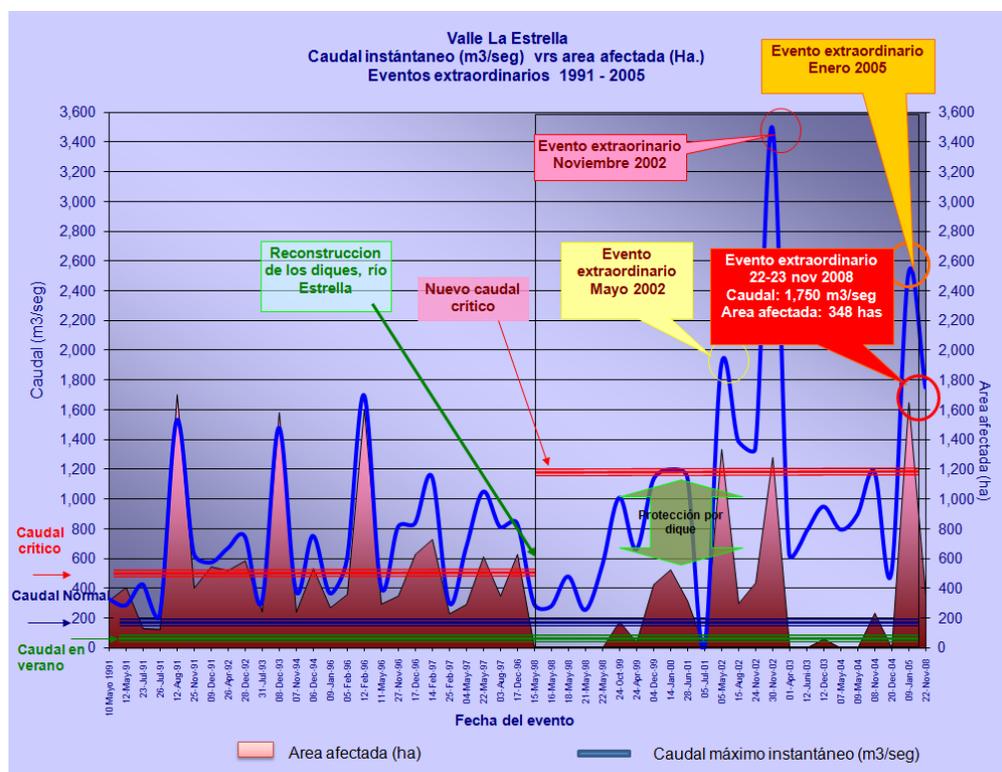


Figura 3.11 Relación entre caudal y área afectada por eventos extremos, río Estrella.

Fuente: Standard Fruit Co. C.R.

Los valores máximos anuales registrados para el periodo de 1991 al 2010 se resumen en el cuadro 3.4. Es importante indicar que en el año 2002 registraron dos eventos extraordinarios, el 05 de Mayo con un caudal de 1,900 m³/s. y el 30 de Noviembre con el caudal máximo registrado hasta la fecha de 3,496 m³/s.

Año	Caudal m ³ /s	Año	Caudal m ³ /s
1991	1530	2001	1150
1992	750	2002	3496
1993	1480	2003	950
1994	754	2004	1184
1995	-	2005	2515
1996	1700	2006	1064
1997	1150	2007	
1998	553	2008	1750
1999	1130	2009	-
2000	1200	2010	-

Cuadro 3.4. Registro de caudales máximos instantáneos río Estrella

Fuente: Standard Fruit Co. C.R.

3.1.5. Obras de mitigación contra inundaciones

Ante esta situación y con el propósito principal de salvaguardar la vida de los pobladores, la Standard Fruit Co ha tomado varias acciones no estructurales para reducir la vulnerabilidad, como la reubicación de la gran mayoría de los cuadrantes habitacionales, ha desarrollado nuevos asentamientos en sitios que ofrecen mayor protección. De igual manera y para mitigar el efecto de las inundaciones y su impacto económico tanto sobre las plantaciones de banano, como sobre el resto de las actividades económicas de la región, se han planificado y desarrollado varios proyectos estructurales para controlar la amenaza, como la restitución de la capacidad hidráulica del río Estrella mediante el proceso de limpieza de su cauce y el mantenimiento de los diques de protección. La reducción de la vulnerabilidad y el control de la amenaza conducen a una reducción importante del riesgo para las poblaciones.

En la figura 3.12 se destaca la ubicación de los diques en el área de estudio.

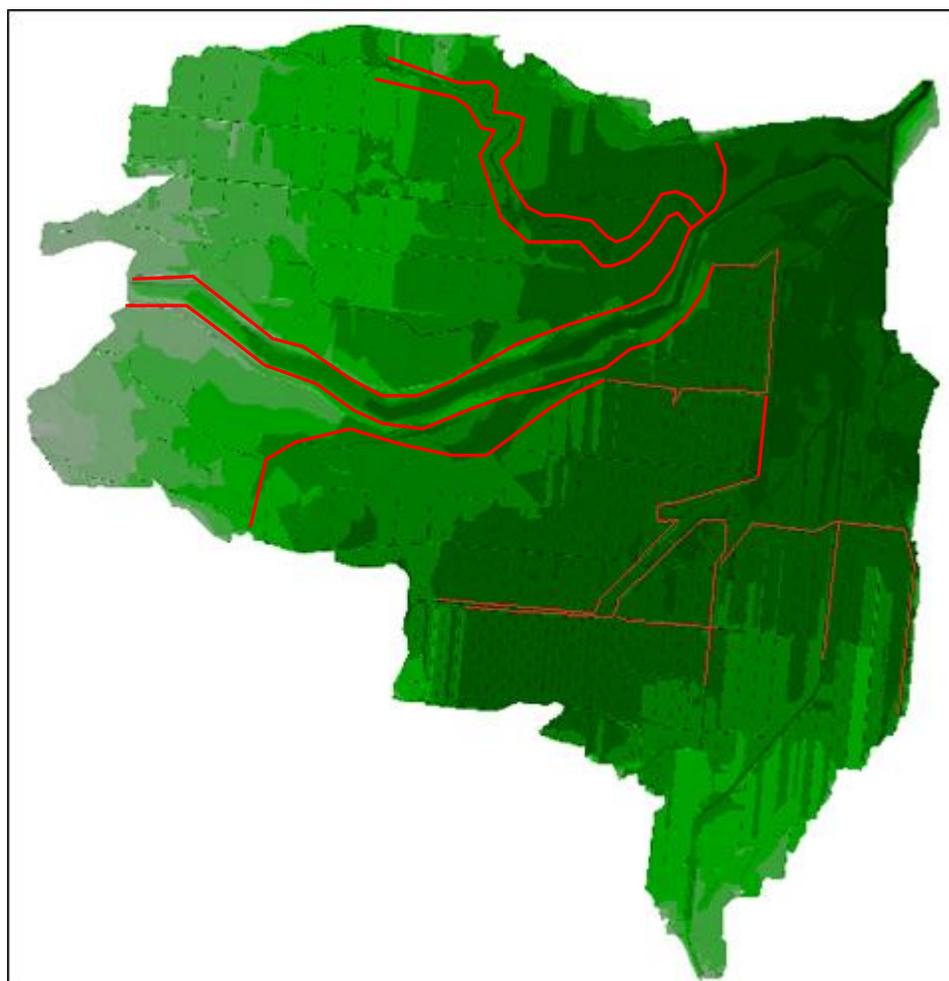


Figura 3.12. Ubicación de los diques en el área de estudio en la actualidad.

Fuente: Standard Fruit Co.

En la figura 3.13 se observan las áreas inundadas a raíz del evento del 30 de noviembre año 2002 con un caudal extraordinario de $3,496 \text{ m}^3/\text{s}$ (cuadro 3.3), al momento del evento recién se iniciaban las obras de protección, de ahí la severidad de los daños.

En primera instancia se pretendía utilizar ArcGis 10.0, debido a que es la versión más actual del programa, sin embargo no fue posible porque en ese momento la extensión de HEC-GeoRAS compatible con esta versión de ArcGis aún no estaba disponible.

Posteriormente se instaló en la máquina utilizada para la modelación la versión 9.3 de ArcGis, luego se descargó la extensión de HEC-GeoRAS compatible. Se trató de instalarla al ArcGis pero ocurría un error al final de la instalación, por lo que no fue posible usar ArcGis 9.3.

Luego se intentó instalarle a la máquina el ArcGis 9.2 pero no se logró la correcta instalación de esa versión.

Tomando en cuenta que el programa ArcGis se utilizaría para un procedimiento muy básico que consiste en la digitación de líneas y la generación de un TIN de la superficie del agua, se optó por utilizar Arc View GIS, con las extensiones, 3D Analyst, Spatial Analyst y HEC-GeoRAS.

Para la generación del TIN (Triangulated Irregular Network) del terreno se utilizó Arc GIS 10.0.

3.3. Datos recolectados en campo para realizar la modelación.

Para realizar la modelación utilizando la extensión HEC-GeoRAS, se necesita un TIN del área de estudio, de este TIN se extraen las secciones transversales del río, los bancos y de las planicies de inundación.

Así mismo se necesitan, datos de n de Manning y datos de caudal.

3.3.1. Generación del TIN

Para crear el TIN, se recopilaron puntos (x, y, z) del área de estudio. Las coordenadas utilizadas fueron Lambert Norte debido a que se incluyeron puntos que fueron tomados desde el año 1995 donde no se había hecho la convención de utilizar CRTM05. Si se transforman puntos a otro sistema de coordenadas existe un error asociado a la conversión, así mismo la empresa Consultopo, también contaba con puntos tomados recientemente en Lambert Norte, así que se decidió utilizar este último sistema de coordenadas.

Otro aspecto que cabe destacar a la hora de realizar el TIN, fue que habían levantamientos hechos por separado (archivo de diques, archivo de canales de drenaje, etc.). Por lo que se requirió hacer una compilación de toda la información existente y elaborar el TIN que incluyera todos los detalles del terreno.

La idea inicial era que se nos suministrara toda la información topográfica y generar el TIN, sin embargo el Ing. Topógrafo Martín Molina, Presidente de la empresa Consultopo, elaboró el TIN.

3.3.2. Datos de n de Manning

Para seleccionar las “n” de Manning es necesario ir al campo y recopilar imágenes del lugar para luego decidir utilizando la bibliografía disponible, qué valor se le va a dar a las “n” en cada sección.

En las visitas al campo se constató que a lo largo del río la rugosidad del cauce y de las planicies de inundación se mantiene muy similar, por lo que se decidió otorgar el mismo valor de “n” para todas las secciones. Según Chow, V T. 1959, para la figura

3.14 se pueden tener valores de “n” para las planicies de inundación de 0.05 y para el cauce de 0.035. Así mismo hay que tomar en cuenta que para el cauce aparte de la rugosidad, se pensó en que éste se encuentra afectado por un proceso de sedimentación, el cual hace que se formen depósitos que actúan como freno para el flujo del agua.

En las planicies de inundación se observan arbustos y también las plantas de banano que se pueden considerar actúan de forma similar.



Figura 3.14. Vista del Río Estrella y planicies de inundación

Fuente: Casasola, R. 2011

3.3.3. Datos de Caudal

Se utilizaron los datos del cuadro 3.5, esos datos fueron ordenados de mayor a menor y luego se calculó el periodo de retorno T con la fórmula de Weibull:

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (3.1)$$

Donde:

T= periodo de retorno.

n=número de años

m=número de orden.

Año	Caudal (m³/s)	M	T (años)
2002	3496	1	17.0
2005	2515	2	8.5
2008	1750	3	5.7
1996	1700	4	4.3
1991	1530	5	3.4
1993	1480	6	2.8
2000	1200	7	2.4
2004	1184	8	2.1
1997	1150	9	1.9
2001	1150	10	1.7
1999	1130	11	1.5
2006	1064	12	1.4
2003	950	13	1.3
1994	754	14	1.2
1992	750	15	1.1
1998	553	16	1.1
1995			
2007			
2009			
2010			

Cuadro 3.5. Cálculo de periodos de retorno

Fuente: Los Autores

Se determinaron ocho caudales para realizar una primera modelación. En primera instancia se eligió el caudal mayor y el menor, así como el siguiente caudal más grande (2515 m³/s). Luego como el resto de caudales están en rangos muy similares, se escogieron al azar utilizando números aleatorios los otros 5 caudales. Los caudales escogidos se resumen en la cuadro 3.6.

Algunos de estos caudales son muy similares, por lo que dependiendo de los resultados de la modelación, se elige qué caudales son los más representativos para generar el mapa de la superficie del agua.

Año	Caudal (m³/s)	T (años)
2002	3496	17.0
2005	2515	8.5
1996	1700	4.3
1993	1480	2.8
2001	1150	1.7
2003	950	1.3
1994	754	1.2
1998	553	1.1

Cuadro 3.6. Caudales que se introducirán en el modelo HEC-RAS

Fuente: Los Autores.

3.4. Proceso de modelación

El proceso de modelación se da en tres fases que se denominarán, Preproceso, Proceso y Postproceso. El Preproceso y Postproceso se realizan en Arc View GIS y el Proceso, que es la modelación hidráulica en HEC-RAS.

Una parte del Proceso se puede considerar como parte de la metodología, ya que hay que perfeccionar ciertos aspectos en la geometría antes de realizar la modelación, luego al introducir los caudales y analizar el comportamiento hidráulico, esto se puede considerar como parte de los resultados.

El Postproceso pertenece netamente a los resultados del trabajo de modelación, ya que lo que presenta es el mapa de la superficie del agua y hay que generar un mapa para cada caudal de interés.

3.4.1. Preproceso

En el Preproceso utilizando Arc View GIS, se crea un proyecto denominado **valle_estrella.apr**. Se crea una nueva vista denominada **Preproceso** y se carga el TIN generado por la empresa de servicios topográficos Consultopo, este TIN se denomina **Tinvalle101011**, que se muestra en la figura 3.15. Se puede observar el rango de elevaciones en el lado izquierdo de la figura que van desde 8.53-34.43 msnm.

Se nota que al lado derecho de la figura las elevaciones disminuyen hasta los 8.53 msnm y se observa el embudo natural.

Así mismo se definen muy bien los drenes, como líneas rectas formando cuadrantes.

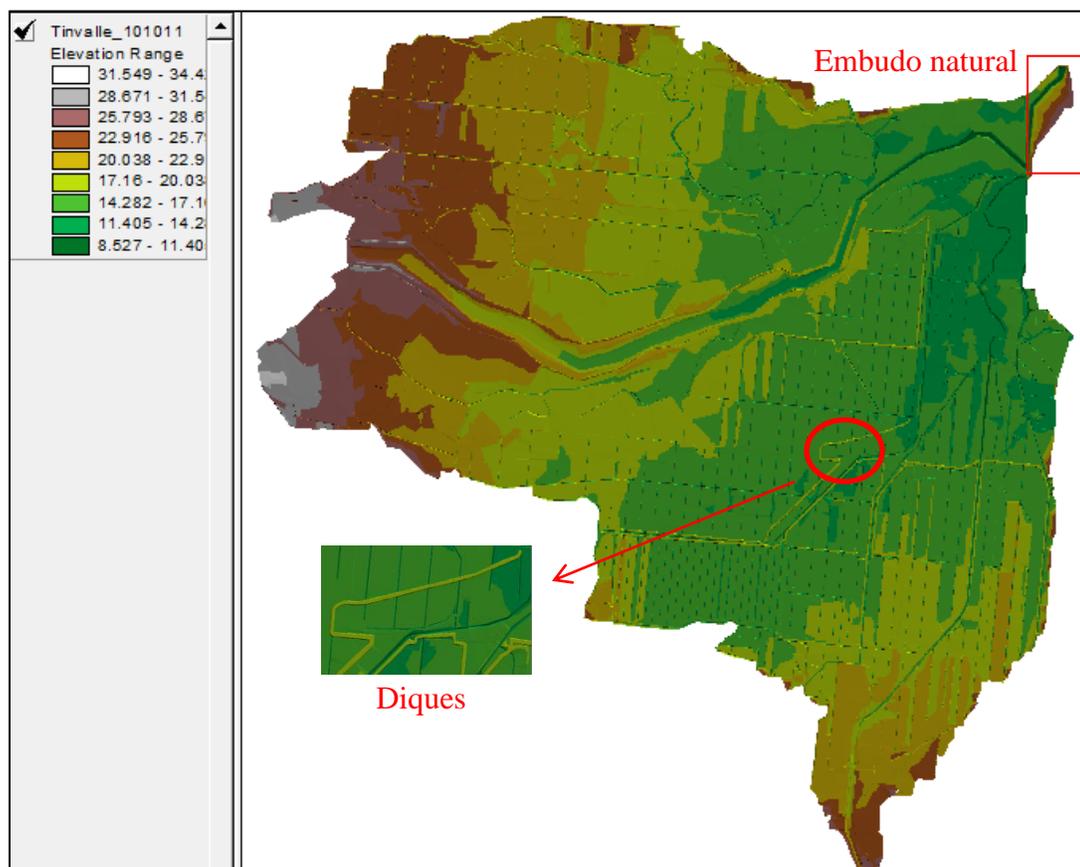


Figura 3.15. TIN del área de estudio

Fuente: Consultopo

En el Preproceso, se digitaliza la línea que define el río o la línea de centro y se le asigna el identificador “**Estrella**”, también se digitalizan los bancos como una línea que aparece en rojo, también se digitalizan los “Flowpaths” que definen el centro de masa del agua y se digitaliza siguiendo una aproximación de cómo se daría la inundación. A los “Flowpaths” se le asigna si pertenece a la margen izquierda, derecha o línea de centro.

También se digitalizan las secciones transversales, de izquierda a derecha, de aguas arriba hacia aguas abajo y tratando de que la sección sea perpendicular al flujo del agua y los “Flowpaths”.

Estas líneas digitalizadas se pueden observar en la figura 3.16.

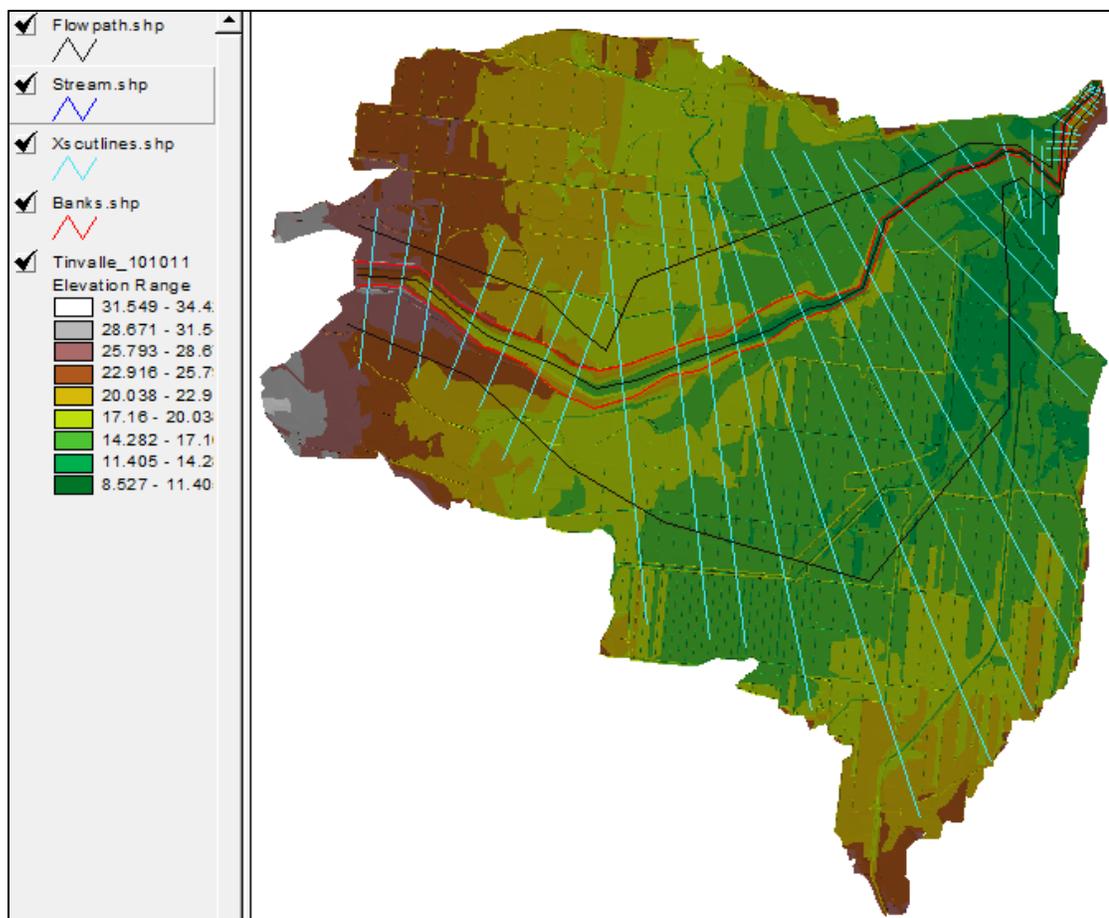


Figura 3.16. Digitalización en el Preproceso

Fuente: Los Autores

Una vez hecha la digitalización, se procede a extraer la información topográfica de las secciones y los bancos. Hecho esto se crea un archivo compatible con HEC-RAS con los datos geométricos, este archivo se denominó **Rasinput.geo**.

3.4.2. Proceso

El Proceso se realiza en HEC-RAS 4.1.0, primero se crea un proyecto **Hidraulica_Estrella_GIS.prj**

Luego se abre la ventana “**Geometric Data**” y se importa el archivo **Rasinput.geo**. Este archivo posee las secciones transversales y los bancos, como se muestra en la figura 3.17.

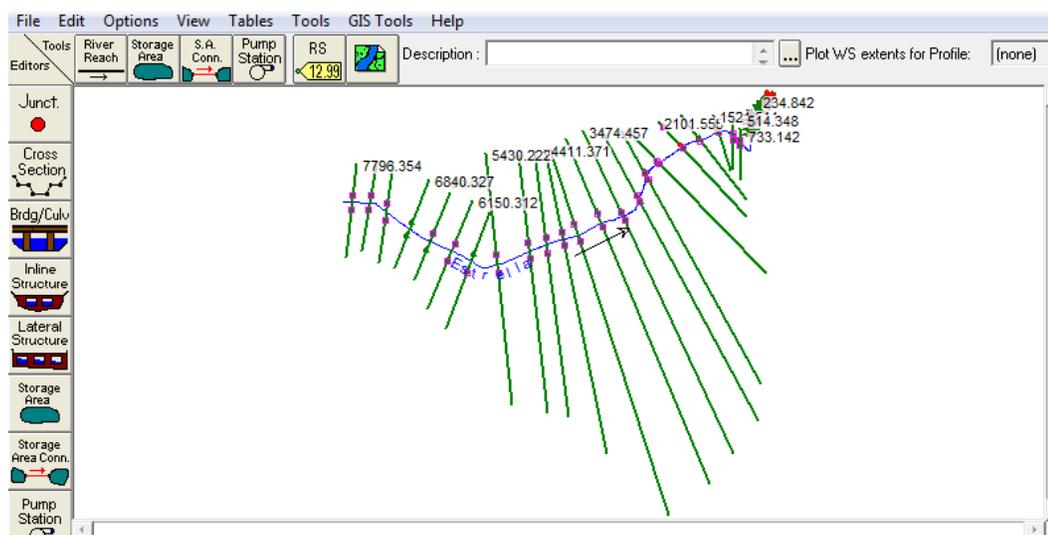


Figura 3.17. Ventana de datos geométricos importados de Arc View GIS

Fuente: Los Autores

Paso seguido se procede a definir las áreas de flujo inefectivo, que aparecen en la figura 3.18 como triángulos verdes. Los puntos rojos son los bancos que se digitalizaron, como puede observarse éstos casi coinciden con los bancos reales de la sección. Se salvó el archivo como **Geometria_Original**.

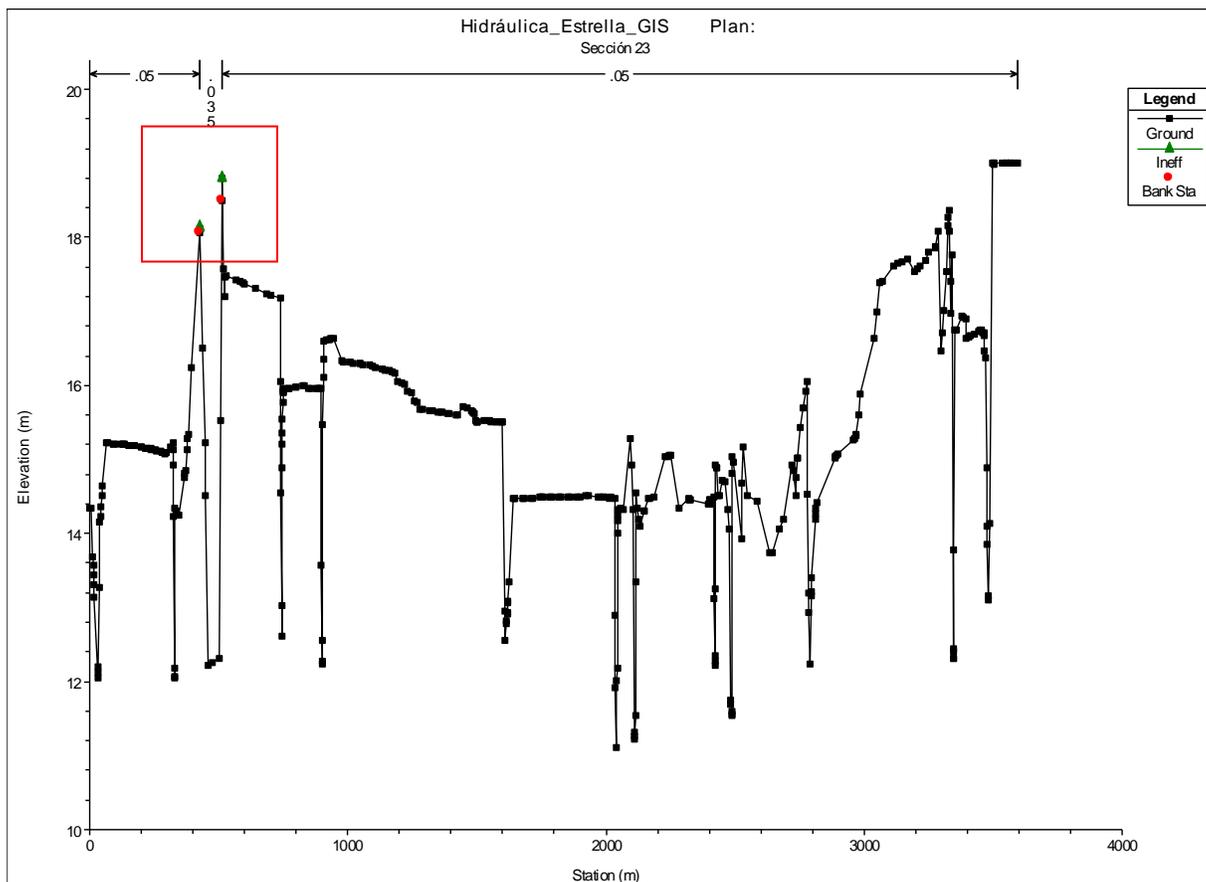


Figura 3.18. Figura de la Sección 23 sin corrección de los bancos.

Fuente: Los Autores.

Sin embargo algunos de estos bancos fueron corregidos con el grafic XS Editor y se salvó el archivo geométrico con otro nombre: **Geometria_Modificada**, esto puede observarse en la figura 3.19.

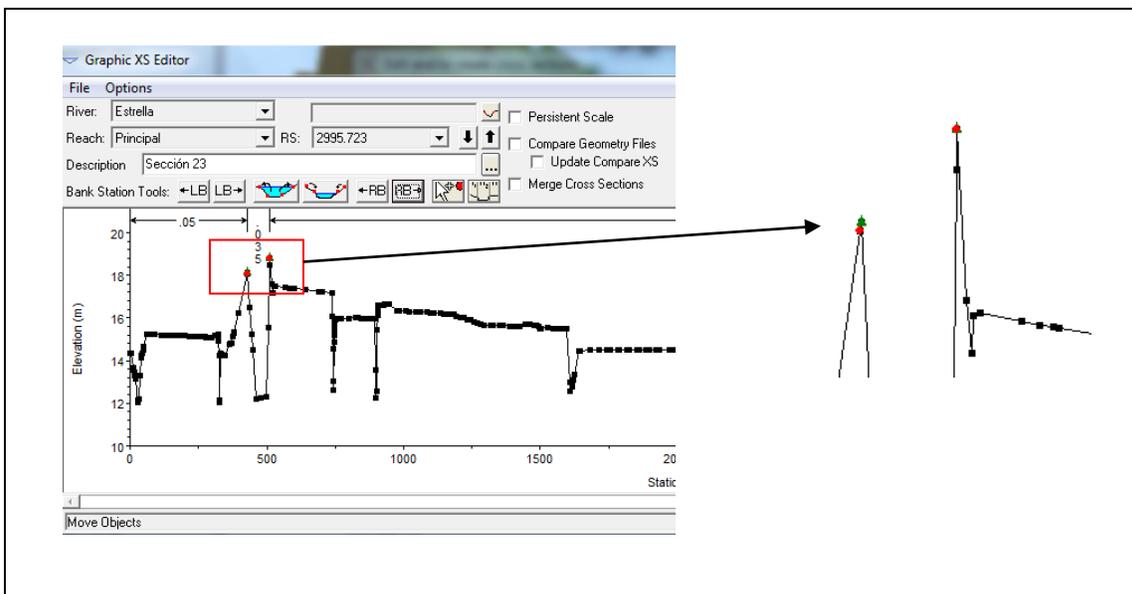


Figura 3.19. Figura de la Sección 1 con corrección de los bancos.

Fuente: Los Autores.

Una vez hechas las correcciones de la geometría, se introducen los valores de “n” de Manning definidas en el punto 3.3.2, para planicies de inundación el valor de 0.05 y para el canal 0.035.

Luego se introducen los caudales del Cuadro 3.5 y como condiciones de frontera se calculan las pendientes aguas arriba y aguas abajo.

Le pendiente se calcula con la siguiente fórmula:

$$m = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \quad (3.2)$$

Una vez introducidos todos estos datos, se procede a correr el modelo en la opción “**Steady Flow Analysis**”. Debido a las condiciones del terreno se utilizará un

régimen de **flujo mixto**, por lo cual serán necesarios ambos datos de pendiente calculados anteriormente.

a) Calibración del modelo

Es importante tener en cuenta que el modelo debe de calibrarse, para ello se utiliza un caudal conocido del cual se conocen también, las alturas que alcanzó el agua.

El caudal utilizado fue de 3496 m³/s (Cuadro 3.5). Este dato fue medido directamente en el evento del 30 de noviembre del 2002.

La validación de este caudal se obtuvo a través de la estación limnigráfica identificada como Pandora 02-02 del Instituto Costarricense de Electricidad ubicada en la comunidad de Pandora contiguo al puente; así mismo, posterior al evento se realizó el levantamiento topográfico de los niveles máximos de la inundación, mediante la ubicación en el campo de la huella máxima directamente en el campo.

La figura 3.20, muestra el hidrograma total del evento, según la curva de descarga calibrada para la estación limnigráfica Pandora 02-02 para el año 2002.

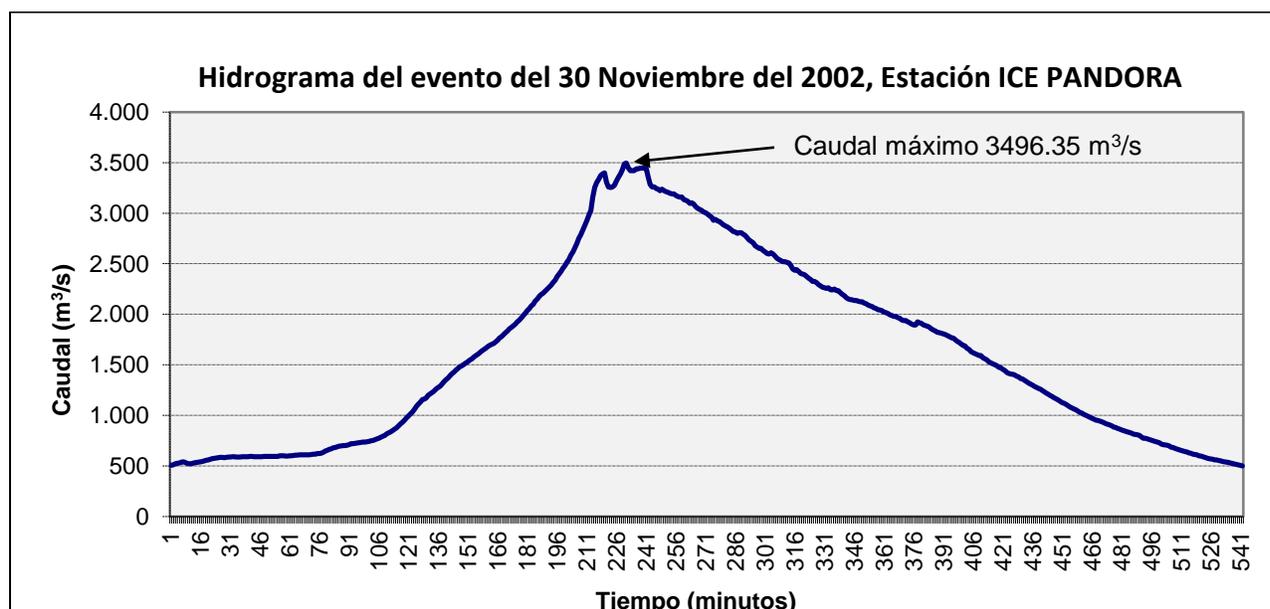


Figura 3.20. Hidrograma caudales máximos instantáneos Río Estrella, evento 30 de noviembre 2002.

Fuente: Instituto Costarricense de Electricidad.

Cabe destacar que para el momento del evento citado, aún no se contaba con muchos de los diques que existen actualmente y que aparecen en el TIN, estos diques fueron construidos basados en la altura máxima alcanzada por el agua, por lo que a la hora de calibrar el modelo estos diques son los puntos de referencia para revisar los niveles del agua.

Para realizar la calibración; se corre el modelo con este caudal y se verifican las alturas del nivel del agua en estas secciones, si estas alturas no corresponden se revisa el régimen de flujo utilizado, las “n” de Manning y las condiciones de frontera.

Así mismo es necesario revisar la tabla de “alertas” del programa, para constatar que no existan errores y perfeccionar la modelación si es del caso interpolando secciones.

Por último cuando ya se ha concluido con la modelación, se procede a crear al archivo de exportación GIS: **exporta_goriginal.rasexport.sdf** el cual cuenta con la geometría original generada en el Preproceso, también se crea otro archivo denominado: **exporta_bancos_corregidos.rasexport.sdf** el cual cuenta con los bancos corregidos en HEC-RAS, la creación de estos dos archivos se debe a que se quiere comprobar si hay alguna diferencia en el Postproceso si se utiliza una geometría con los bancos modificados.

3.4.3. Postproceso

Como se mencionó anteriormente el Postproceso muestra el mapa de las alturas del agua y se pueden visualizar las planicies de inundación en 3D.

Para iniciar el Postproceso, se vuelve al proyecto en ArcView GIS **finca_valle.apr**. Se abre el menú “postras” acá se carga el archivo: **exporta_goriginal.rasexport.sdf**, el TIN **Tinvalle101011** y se denomina a la vista **Postproceso_Q1_Orig**. Las celdas raster se dejaron un espacio de 5.

Luego se procede a que el programa lea el archivo de exportación, genere el TIN de la superficie del agua, para ello hay que escoger uno de los caudales que se han modelado, así que se escoge primero el caudal del PF_1. Por último el programa genera la delineación de las planicies de inundación con ese caudal.

Cuando ya se tiene tienen estos temas en la vista, se procede a cambiar la paleta de colores a la superficie del agua por la denominada “Sea Level”.

Por último se genera la vista en 3D de las planicies de inundación. Es importante conservar una nomenclatura coherente, ya que se deberá de generar varias ventanas de Postproceso para cada caudal de interés.

Así mismo se hará también un Postproceso para la geometría con bancos modificados para compararla con la original y ver si se presenta alguna variación ya que este tipo de programas son sensibles a los cambios.

3.5. Uso de los mapas generados en el Postproceso.

Una vez con las vistas en 3D se analizará el desempeño de las estructuras existentes y se tomarán decisiones de las acciones a emprenderse.

4. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS

4.1. Morfología básica río Estrella.

El Río Estrella posee una longitud aproximada a los 48 km, una altura mínima de 10 msnm y una máxima de 2,400 msnm, para una pendiente media de 5 %.

El Río Estrella presenta en su parte alta, pendientes fuertes y sección transversal tipo “V” característico de los río Jóvenes, con energía suficiente para arrastrar sedimentos gruesos. Al ingresar al sector de la finca Valle La Estrella presenta un cambio brusco de pendiente, pasando a ser relativamente baja, esta característica favorece la deposición de los sedimentos arrastrados desde las partes altas, lo cual disminuye significativamente la capacidad hidráulica en el sector de estudio, situación que aunada al efecto de remanso provocado por el embudo natural, ha incrementado el riesgo y la frecuencia de las inundaciones.

4.2. Preproceso.

Como se explicó en la metodología (punto 3.4.1) se digitalizó el río Estrella, los bancos, los “flowpaths” y las secciones transversales. Luego se generaron los temas “**Stream3d**” y “**Xscutlines3d**”. Con esto se generó con éxito el archivo “**rasinput.geo**”.

4.3. Proceso

Con el programa HEC-RAS 4.1.0, en la pantalla de geometría se importó el archivo “**rasinput.geo**”.

Este archivo geométrico se denominó “original” y de ahí se obtuvieron 34 secciones transversales. Los nombres son asignados automáticamente en el Preproceso.

En la figura 4.1 se observa el esquema de la geometría importada. La flecha indica la dirección del flujo y por lo tanto cuál será la margen izquierda y la derecha.

Los puntos rojos son los bancos que se digitalizaron como líneas en el Preproceso.

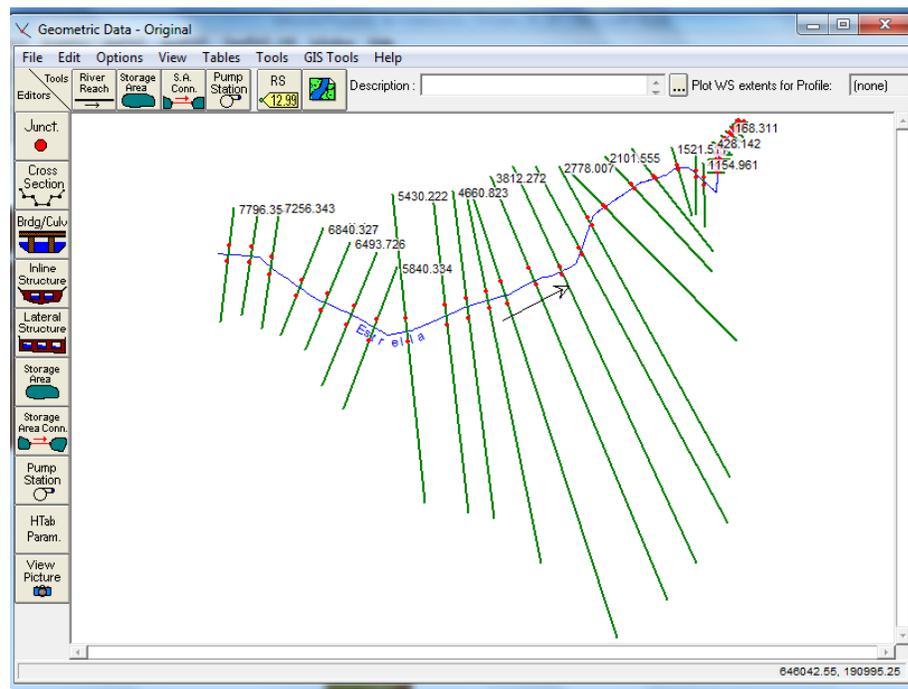


Figura 4.1. Esquema de la geometría importada del formato GIS

Así mismo en el cuadro 4.1 se observan las estaciones aguas arriba hacia aguas abajo donde se pueden constatar las distancias entre secciones los bancos y el canal

principal. Estas distancias van desde los casi 500 m hasta los 23.66 m en el canal principal.

Las secciones que se encuentran al final, cerca del embudo, están trazadas más cercanas entre sí, además son más cortas ya que el TIN en ese sector es bastante angosto.

Se puede también calcular por medio de la tabla la longitud del tramo modelado, ésta corresponde a 7705.15 m aproximadamente.

Cuadro 4.1. Secciones y distancias de las secciones transversales del río Estrella, ubicadas de aguas arriba hacia aguas abajo.

N°	Estación	Longitudes (m)		
		Banco Izquierdo	Canal	Banco Derecho
34	7.796.354	284.164	262.404	251.963
33	7.533.950	249.824	277.607	270.374
32	7.256.343	520.59	416.016	283.545
31	6.840.327	365.116	346.601	334.095
30	6.493.726	356.574	343.415	346.209
29	6.150.312	340.529	309.978	327.533
28	5.840.334	99.376	410.112	637.736
27	5.430.222	474.363	498.082	507.721
26	4.932.140	260.304	271.317	273.277
25	4.660.823	212.459	249.452	289.256
24	4.411.371	152.167	217.406	280.121
23	4.193.964	337.501	381.692	423.55
22	3.812.272	321.962	337.815	363.456
21	3.474.457	278.487	347.727	345.529
20	3.126.730	259.964	348.723	309.446
19	2.778.007	178.978	268.819	491.416
18	2.509.188	424.764	407.634	430.312
17	2.101.555	310.223	280.508	255.119
16	1.821.046	374.204	299.536	158.303

15	1.521.511	253.011	247.513	88.573
14	1.273.997	125.295	119.036	102.09
13	1.154.961	171.136	421.819	472.074
12	733.142	91.071	88.883	88.56
11	644.259	61.108	61.259	61.266
10	583.001	82.257	68.652	60.86
9	514.348	123.424	86.207	54.666
8	428.142	121.462	113.293	106.148
7	314.849	81.238	80.007	80.388
6	234.842	69.229	66.53	62.462
5	168.311	39.62	44.657	46.504
4	123.654	33.721	44.379	51.917
3	79.274	20.847	30.866	38.565
2	48.409	17.823	23.669	28.852
1	24.740	12.286	24.74	36.125

Fuente: Los Autores.

En el cuadro 4.1, se puede ver en la última sección #1, que las distancias no son cero, debido a que la última sección no coincide totalmente con el final de la línea de centro del río que fue digitalizada. Si se cambian estas distancias por cero, no se afecta en nada las alturas del agua en las secciones a la hora de correr el programa.

En la figura 4.2 se observa la sección 7796.354, que es la sección # 34 de aguas arriba hacia aguas abajo. Siempre se ordenan de mayor a menor de aguas arriba hacia aguas abajo.

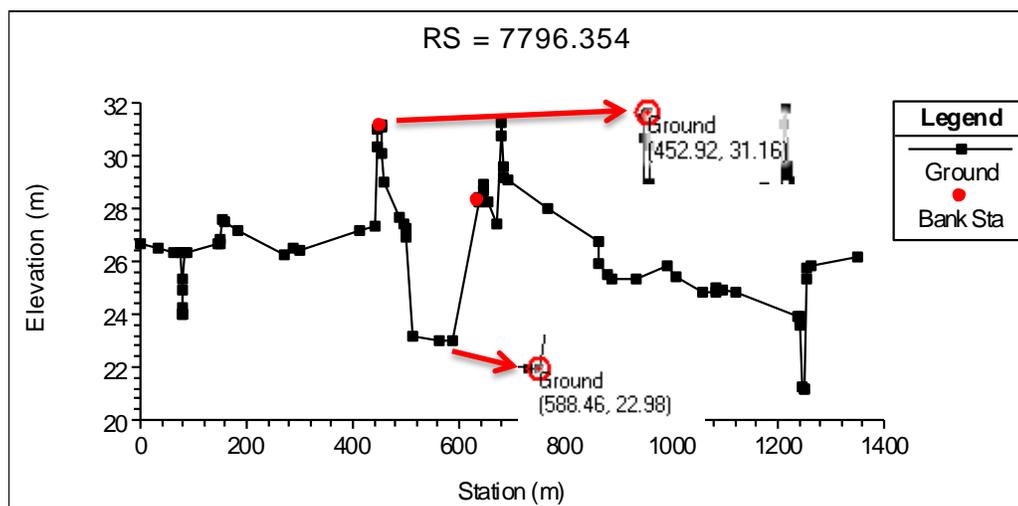


Figura 4.2. Sección 7796.354, correspondiente a la sección #34

Fuente: Los Autores.

Se observa que la digitalización de los bancos fue muy precisa. Así mismo gracias al TIN, se puede hacer la sección tan larga como lo permita el TIN, en este caso la sección mide 1348.5 m de largo aproximadamente y cuenta con 73 puntos.

Se puede observar también al comparar la sección #34 con la figura 4.3, que corresponde a una sección medida directamente en el terreno, en un sector muy cercano, que las alturas y la forma corresponden bastante bien. Esta comparación se hizo con otras secciones aguas abajo y se observa un resultado similar. En los anexos se adjuntan las secciones generadas en el Proceso y las secciones tomadas en el campo.

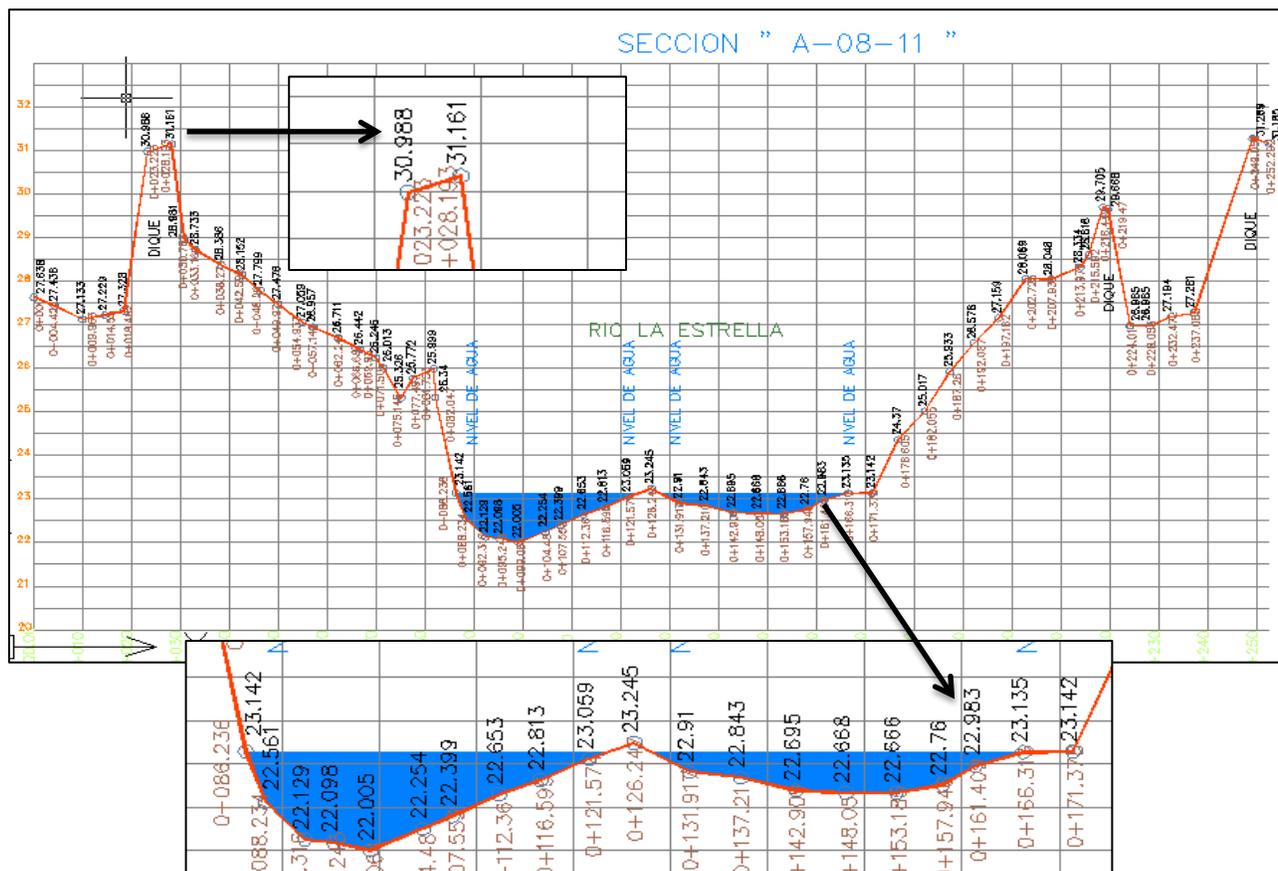


Figura 4.3. Sección tomada en el campo aguas arriba del río Estrella.

Una vez corregidos los bancos, introducidas las “n” de Manning en la geometría, se filtró con la herramienta “**Cross Section Points Filter**” los puntos de las secciones 4175.970 (de 509 a 330), la 3795.499 (de 617 a 373), la 3460.419 (de 578 a 340) y la sección 3109.649 (534-281). Esto ya que el programa tiene capacidad solo de manejar secciones máximo de 500 puntos.

Las secciones indicadas se digitalizaron bastante amplias, debido a que ese sector se ha visto muy afectado por las inundaciones y por lo tanto se quiere generar un mapa que abarque este sector.

Luego se introdujo el caudal designado como caudal de calibración (3496 m³/s) y las siguientes condiciones de frontera calculadas con la fórmula 3.1

Para aguas arriba:

$$m = \frac{23.51 - 23,2}{134.043} = 0.002$$

Para aguas abajo:

$$m = \frac{9.30 - 9.295}{3.305} = 0.001$$

4.4. Calibración del modelo

La calibración es el paso más importante del proceso de modelación. Durante esta etapa se puede corroborar si las condiciones establecidas en el modelo son las adecuadas para simular una situación de modo que el resultado sea coherente con la realidad.

Como se explicó anteriormente el caudal de calibración es de 3496 m³/s. Esto debido a que se tienen registros de las alturas que alcanzó el agua con ese caudal a lo largo del tramo estudiado.

Utilizando un régimen de flujo mixto, se corrió el modelo. Primero se observó la altura del agua en cada sección y se procedió a definir las áreas de flujo inefectivo.

En la figura 4.4 se observa que el agua no supera el dique, por lo que se definieron los puntos del dique como zonas de flujo inefectivo, el resultado de esto se aprecia en la figura 4.5, donde el agua que no supera el dique queda achurada con líneas verdes.

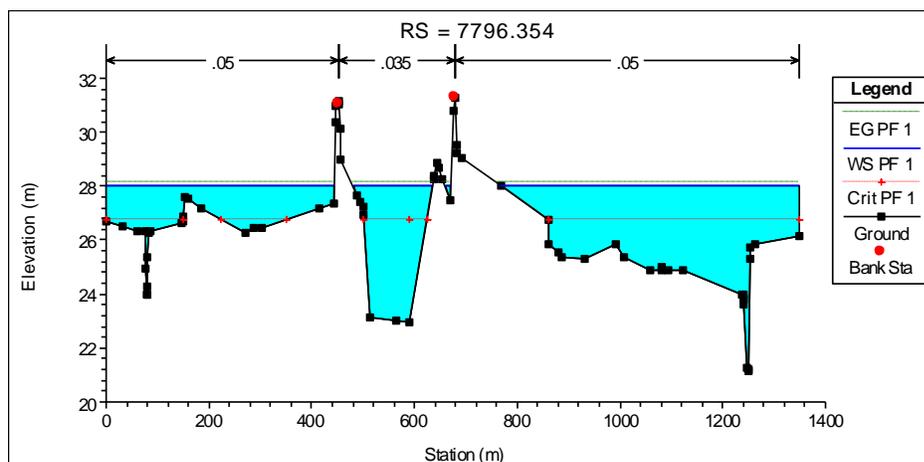


Figura 4.4. Sección 7796.354 (sección 34) con el caudal de calibración

Fuente: Los Autores.

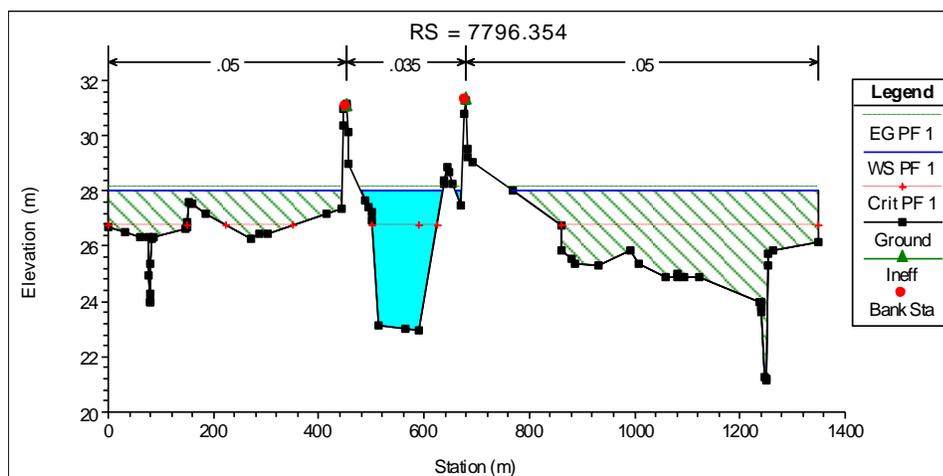


Figura 4.5. Sección 7796.354 (sección 34) con las áreas de flujo inefectivo definidas.

Fuente: Los Autores.

Este procedimiento se realizó para las 34 secciones transversales.

Luego se revisó la lista de alertas y se localizaron las secciones donde la ecuación de la energía no logró ser balanceada. Esto sólo ocurrió en la sección 7533.950 (sección 33). La ecuación logró ser balanceada al hacer una interpolación entre esta sección y la sección siguiente aguas abajo, 7.256.343 (sección 32), cada 3 m.

Para llegar a esta distancia se realizaron diversas interpolaciones aguas arriba y aguas abajo utilizando diferentes distancias.

Luego se revisó sección por sección las alturas de los niveles del agua. Las secciones 34-30 no se desbordaron pero los niveles alcanzados por el agua fueron más altos que los reales.

En las secciones de la 29 a la 8, la altura del agua rondó los 24 msnm, lo cual es erróneo, ya que en ese sector hasta finalizar con la sección 1 la cota máxima fue de 22 msnm.

Para ilustrar esta situación se puede observar la figura 4.6 que corresponde a la sección 428.142 (sección 8), ubicada aguas abajo del puente de Atalanta.

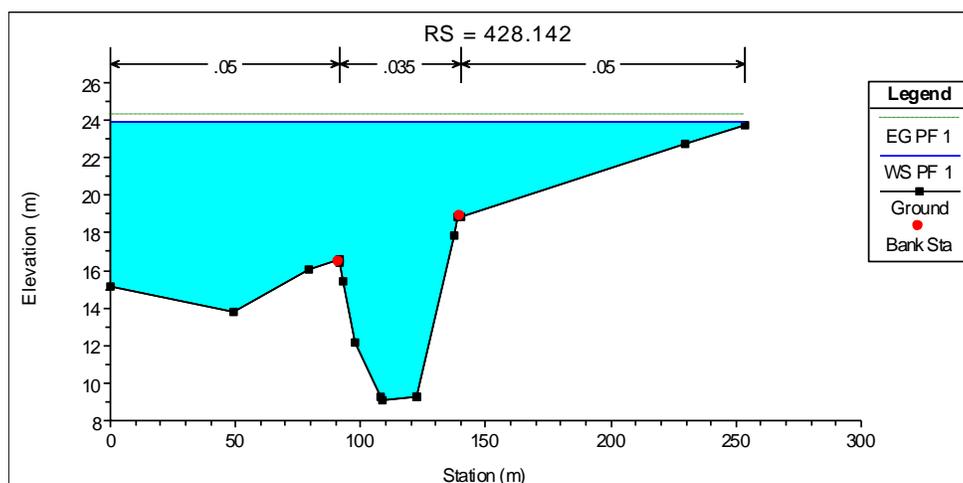


Figura 4.6. Sección 428.142 (sección 8), con el caudal de calibración.

Fuente: Los Autores.

Las secciones 7-1 tuvieron una altura que rondó los 20 msnm.

También se analizó la gráfica del perfil del agua correspondiente a la figura 4.7, la cual ilustra bastante bien el comportamiento de la inundación en la realidad; en la figura se observa una caída al llegar al embudo natural, donde la velocidad debe de aumentar para pasar, así mismo se nota el remanso en la parte central.

El inicio del tramo en estudio aguas arriba, corresponde a una transición entre la salida del río del sector montañoso y el ingreso a la zona de llanura del Valle La Estrella propiamente, por lo que el río pasa de una pendiente fuerte a una pendiente casi plana, lo cual se evidencia por el aporte de sedimentos de diámetro variado.

El tramo en estudio inicia con una pendiente cercana al 2 ‰ hasta el puente de Atalanta, para pasar luego a una pendiente del 1 ‰ hasta el puente de hamaca en Pandora, sitio donde se ubica el embudo natural.

El análisis de la información de campo recolectada con motivo de las inundaciones, ha permitido comprobar y determinar el efecto regulador que ejerce este embudo natural sobre la forma en la que se descargan la avenidas, según las características del evento climático y el caudal de descarga, de tal forma que cuando los caudales no superan la capacidad de descarga del embudo, no se observa efecto de remanso ya que el río fluye con libertad, mientras que cuando los caudales superan la capacidad de descarga el embudo, se presenta el efecto de remanso en las cercanías del embudo, observándose una alternancia entre descarga y remanso según la presencia o ausencia de equilibrio de la pendiente de energía de la corriente principal.

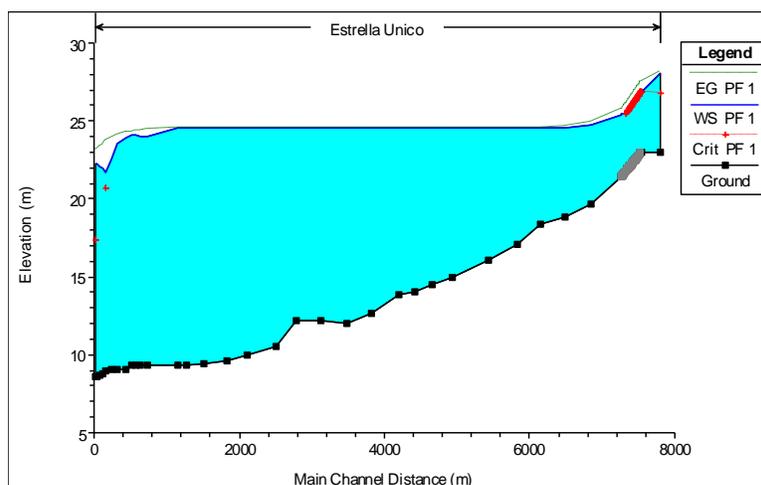


Figura 4.7. Gráfica del perfil del agua con el caudal de calibración
Fuente: Los Autores.

La gráfica muestra el comportamiento de la corriente principal al inicio con pendiente fuerte, pendiente suave durante el tramo y el efecto regulador del embudo natural al final del tramo en estudio.

Para lograr calibrar el modelo se realizaron varias pruebas, cambiando pendientes, “n” de Manning, regímenes de flujo y coeficientes de expansión y

contracción en donde el cauce se reduce de ancho. Sin embargo esto no produjo resultados significativos. Por lo que se tomó la decisión de volver al Proceso y digitalizar más secciones.

4.4.1. Segundo Preproceso y Proceso para calibración: digitalización secciones transversales adicionales.

En la digitalización de las nuevas secciones en el proceso, se conservaron los temas Stream, Banks y Flowpaths, se conservaron las secciones originales y se le agregaron secciones entre éstas. Luego se procedió a generar un nuevo archivo de exportación a HEC-RAS 4.1.0.

Al realizar la importación se creó la geometría que se observa en la figura 4.8, que consta de 100 secciones transversales, esto quiere decir que se digitalizaron 66 secciones más.

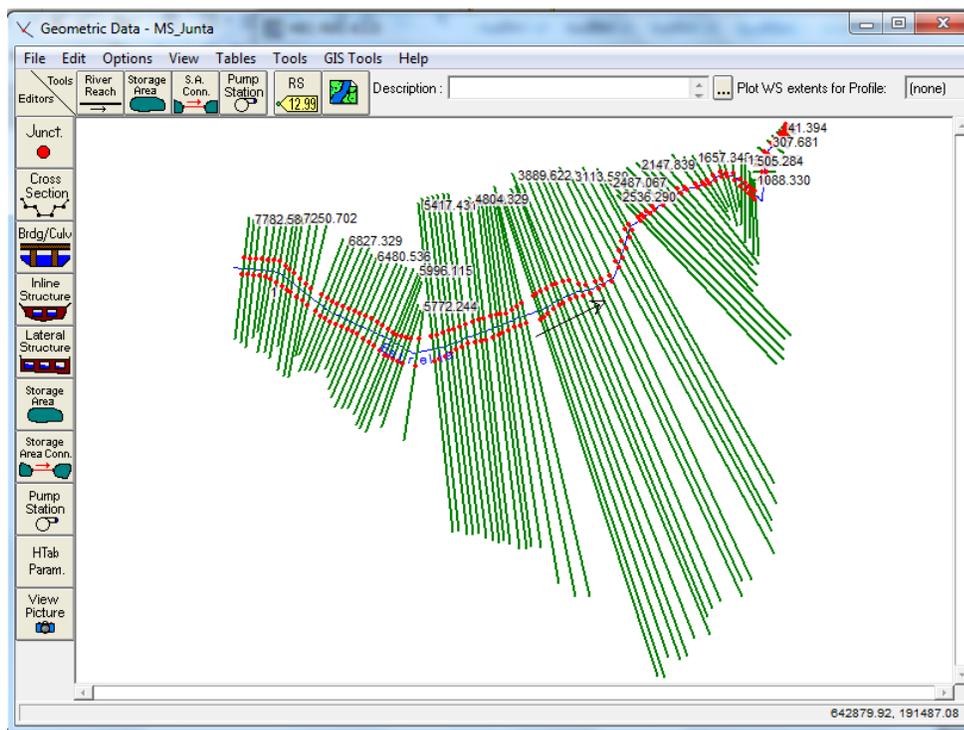


Figura 4.8. Nueva geometría para calibración

Fuente: Los Autores.

Se hizo el mismo procedimiento descrito anteriormente para lograr analizar los resultados. Sin embargo no hubo una variación significativa en las alturas del agua, incluso la sección 428.142 (sección 8) la altura permaneció exactamente igual. Esto se puede observar en la figura 4.9 que corresponde a la misma sección pero fue renombrada en el Preproceso como sección 420.782

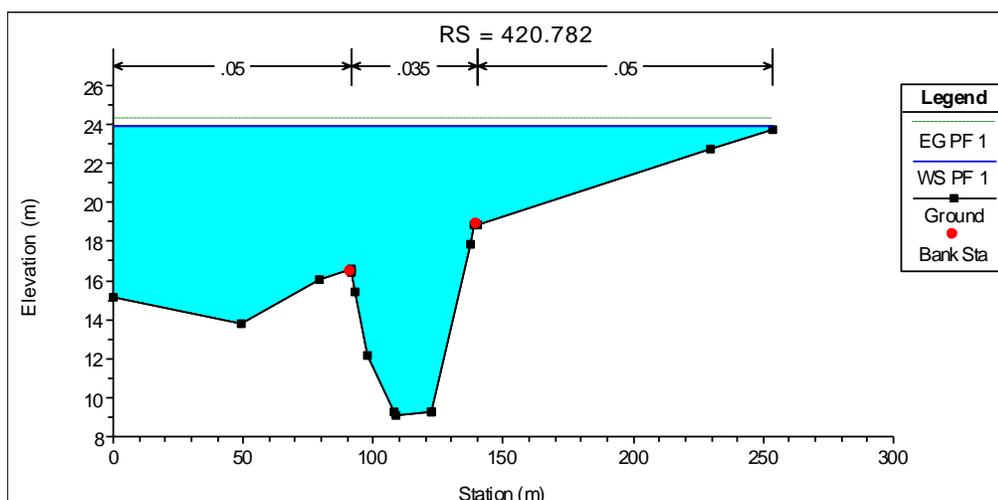


Figura 4.9. Sección 420.782 que corresponde a la sección 428.142 (sección 8) del primer Preproceso.

Fuente: Los Autores.

Otro aspecto que se consideró para realizar la calibración fue utilizar la opción **“Set Internal Changes in WS and EG”** ubicada en la ventana “Reach Flow Data”. Sin embargo se descartó esta elección ya que estos cambios solo se garantizan que sean válidos para el caudal modelado y la intención es que el modelo muestre las condiciones más próximas a la realidad con cualquier caudal.

4.4.2. Tercer Preproceso y Proceso para la calibración del modelo: digitalización del río Estrella por segmentos

Como no se logró la calibración añadiendo nuevas secciones transversales; se regresó al Preproceso y se decidió digitalizar el río por segmentos, los segmentos serían definidos por cambios de pendiente y forma y así analizarlos por separado ya que HEC-RAS 4.1.0 no admite “junctions” en el mismo tramo de río, además si se renombra el río en cada tramo, solamente se pueden poner las condiciones de frontera en el tramo 1 y 5 y lo único que podría variarse sería el caudal.

Igualmente se conservaron los bancos, las secciones y se cambió la línea de centro tema Stream y los Flowpaths, debido a que este tema copia la línea de centro.

Al final se crearon 5 segmentos de río, los cuales al ser importados desde HEC-RAS 4.1.0, se demuestran con 4 nudos o “junctions” que van del 2 al 5. Esto se aprecia en la figura 4.10 como los números en rojo encerrados en círculos en un acercamiento de la geometría.

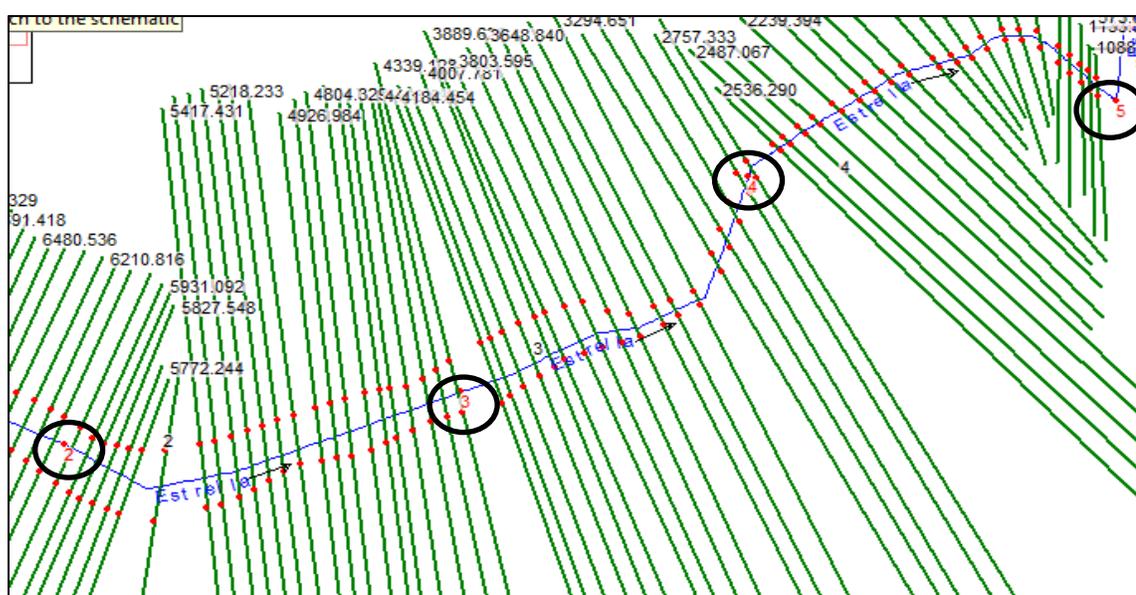


Figura 4.10. Acercamiento de la geometría con los 4 nudos en la línea de centro.
Fuente: Los Autores.

Luego se procedió a crear 5 archivos geométricos, uno para cada tramo, para cada uno de estos se recalculó la pendiente y se modeló por separado, igualmente se analizó la lista de alertas de cada tramo y se balanceó la ecuación de la energía por medio de interpolaciones.

a) Calibración para el Tramo 1

El tramo 1 cuenta con 24 secciones transversales y una longitud de 1666.23 m. Comienza con la sección 7782.586 y termina en la sección 6074.098. El esquema de este tramo se muestra en la figura 4.11.

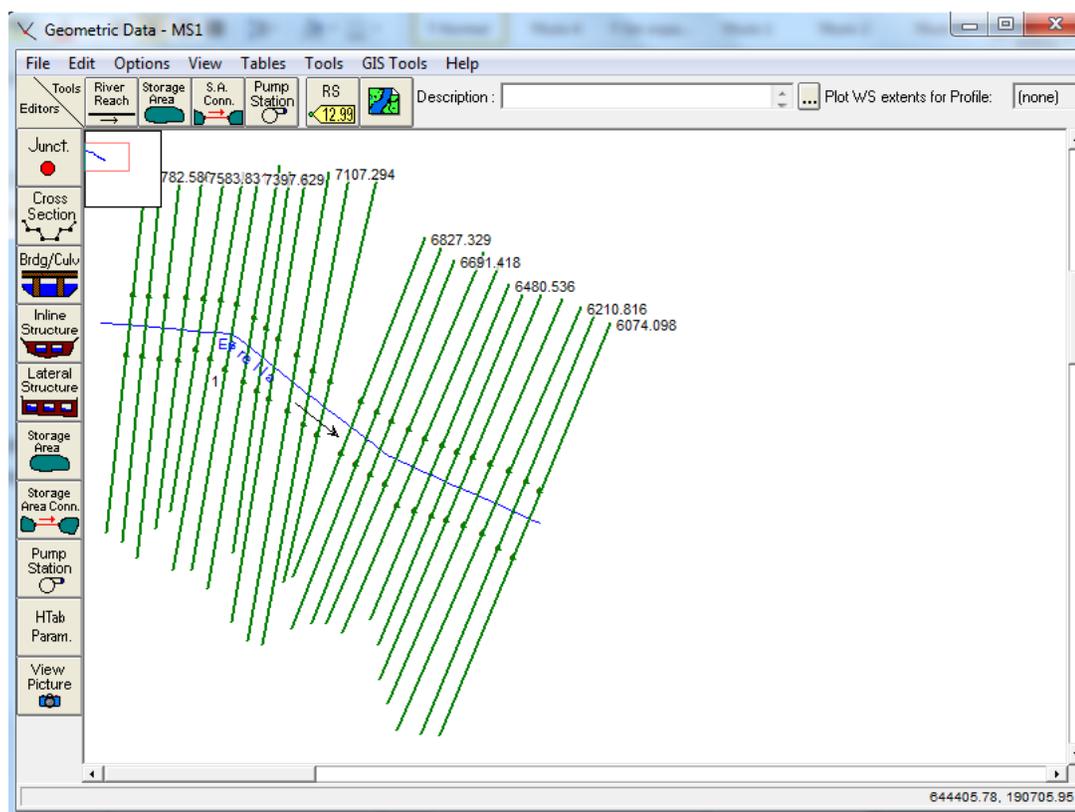


Figura 4.11. Esquema del río Estrella para el tramo 1.

Fuente: Los Autores.

Al realizarse la modelación se puede observar en la figura 4.12, que la profundidad del agua aumenta con respecto a la modelación del tramo completo en la sección 7782.586 que es la primera sección aguas arriba.

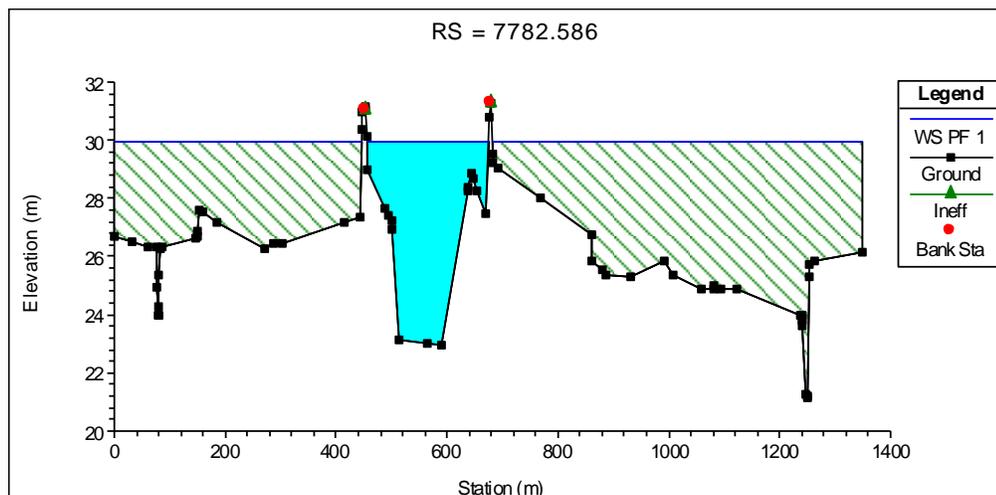


Figura 4.12 Sección 7782.586 del Tramo 1 que corresponde a la primera sección aguas arriba.

Fuente: Los Autores

La figura 4.13 muestra la última sección aguas abajo del Tramo 1, para lograr calibrar el modelo se eliminaron las últimas dos secciones, ya que la ecuación de la energía no logró ser balanceada. En la modelación del río completo, el agua sobrepasó el banco izquierdo, lo cual según las observaciones en el evento no sucedió.

La altura alcanzada en la modelación del Tramo 1 en esta última sección concuerda con lo sucedido en el evento.

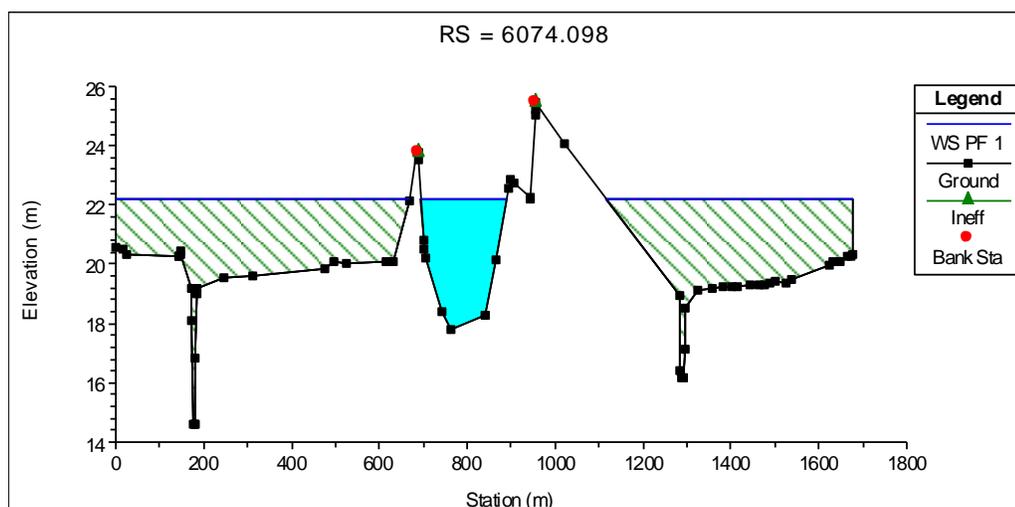


Figura 4.12 Sección 6074.098 del Tramo 1 que corresponde a la última sección aguas abajo.

Fuente: Los Autores.

En la figura 4.13 se muestra el perfil de la altura del agua en el Tramo 1. Donde los niveles del agua decrecen desde los 30.04 a los 24.75 msnm con fluctuaciones que se asemejan a la forma del terreno sin presentarse condiciones de flujo rápidamente variado. Así mismo se eliminó la sección 7520.998, ya que se intentó balancear la ecuación de la energía en ese punto, por medio de interpolaciones se logró, pero el perfil del agua presentó un salto hidráulico y muchas variaciones en la altura del agua.

La línea roja representa el perfil del agua una vez eliminadas las secciones que no se lograron interpolar. La diferencia en el perfil del agua en ambas modelaciones es grande, el perfil que se representa con la línea roja es el que produce variaciones menos drásticas en la altura del agua y sus velocidades, así que se optó por conservar la geometría que produce este perfil.

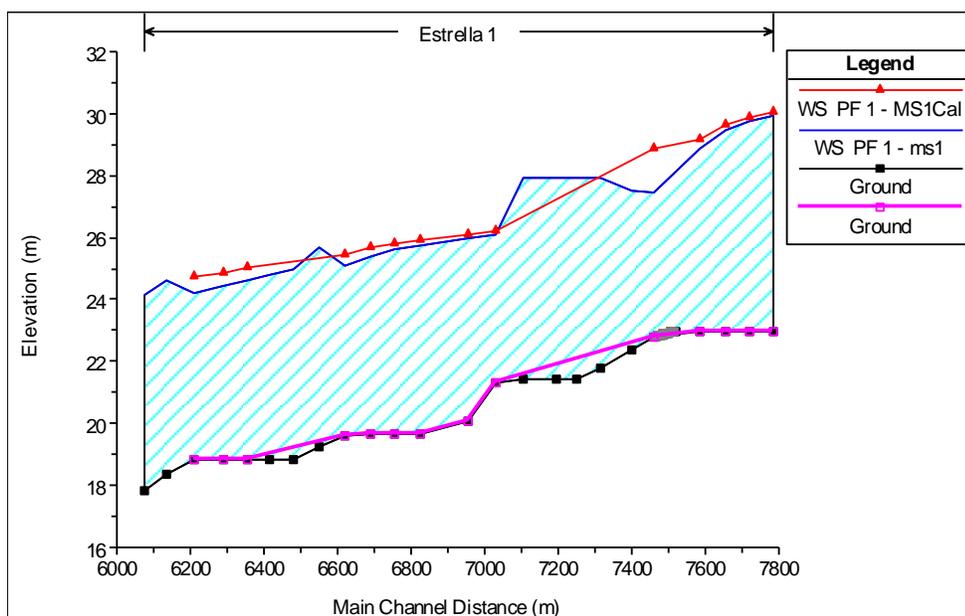


Figura 4.13. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 1

Fuente: Los Autores.

En el cuadro 4.2 se presentan los parámetros hidráulicos para el Tramo 1; se nota que se eliminaron 10 secciones, como se mencionó anteriormente, tres de ellas presentaban problemas para balancear la ecuación de la energía, las otras siete presentaron subidas drásticas en el nivel del agua, lo cual provocaba un desbordamiento que no ocurrió en la realidad, al ser eliminadas no sucedió ningún problema a la hora de balancear la ecuación de la energía, ni tampoco se trasladó el problema a las secciones contiguas.

Las velocidades también lograron ser más coherentes, ya que estaban en el rango de los 1.04-1.7 m/s, muy alejadas de los rangos presentados en las otras secciones.

Cuadro 4.2. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 1

Estación	Elevación del nivel del agua (msnm)	Velocidad en el canal (m/s)	Área del flujo (m ²)
7.782.586	30.04	3.66	954.73
7.720.951	29.87	3.71	943.55
7.655.655	29.61	3.89	899.84
7.583.831	29.18	4.3	813.81
7.458.597	28.86	3.97	881.71
7.027.953	26.22	5.5	635.76
6.955.951	26.11	4.76	733.94
6.827.329	25.93	4.01	872.22
6.755.928	25.8	3.84	910.97
6.691.418	25.66	3.81	916.55
6.619.601	25.43	3.91	895.1
6.356.540	25.01	3.26	1072.65
6.288.424	24.88	3.28	1066.36
6.210.816	24.75	3.24	1080.55

Fuente: Los Autores.

De esta forma se logró la calibración para el Tramo1

b) Calibración para el Tramo 2

El Tramo 2 cuenta con 24 secciones y una longitud de 1506.605 m. La sección inicial es 5995.115 y la sección final es la 4339.128.

En la figura 4.14 se observa el esquema geométrico del Tramo 2, el cual posee secciones bastante largas en la margen derecha.

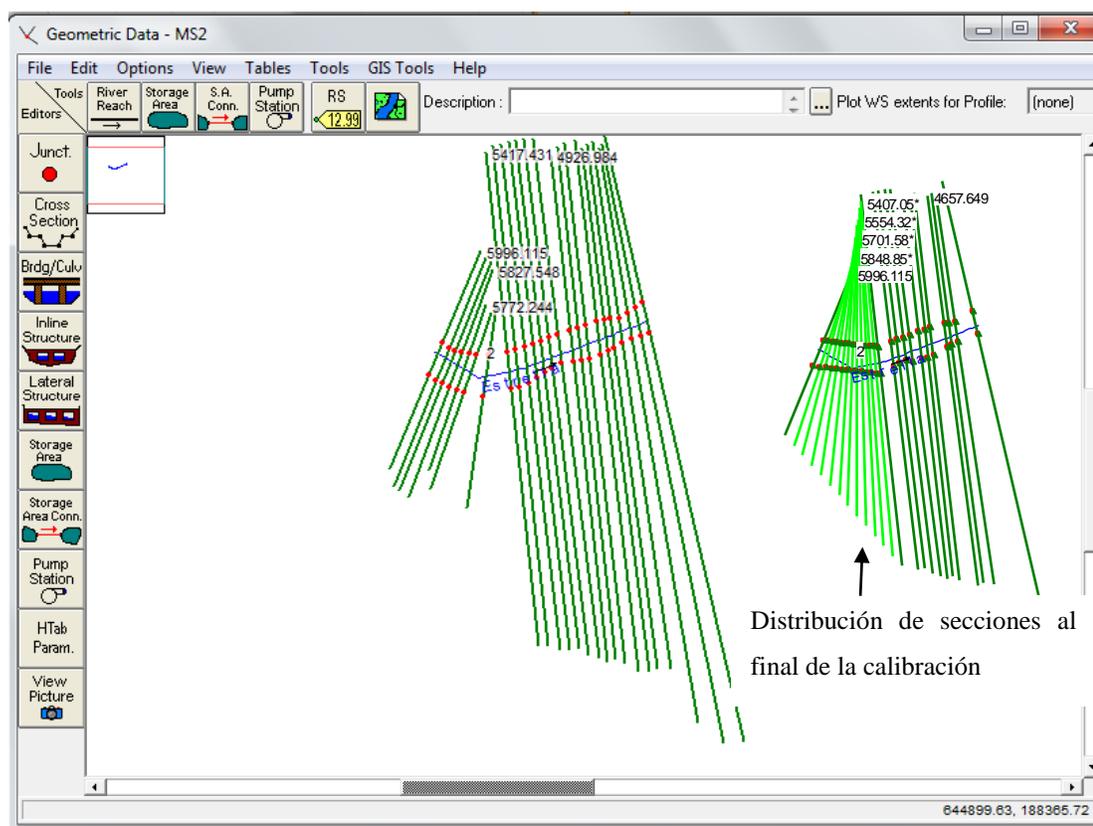


Figura 4.14. Esquema geométrico del Tramo 2

Fuente: Los Autores

En el Tramo 2 ocurre una situación similar a la del Tramo 1; se hizo un proceso de eliminación de las secciones donde no se logró balancear la ecuación de la energía y aquellas secciones donde el agua se desbordaba y que en la realidad no sucedió, al final quedaron 13 secciones transversales.

Algo interesante de destacar es que se eliminaron las secciones entre la sección 5996.115 y la sección 5357.971; al hacer esto no se lograba balancear la ecuación de la energía en la primera sección, además que también se desbordaba, por lo que se hizo una interpolación cada 50 m, lo cual permitió balancear la ecuación y que el agua no se desbordara. Al ver la Figura 4.14, se nota que la distribución de las secciones

interpoladas es muy diferente al de las secciones digitalizadas cubriendo mucho mejor el área.

En las figuras 4.15 y 4.16 que corresponden a la primera y última sección del Tramo 2 se observa el resultado al final de la calibración.

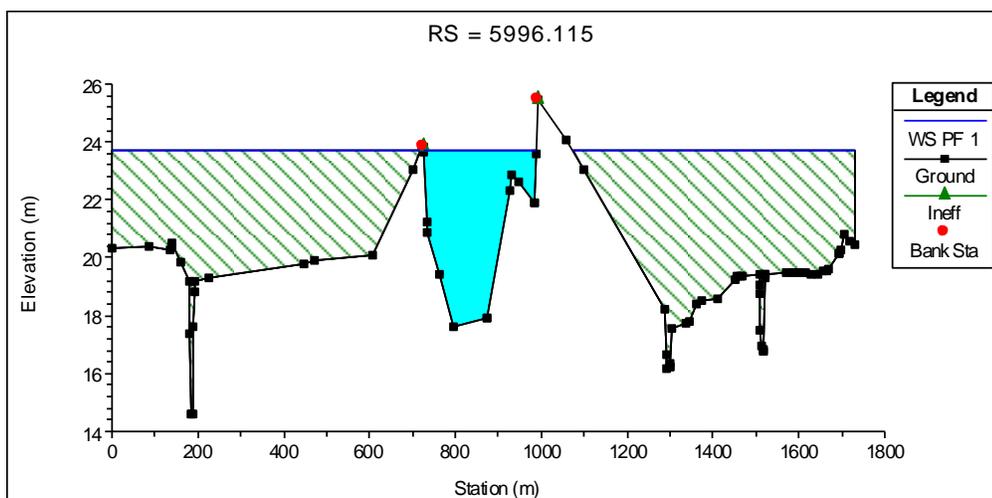


Figura 4.15. Sección 5996.115 del Tramo 2 que corresponde a la primera sección aguas arriba.

Fuente: Los Autores.

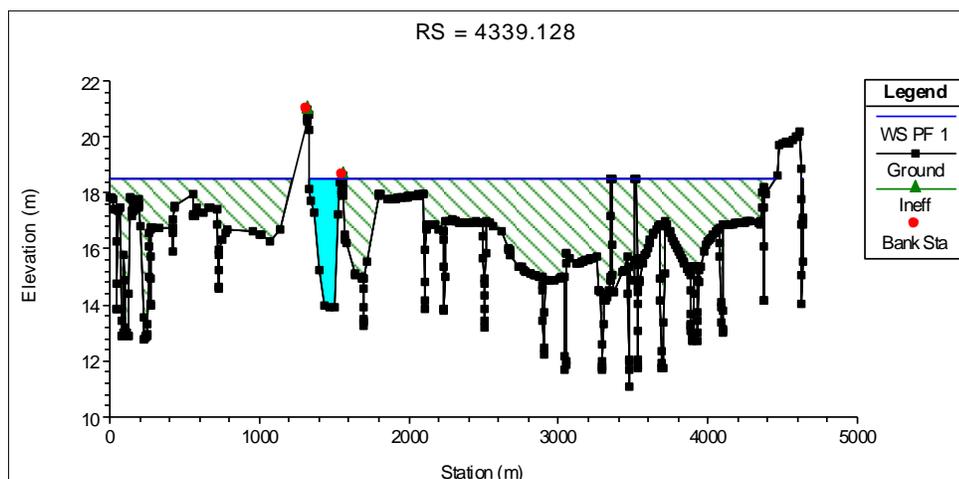


Figura 4.16. Sección 4339.128 del Tramo 2 que corresponde a la última sección aguas abajo.

Fuente: Los Autores.

En la figura 4.17 se aprecia el perfil del agua del Tramo 2 con una tendencia similar al del Tramo 1

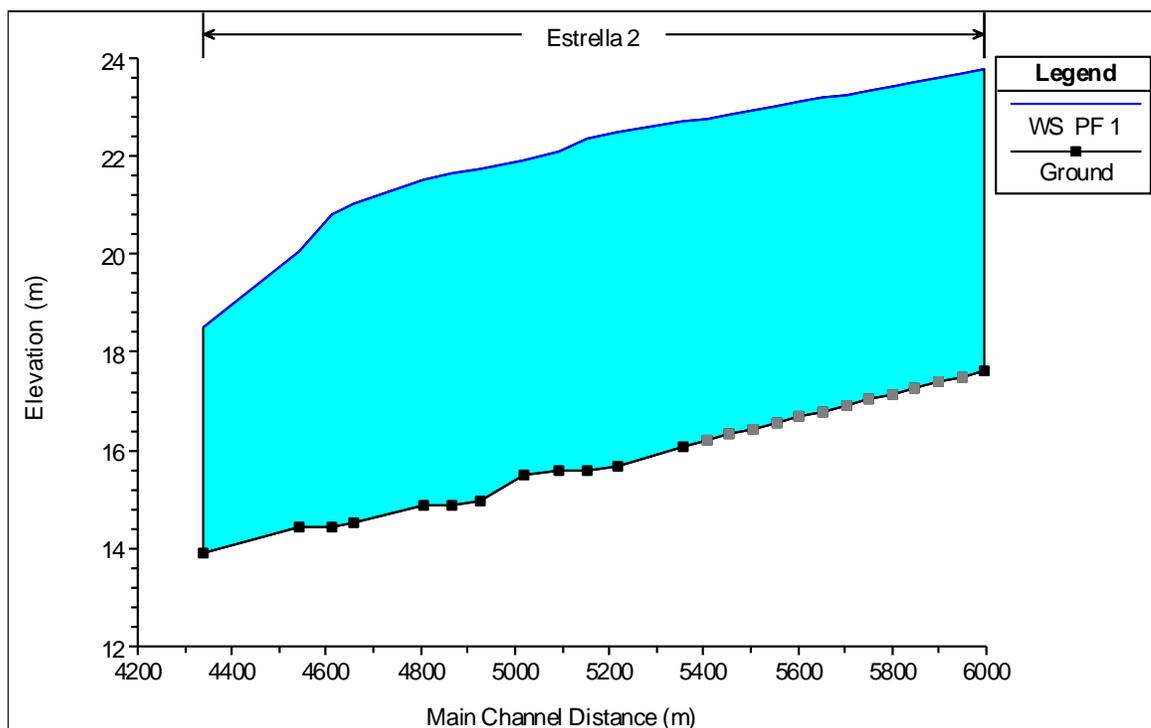


Figura 4.17. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 1

Fuente: Los Autores.

Por lo tanto se logró calibrar el Tramo 2, además el comportamiento hidráulico del Tramo 1 y 2 es muy similar si se comparan los cuadros 4.2 y 4.3. Los rangos de velocidades son muy parecidos al igual que las áreas hidráulicas.

Cuadro 4.3. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 2

Estación	Elevación del nivel del agua (msnm)	Velocidad en el canal (m/s)	Área del flujo (m ²)
5.996.115	23.8	3.39	1030.59
5.357.971	22.7	3.08	1133.36
5.218.233	22.51	2.95	1183.16
5.155.013	22.34	3.19	1096.57
5.092.003	22.08	3.58	977.15
5.020.207	21.9	3.59	973.63
4.926.984	21.76	3.28	1067.38
4.864.733	21.66	3.17	1102.88
4.804.329	21.53	3.18	1099.74
4.657.649	21.04	3.64	959.36
4.613.038	20.81	3.91	893.99
4.544.717	20.05	4.94	707.54
4.339.128	18.51	5.36	651.84

Fuente: Los Autores.

c) Calibración Tramos 1-2 juntos

Para comprobar si los resultados se mantienen coherentes si se juntan los tramos 1 y 2, se creó un archivo geométrico importando ambas geometrías y uniéndolas (ver figura 4.18).

Se corrió el modelo y se constató que ninguna sección se desborda, así mismo la ecuación de la energía se logró balancear en todas las secciones.

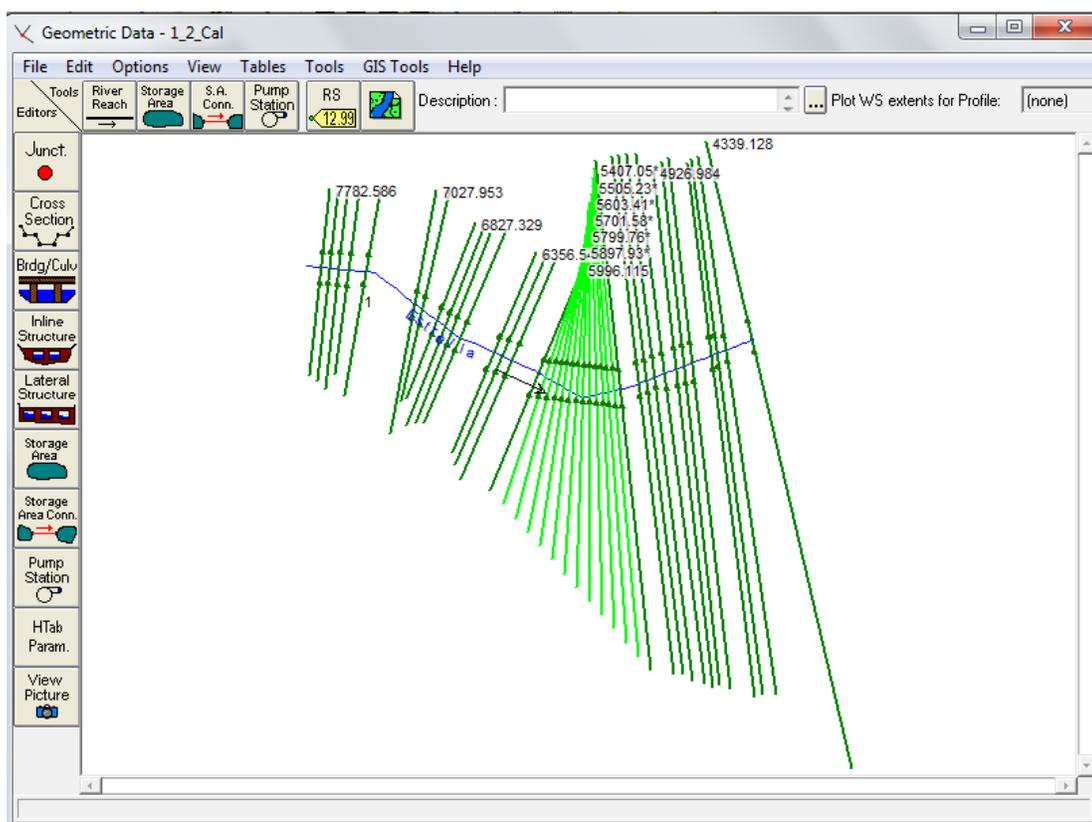


Figura 4.18. Esquema geométrico de los Tramos 1-2

Fuente: Los Autores

En el cuadro 4.4 se hace una comparación de las propiedades hidráulicas de las secciones con los tramos por separado y los tramos 1 y 2 juntos. Se puede observar que las alturas y velocidades en la mayoría de las secciones varían incluso en el orden de 0.01m. Solamente en la sección que es la sección final del Tramo 1, la altura varía en 0.58 msnm, altura que se reduce a la hora de juntar los tramos.

Cuadro 4.4. Datos de altura y velocidad del agua para las secciones en tramos separados y tramos 1 y 2 juntos.

Estación	Tramos Separados	Tramo 1-2	Tramos Separados	Tramo 1-2
	Elevación del nivel del agua (msnm)	Elevación del nivel del agua (msnm)	Velocidad en el canal (m/s)	Velocidad en el canal (m/s)
7.782.586	30.04	30.05	3.66	3.65
7.720.951	29.87	29.88	3.71	3.69
7.655.655	29.61	29.63	3.89	3.87
7.583.831	29.18	29.21	4.3	4.26
7.458.597	28.86	28.9	3.97	3.93
7.027.953	26.22	26.12	5.5	5.65
6.955.951	26.11	26	4.76	4.89
6.827.329	25.93	25.8	4.01	4.12
6.755.928	25.8	25.66	3.84	3.96
6.691.418	25.66	25.49	3.81	3.96
6.619.601	25.43	25.21	3.91	4.12
6.356.540	25.01	24.61	3.26	3.59
6.288.424	24.88	24.4	3.28	3.67
6.210.816	24.75	24.17	3.24	3.72
5.996.115	23.8	23.8	3.39	3.39
5.357.971	22.7	22.7	3.08	3.08
5.218.233	22.51	22.52	2.95	2.95
5.155.013	22.34	22.34	3.19	3.19
5.092.003	22.08	22.08	3.58	3.58
5.020.207	21.9	21.9	3.59	3.6
4.926.984	21.76	21.75	3.28	3.28
4.864.733	21.66	21.65	3.17	3.17
4.804.329	21.53	21.53	3.18	3.18
4.657.649	21.04	21.04	3.64	3.64
4.613.038	20.81	20.82	3.91	3.9
4.544.717	20.05	20.07	4.94	4.91
4.339.128	18.51	18.52	5.36	5.35

Fuente: Los Autores.

Por lo tanto se pueden unir los tramos 1 y 2 con las condiciones de calibración que se hicieron por separado sin afectar en gran medida las propiedades hidráulicas generadas en la modelación de los tramos por separado.

d) Calibración para el Tramo 3

El Tramo 3 consta de 17 secciones transversales y tiene una longitud de 1504.758m. En la figura 4.19 se nota que al igual que el Tramo 2 consta de secciones muy largas. En la realidad este tramo al igual que el Tramo 4; durante las inundaciones, se comporta como una especie de poza debido al remanso producido en el embudo situado en el Tramo 5.

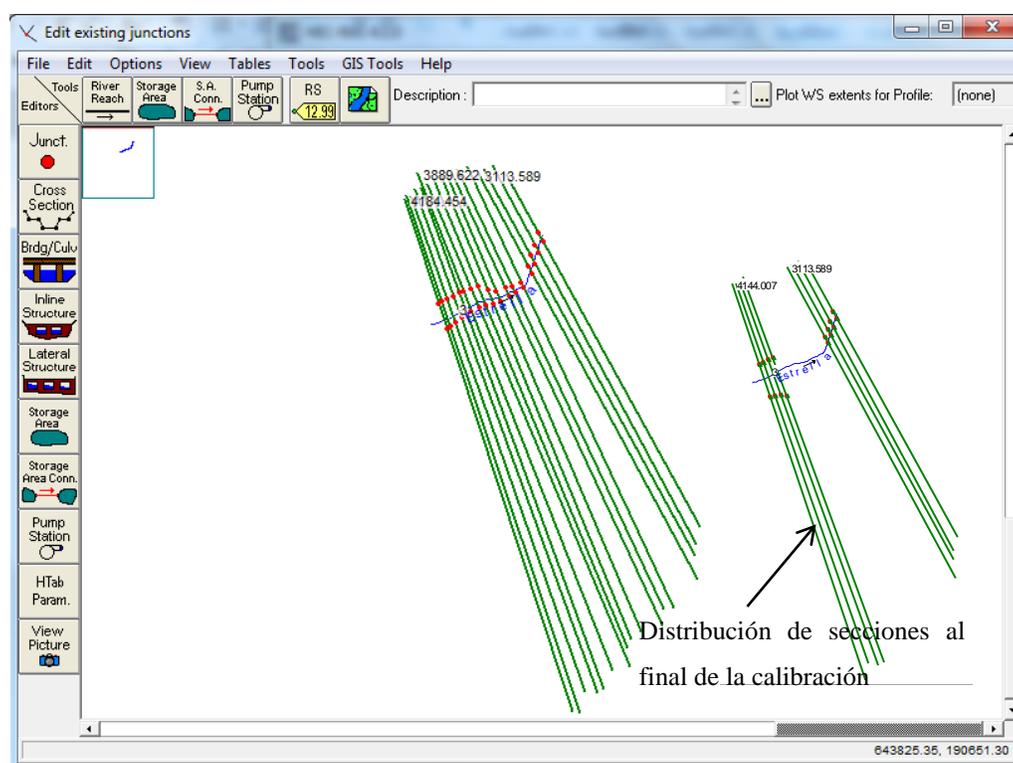


Figura 4.19. Esquema de la geometría del Tramo 3

Fuente: Los Autores

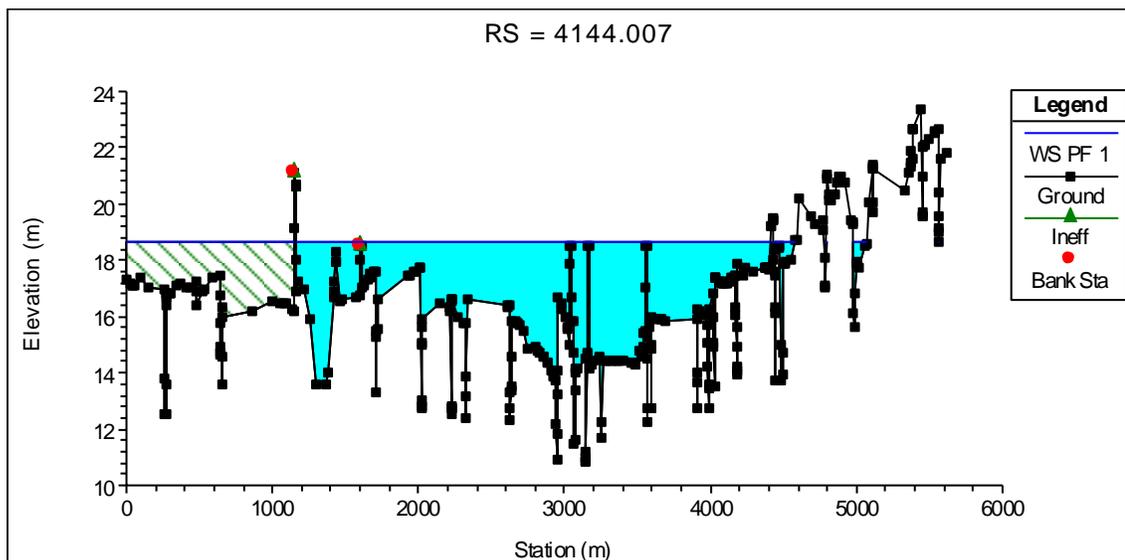


Figura 4.20. Sección 4184.454 del Tramo 3 que corresponde a la primera sección aguas arriba.

Fuente: Los Autores.

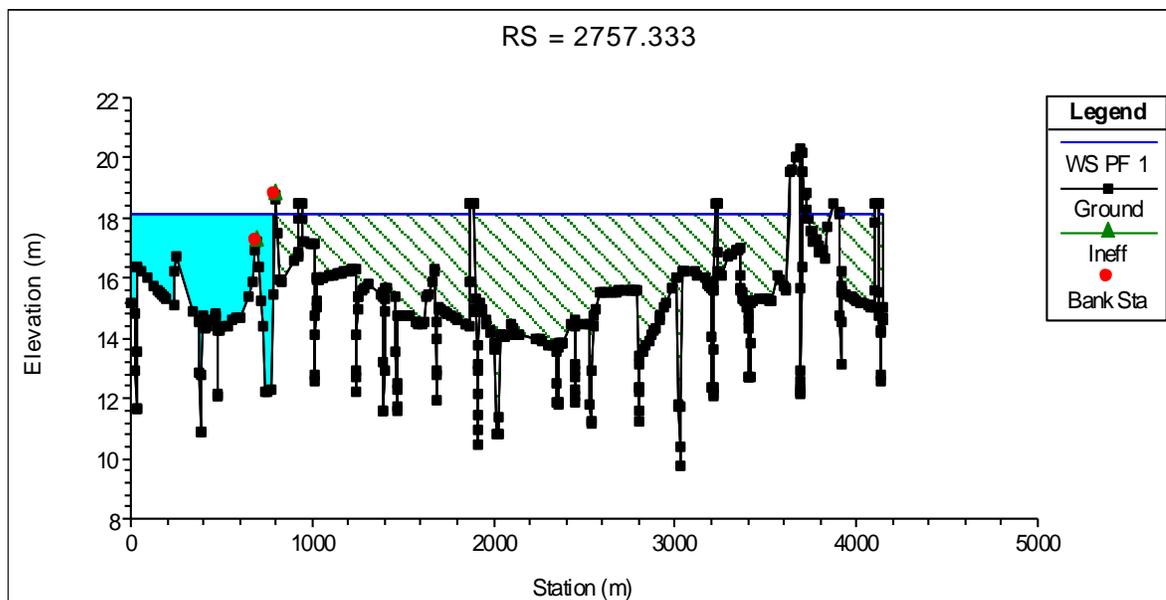


Figura 4.21. Sección 2757.33 del Tramo 3 que corresponde a la última sección aguas abajo.

Fuente: Los Autores.

Aunque se logró balancear la ecuación de la energía de esta forma, ocurre un desbordamiento en las primeras secciones en la margen derecha, lo cual no sucede. Por lo tanto el Tramo 3 no logró ser calibrado por separado. La estrategia será calibrar el Tramo 4 y luego calibrar el Tramo 3 junto con los tramos 1-2 y el 4.

e) Calibración para el Tramo 4

El Tramo 4, tiene 22 secciones transversales e inicia en la sección 2679.695 y finaliza en la sección 1086.801. La longitud de este tramo es de 1818.283 m.

La forma del Tramo 4 como se describe en la figura 4.22, va acercándose a una variación abrupta de la dirección del cauce, debido a la curva que va formando y consta de secciones muy largas y otras muy cortas.

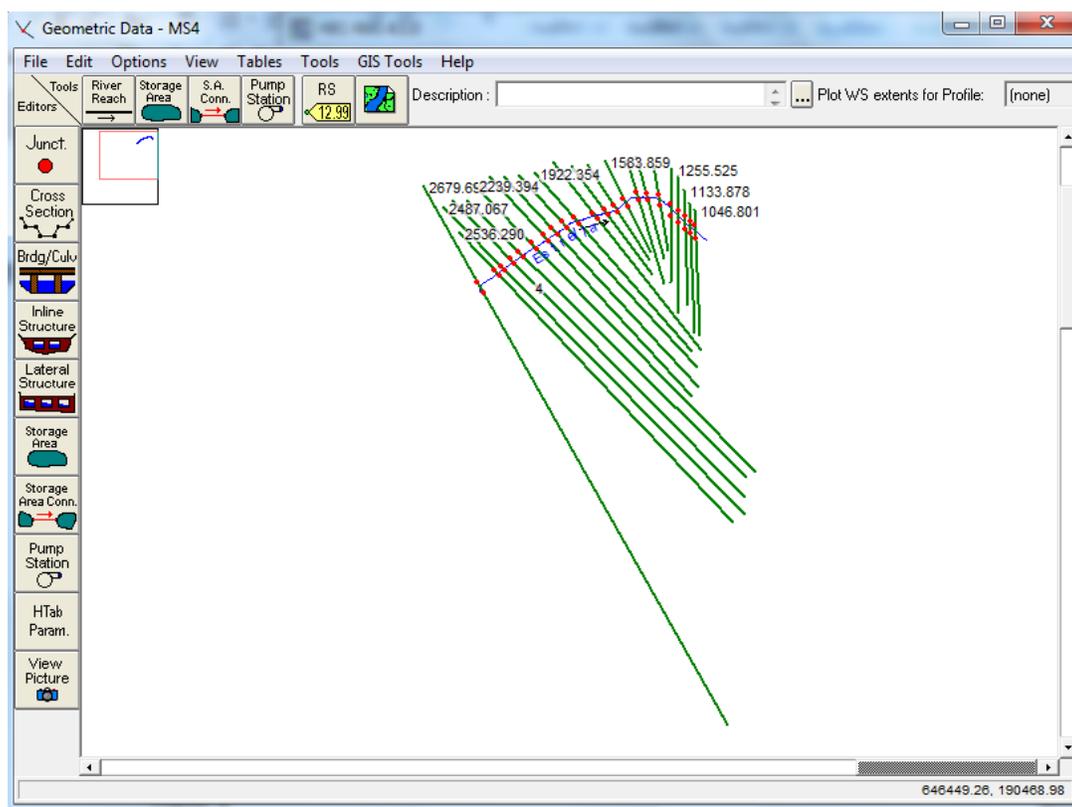


Figura 4.22. Esquema de la geometría del Tramo 4.

Fuente: Los Autores.

Para calibrar el tramo 4 solamente se borró una sección y el tramo fue calibrado fácilmente.

En las figuras 4.23 y 4.24 se observa la primera sección aguas arriba y la última aguas abajo del Tramo 4 respectivamente.

Las alturas del nivel del agua coinciden con las ocurridas en la realidad, además se constata que los diques, que fueron construidos basados en las alturas alcanzadas por el agua en el evento, no son superados por el agua.

En ambas figuras se ve el desbordamiento del agua en la margen izquierda.

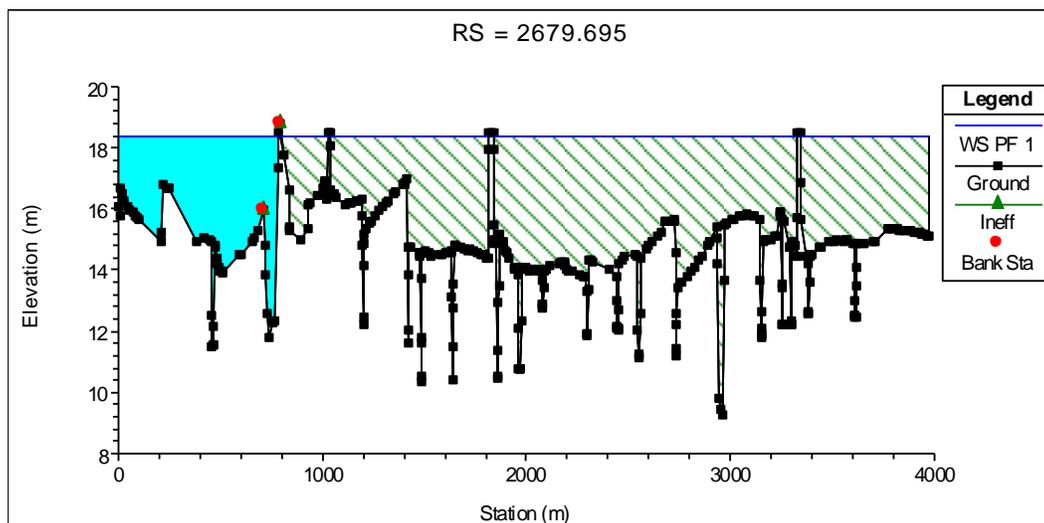


Figura 4.23. Sección 2679.695 del Tramo 4 que corresponde a la primera sección aguas arriba.

Fuente: Los Autores.

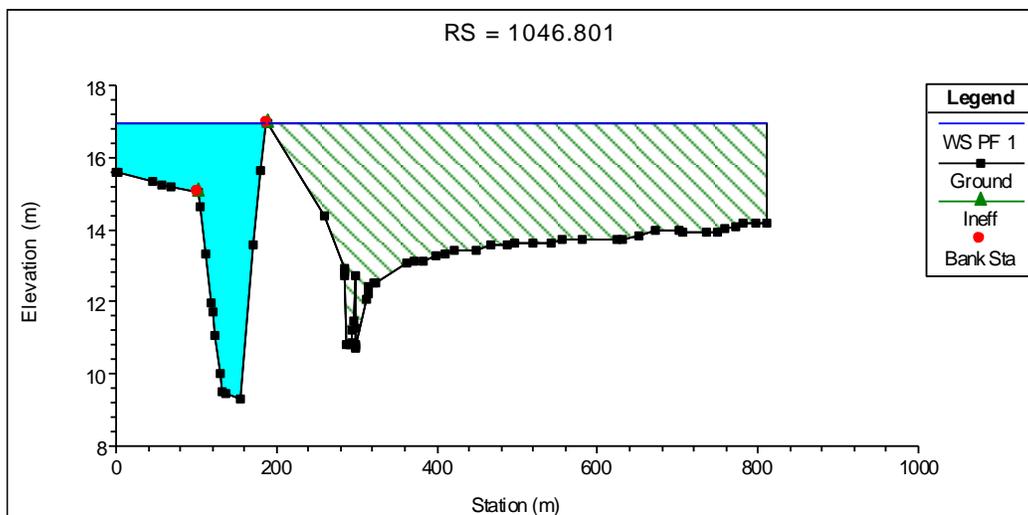


Figura 4.24. Sección 1046.801 del Tramo 4 que corresponde a la última sección aguas abajo.

Fuente: Los Autores.

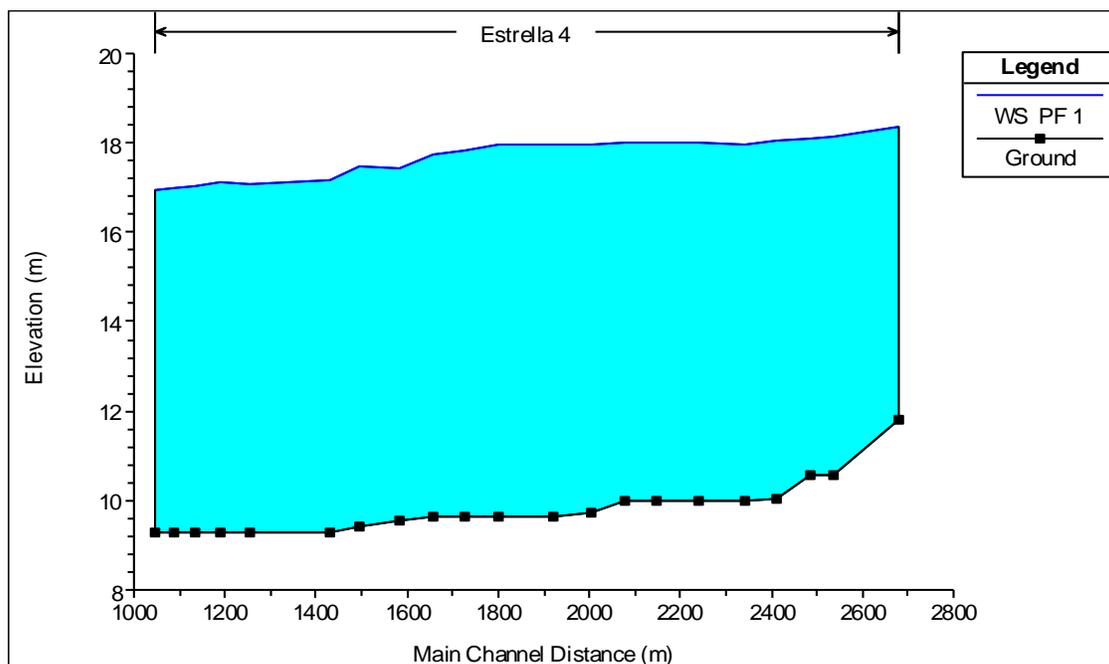


Figura 4.25. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 3

Fuente: Los Autores.

En la figura 4.25, se observa un comportamiento similar al de los tramos anteriores, sin presentarse flujo rápidamente variado.

f) Calibración de los Tramos 1-2-3 y 4

Como no se logró calibrar con éxito el Tramo 3, se hizo una geometría con los Tramos 1-2, se le adjuntó el Tramo 3 completo y el Tramo 4 calibrado.

Se corrió el modelo y al final se pudieron conservar más secciones del Tramo 3. En la figura 4.26 se observa la geometría para los 4 tramos juntos.

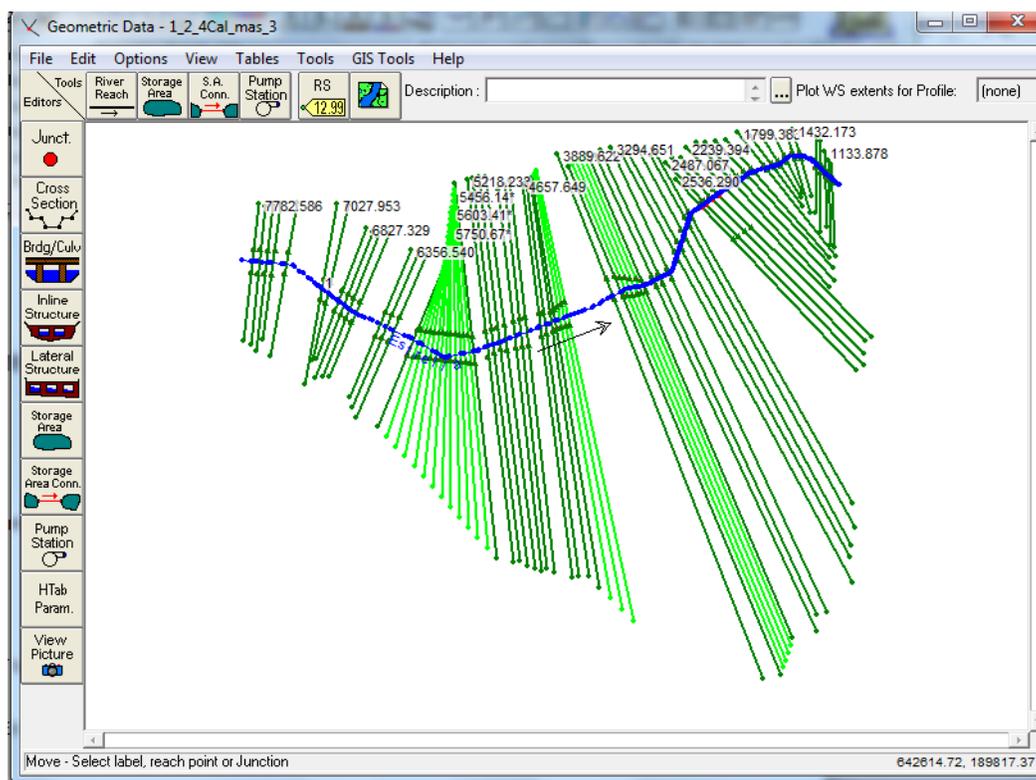


Figura 4.22. Esquema de la geometría de los Tramos 1-2-3 y 4.

Fuente: Los Autores.

Para lograr la calibración se borró la última sección del Tramo 2 y las primeras del Tramo 3, en las figuras 4.23 se observa que a partir de esta sección, el agua se desborda por muy poco en la margen izquierda, esto sucede hasta la última sección aguas abajo del Tramo 4. Sin embargo la ausencia de dique en la margen izquierda comienza 2757.33.

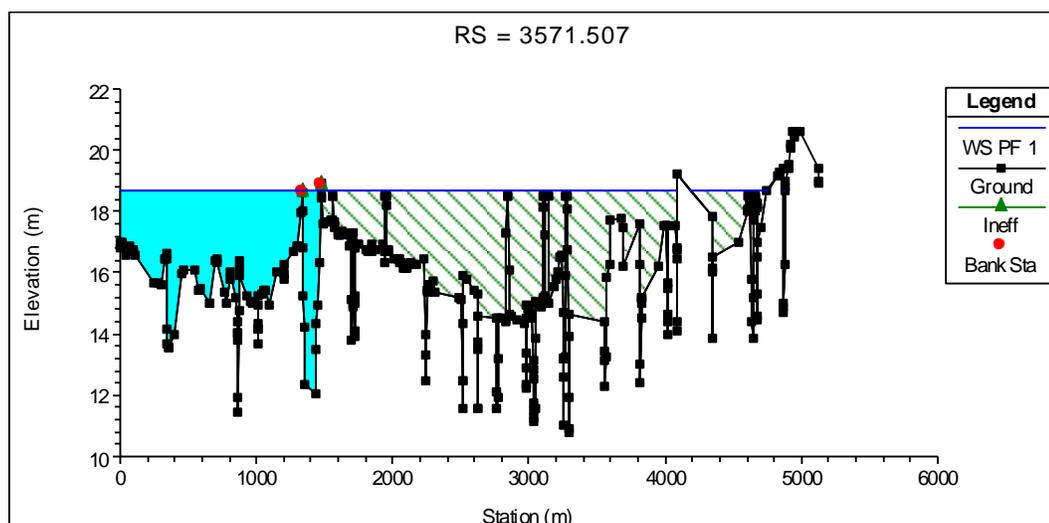


Figura 4.23. Sección 3571.507

Fuente: Los Autores.

Igual que en la calibración de los Tramos 1-2 juntos las alturas del agua suben un poco en algunas secciones pero se conservan dentro de rangos aceptables. El cuadro 4.5 muestra las propiedades hidráulicas de las secciones dentro del nuevo tramo.

Cuadro 4.5. Datos de parámetros hidráulicos del Tramo 2

Estación	Elevación del nivel del agua (msnm)	Velocidad en el canal (m/s)	Área del flujo (m ²)
7.782.586	30.05	3.65	957.03
7.720.951	29.88	3.69	946.40
7.655.655	29.63	3.87	903.87
7.583.831	29.21	4.26	820.40
7.458.597	28.90	3.93	890.24
7.027.953	26.12	5.65	618.37
6.955.951	26.00	4.89	715.32
6.827.329	25.80	4.12	848.11
6.755.928	25.66	3.96	882.12

6.691.418	25.49	3.96	882.04
6.619.601	25.21	4.12	847.88
6.356.540	24.61	3.59	972.72
6.288.424	24.40	3.68	950.83
6.210.816	24.17	3.72	939.64
5.996.115	23.79	3.40	1029.10
5.357.971	22.68	3.10	1129.36
5.218.233	22.50	2.96	1179.21
5.155.013	22.32	3.20	1092.30
5.092.003	22.05	3.60	972.04
5.020.207	21.86	3.63	962.51
4.926.984	21.71	3.31	1055.41
4.864.733	21.61	3.21	1089.59
4.804.329	21.48	3.22	1086.66
4.657.649	20.96	3.71	942.15
4.613.038	20.71	4.00	874.20
4.544.717	19.68	5.46	639.75
4.503.590	19.57	5.23	668.22
3.889.622	19.20	4.77	732.29
3.803.595	19.03	4.42	790.07
3.571.507	18.71	1.51	4633.45
3.463.690	18.68	1.65	4282.17
3.395.009	18.66	1.68	4267.13
3.294.651	18.62	1.67	4063.12
3.113.589	18.57	1.75	3870.89
3.005.155	18.54	1.82	3639.25
2.888.804	18.47	2.02	3222.75
2.757.333	18.38	2.28	2650.37
2.679.695	18.31	2.59	2580.68
2.536.290	18.12	2.87	2481.44
2.487.067	18.10	2.50	2987.55
2.413.278	18.02	2.64	2912.39
2.341.521	17.96	2.28	2910.02
2.239.394	18.00	0.79	8683.08
2.147.839	17.99	0.77	7638.25
2.078.896	17.99	0.81	7961.33

2.001.883	17.98	0.90	7313.40
1.922.354	17.96	1.11	6325.79
1.799.383	17.94	1.18	6090.10
1.725.357	17.83	2.57	2945.88
1.657.348	17.70	3.00	2453.42
1.583.859	17.41	3.72	1808.26
1.495.996	17.48	2.81	2534.59
1.432.173	17.15	4.19	1708.66
1.255.525	17.08	2.73	2300.76
1.191.724	17.11	1.87	3171.04
1.133.878	17.02	2.25	2550.30
1.088.330	17.01	2.05	2829.43
1.046.801	16.94	2.31	2578.94

Fuente: Los Autores.

La figura 4.24 muestra el perfil de todo el tramo. Se pueden observar dos caídas en el nivel del agua, éstas se dan en las secciones del Tramo 3, pero en las alertas de los errores, no se muestran como flujo rápidamente variado ni como secciones donde no se pudo balancear la ecuación de la energía.

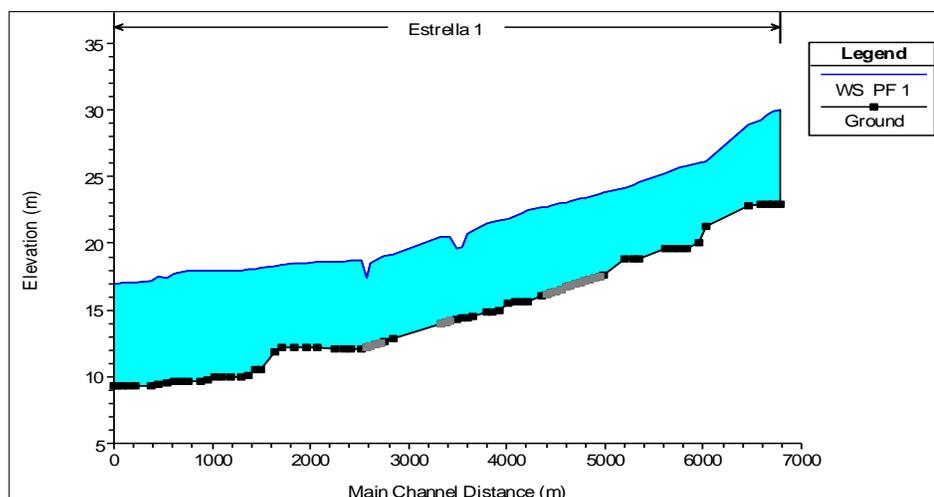


Figura 4.24. Gráfica del perfil del caudal de calibración en los Tramos 1-2-3-4

Fuente: Los Autores.

g) Calibración para el Tramo 5

El tramo 5 consta de 12 secciones transversales y tiene una longitud de 635.216 m.

Es un tramo bastante corto pero ha afectado en gran manera el proceso de modelación como se verá adelante.

El esquema geométrico de la figura 4.26 muestra en color rojo la posición de ese tramo con respecto a la geometría total.

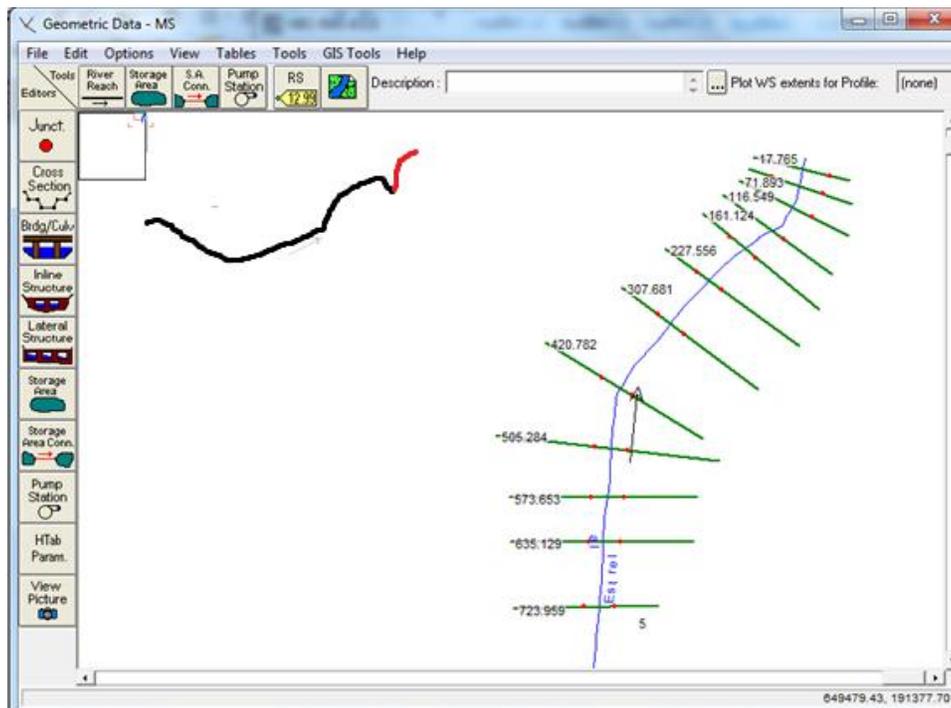


Figura 4.26. Esquema geométrico del Tramo 5

Fuente Los Autores.

Este tramo es bastante corto, pero es el que contempla el embudo así que es muy importante para el análisis de resultados.

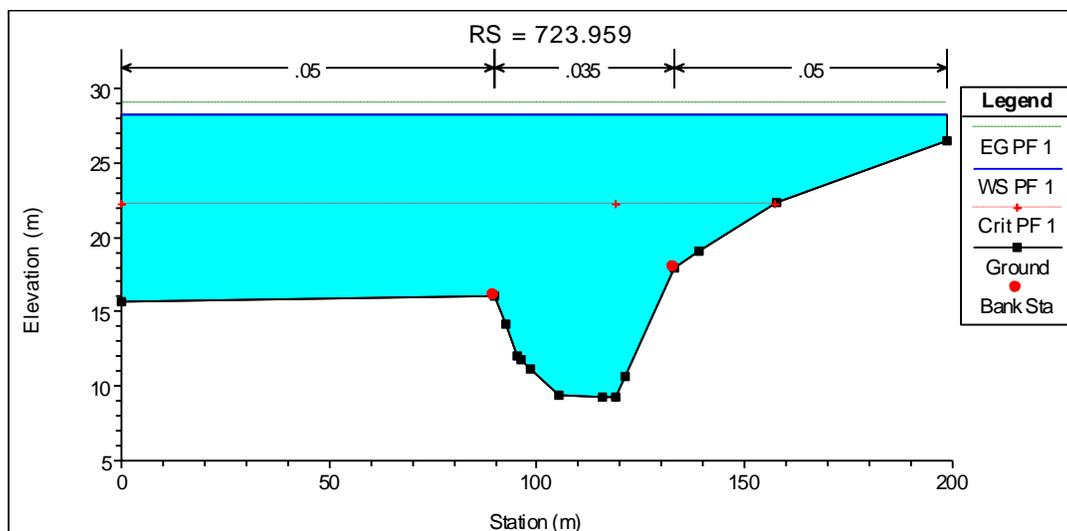


Figura 4.27. Sección 723.959 del Tramo 5 que corresponde a la primera sección aguas arriba.

Fuente: Los Autores.

En la figura anterior se aprecia que el nivel del agua alcanza los 28 msnm. Este dato es incorrecto debido a que en la realidad alcanzó menos de 22,5 msnm.

Igualmente en la figura 4.28, la altura es de casi 24 25 msnm.

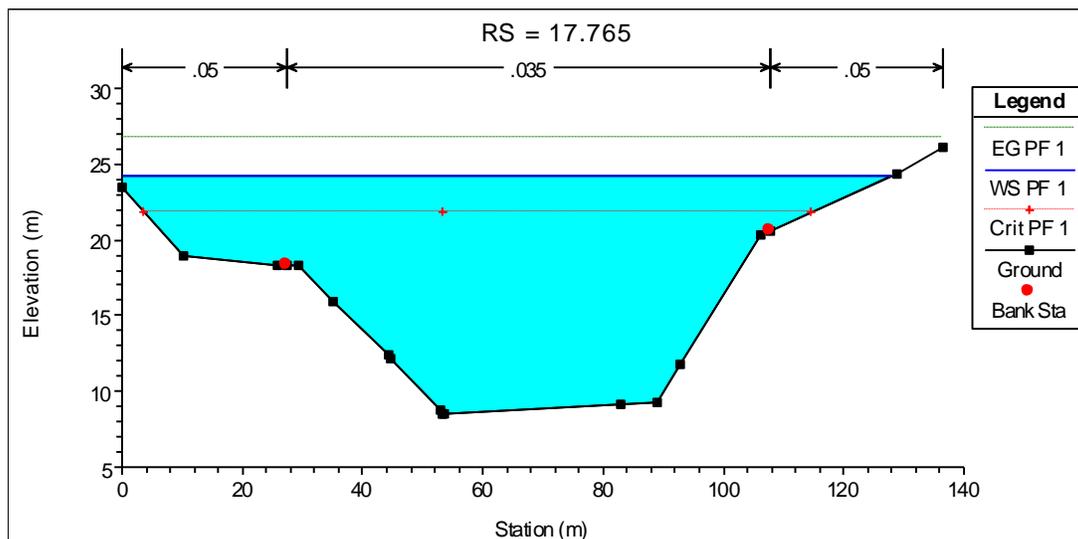


Figura 4.28. Sección 17.765 del Tramo 5 que corresponde a la última sección aguas abajo.

Fuente: Los Autores.

En la figura 4.29, se observa un aumento en la altura del nivel del agua al final, una caída y un efecto de remanso fuerte empezando 50 m antes del embudo. Sin embargo las alturas del nivel del agua no son las correctas.

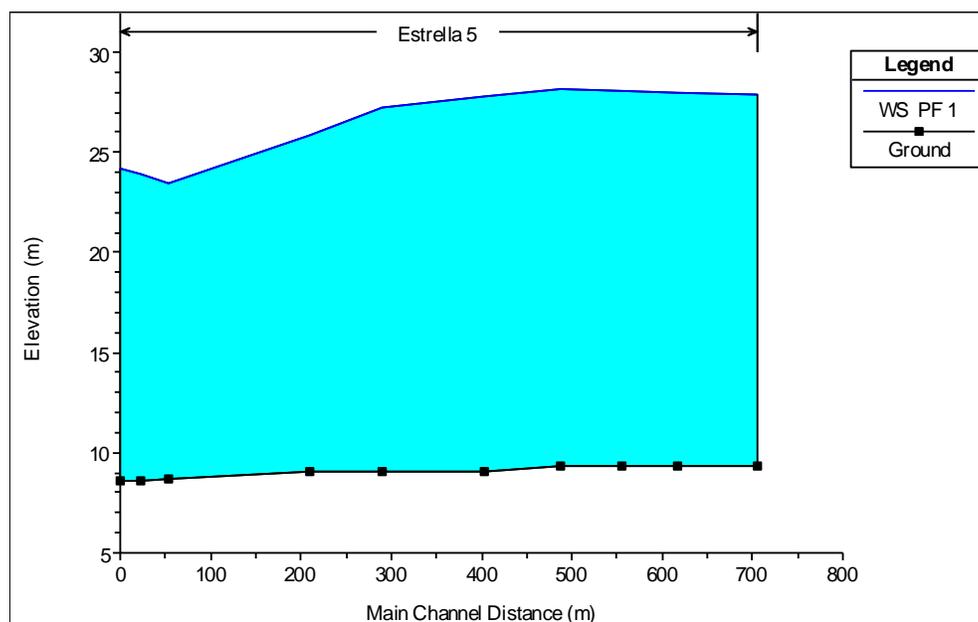


Figura 4.29. Gráfica del perfil del caudal de calibración en el Tramo 5

Fuente: Los Autores.

Cuando se corrió el modelo, no hubo problemas con la ecuación de la energía, se trató de bajar las alturas del agua, probando cambiar las pendientes y “n” de Manning, sin embargo no hubo variación significativa.

Igualmente se intentó borrar secciones, dejando las últimas secciones se logró alcanzar alturas de 22 msnm. Sin embargo había que borrar muchas secciones aguas arriba hasta empatar con el Tramo 4.

Una vez que se hizo esto se unieron los 5 tramos, pero igualmente sucedía un gran aumento de las alturas del agua en los tramos 3 y 4 principalmente.

Por lo tanto con el caudal de calibración no se puede incluir el Tramo 5.

4.5. Modelación con otros caudales

Para probar qué sucede con el tramo 5 se hizo una modelación con el caudal de calibración y los otros 7 caudales del cuadro 3.5.

Primero se modeló el Tramo calibrado 1-2-3 y 4 (Plan: Tramos 1234) y luego se modeló el mismo tramo más el Tramo 5 completo (Plan: Completo). Luego se compararon las alturas del agua en las secciones. Analizando estas secciones se nota que entre más grande el caudal, es más grande la variación de las alturas en la misma sección.

Para la comparación entre el Tramo 1-2-3-4 con el Tramo 5 completo se generó un cuadro con todas las alturas del agua; de ahí se extrajo el cuadro 4.6; en éste se observa que a partir de la sección 2.888.804 hacia aguas abajo, ya hay variaciones de más de 1 m en los niveles del agua con todos los caudales.

Cuadro 4.6 Diferencias en los niveles del agua en 3 secciones contiguas modelando diferentes caudales con y sin el Tramo 5.

Sección	Plan	Caudal (m ³ /s)	Nivel del agua (msnm)	Diferencia en el nivel del agua (msnm)
3.005.155	Tramos1234	3496	18.54	-6.1
3.005.155	Completo	3496	24.64	
3.005.155	Tramos1234	2515	18.63	-4.16
3.005.155	Completo	2515	22.79	
3.005.155	Tramos1234	1700	18.81	-1.89
3.005.155	Completo	1700	20.7	
3.005.155	Tramos1234	1480	17.92	-2.13
3.005.155	Completo	1480	20.05	
3.005.155	Tramos1234	1150	17.35	-1.61
3.005.155	Completo	1150	18.96	
3.005.155	Tramos1234	950	17.42	-0.84

3.005.155	Completo	950	18.26	
3.005.155	Tramos1234	754	16.98	-0.47
3.005.155	Completo	754	17.45	
3.005.155	Tramos1234	553	16.47	-0.47
3.005.155	Completo	553	16.94	
2.888.804	Tramos1234	3496	18.47	-6.17
2.888.804	Completo	3496	24.64	
2.888.804	Tramos1234	2515	18.6	-4.19
2.888.804	Completo	2515	22.79	
2.888.804	Tramos1234	1700	16.92	-3.78
2.888.804	Completo	1700	20.7	
2.888.804	Tramos1234	1480	16.57	-3.48
2.888.804	Completo	1480	20.05	
2.888.804	Tramos1234	1150	16.78	-2.18
2.888.804	Completo	1150	18.96	
2.888.804	Tramos1234	950	17.18	-1.07
2.888.804	Completo	950	18.25	
2.888.804	Tramos1234	754	16.78	-0.54
2.888.804	Completo	754	17.32	
2.888.804	Tramos1234	553	16.31	-0.53
2.888.804	Completo	553	16.84	
2.757.333	Tramos1234	3496	18.38	-6.26
2.757.333	Completo	3496	24.64	
2.757.333	Tramos1234	2515	18.55	-4.24
2.757.333	Completo	2515	22.79	
2.757.333	Tramos1234	1700	17.61	-3.09
2.757.333	Completo	1700	20.7	
2.757.333	Tramos1234	1480	17.42	-2.63
2.757.333	Completo	1480	20.05	
2.757.333	Tramos1234	1150	17.28	-1.68
2.757.333	Completo	1150	18.96	
2.757.333	Tramos1234	950	16.53	-1.71
2.757.333	Completo	950	18.24	
2.757.333	Tramos1234	754	16.31	-1.17
2.757.333	Completo	754	17.48	
2.757.333	Tramos1234	553	15.99	-0.68
2.757.333	Completo	553	16.67	

Fuente: Los Autores.

Cuadro 4.7. Diferencias en los niveles del agua en la última sección aguas abajo del tramo 4 modelando diferentes caudales con y sin el Tramo 5.

Sección	Plan	Caudal (m ³ /s)	Nivel del agua (msnm)	Diferencia en el nivel del agua (msnm)
1046.801	Completo	3496	23.68	6.74
1046.801	Tramos1234	3496	16.94	
1046.801	Completo	2515	21.73	5.09
1046.801	Tramos1234	2515	16.64	
1046.801	Completo	1700	19.61	4.33
1046.801	Tramos1234	1700	15.28	
1046.801	Completo	1480	18.94	4.16
1046.801	Tramos1234	1480	14.78	
1046.801	Completo	1150	17.79	1.1
1046.801	Tramos1234	1150	16.69	
1046.801	Completo	950	17.00	0.78
1046.801	Tramos1234	950	16.22	
1046.801	Completo	754	16.69	1.01
1046.801	Tramos1234	754	15.68	
1046.801	Completo	553	15.75	0.81
1046.801	Tramos1234	553	14.94	

Fuente: Los Autores.

En este caso se observa que ya desde un inicio las variaciones con los caudales: 1150, 950, 750 y 553 m³/s son menores a 1.1 msnm.

Las diferencias entre la modelación con y sin el tramo 5, son evidencia del comportamiento complejo que se produce a lo largo de la corriente pero sobre todo en las cercanías del embudo natural. Para caudales medianos y bajos la mayoría de las secciones del río son capaces de contener la mayor parte del flujo, posibilitando su análisis mediante el software ya que bajo esta condición la dirección de la corriente principal es bastante definida. Sin embargo cuando los caudales se incrementan y sobre todo cuando son extraordinarios, el comportamiento de la corriente principal se vuelve muy complejo, presentándose flujos en varias direcciones y con diferentes

velocidades, en ocasiones se observan flujos saliendo del cauce principal que luego regresan nuevamente a la corriente principal. Esta complejidad aumenta conforme los flujos se aproximan al embudo natural, pudiéndose observar inclusive remolinos y flujos en retroceso y remanso por lo que se hace difícil el análisis mediante el software.

Los otros siete caudales también se incluyeron en la modelación con todos los tramos ya calibrados; sin embargo para asuntos de análisis éstos no presentan ningún aspecto que sea necesario destacar ya que son caudales más pequeños que el de calibración y por lo tanto no se desbordan.

4.6. Postproceso

Una vez calibrado el modelo se procedió a generar el archivo de exportación para ArcView. La primera imagen que se generó se puede observar en la figura 4.30.

Esta imagen no tiene el tramo 5, así mismo refleja toda el área afectada por la inundación.

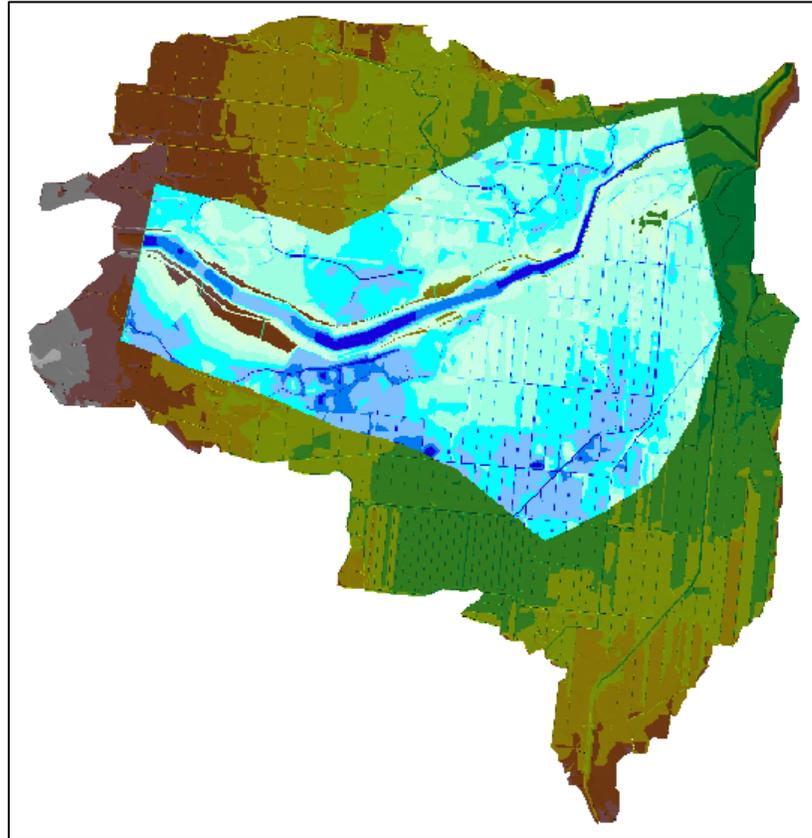


Figura 4.30 Primer TIN de la superficie del agua.

Fuente: Los Autores.

A la hora de generar el archivo, se definieron las áreas de flujo inefectivo pero, en el momento que se genera la imagen ésta no las interpreta correctamente.

Los niveles del agua sí corresponden a los que se presentan en la modelación.

Para resolver esta situación, se utilizó la opción de diques “levees” de HEC-RAS. Se creó otro archivo de exportación y se volvió a generar otra imagen en el Post Proceso, ésta se puede observar en la figura 4.31

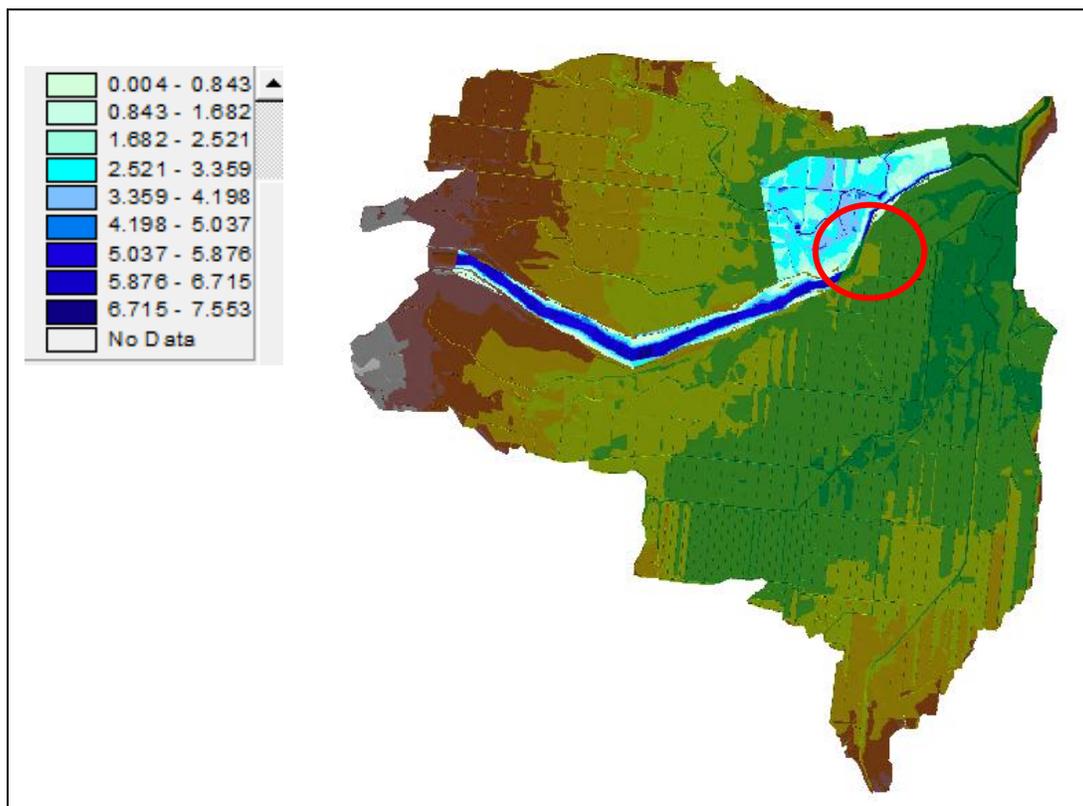


Figura 4.31. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración utilizando la opción “Levees” en HEC-RAS.

Fuente: Los Autores.

En la figura 4.31 se observa que se corrigió el problema de las áreas de flujo inefectivo, sin embargo donde se muestra el círculo rojo, no se generó el TIN correctamente ya que no aparece ese segmento del río.

Para intentar corregir esto se probó trasladando los diques cercanos al área donde no se genera adecuadamente la superficie del agua en la margen derecha; un poco más a la derecha, el resultado de este procedimiento se observa en la figura 4.32.

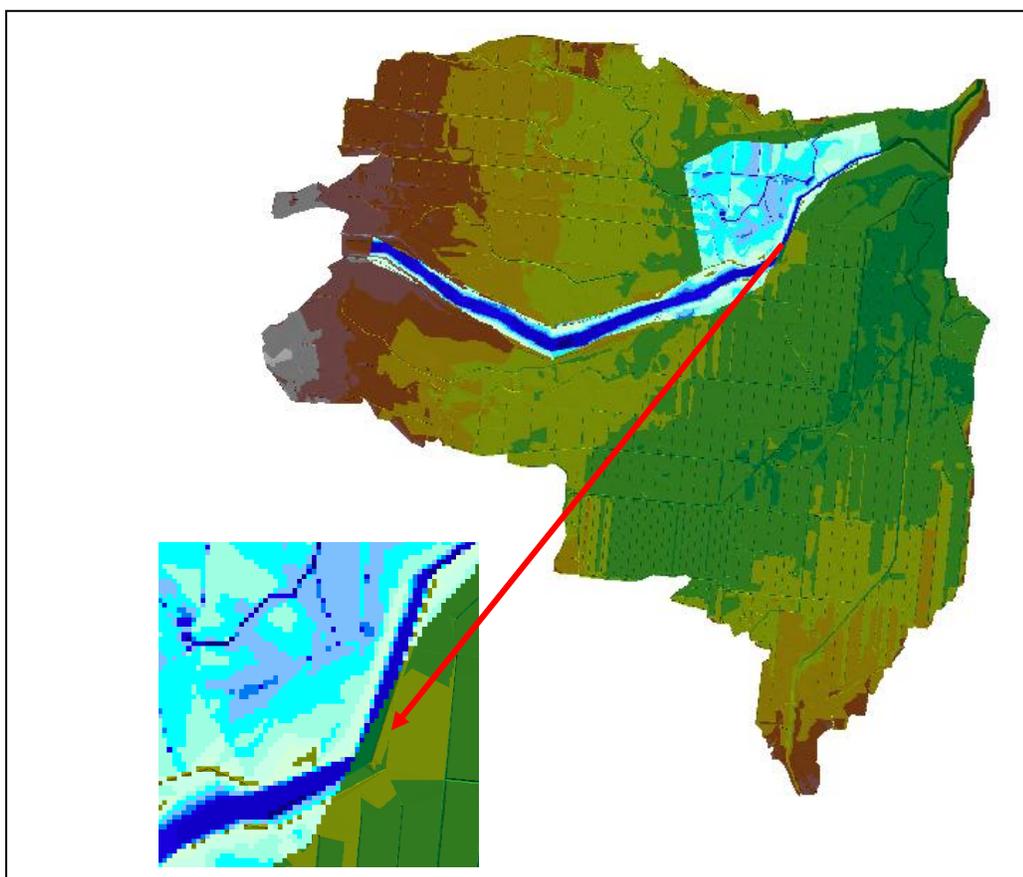


Figura 4.32. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración moviendo algunos diques de la margen derecha.

Fuente: Los Autores.

Se puede observar que el hecho de mover los diques sí funciona para que el programa genere el TIN en ese sector.

En la figura 4.33 se generó la imagen definitiva de los Tramos 1-2-3 y 4.

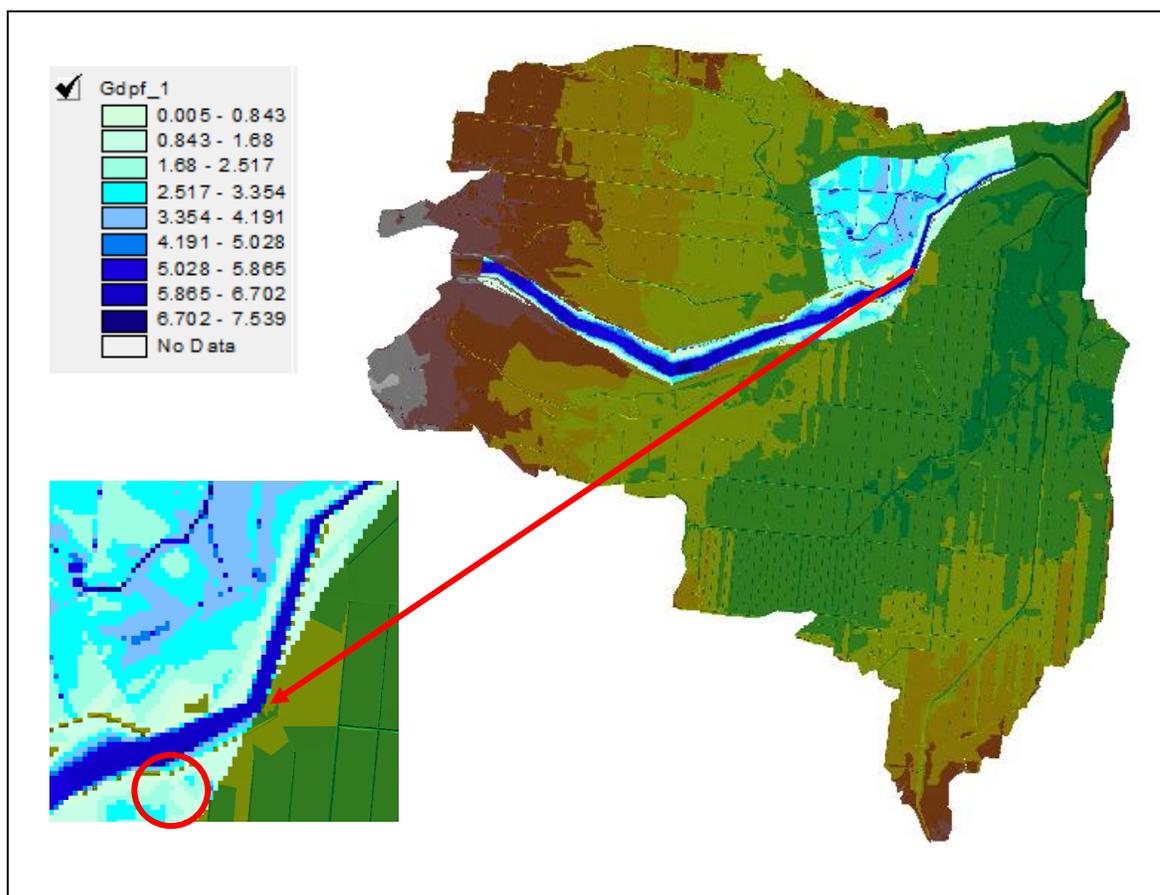


Figura 4.33. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo con los tramos 1-2-3-4.

Fuente: Los Autores.

Se puede observar que a la hora de mover los diques, se producen desbordamientos que, aunque pequeños no deberían de suceder.

El mismo procedimiento se realizó para el Tramo 5, y se generó la figura 4.34.

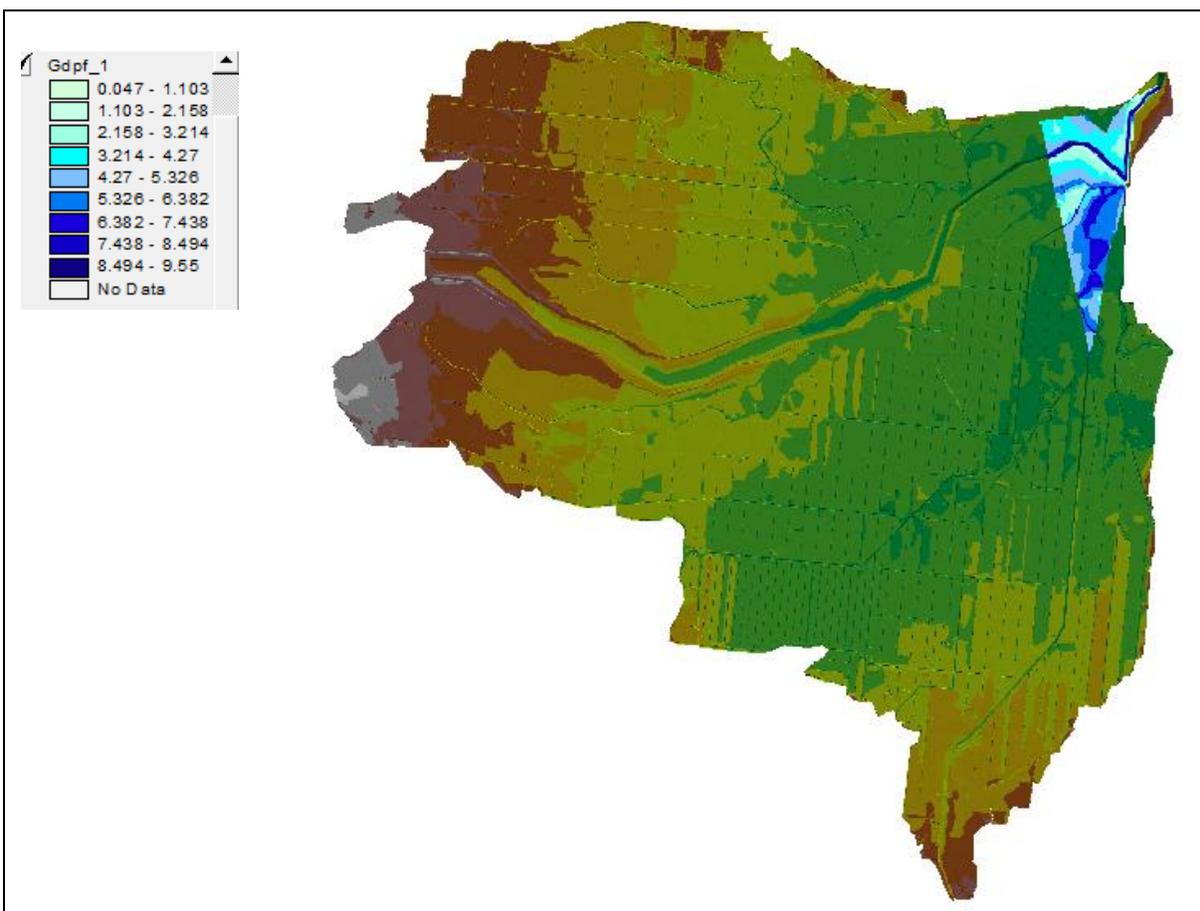


Figura 4.34. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo del Tramo 5.

Fuente: Los Autores.

En la figura se observa que el TIN se grafica hasta donde llegan las secciones, es por esto que la imagen en la margen derecha se observa con una forma triangular que no coincide con lo que sucede realmente en una inundación.

Para generar la imagen definitiva con todos los tramos, se hizo una ventana nueva en el PostProceso y se adjuntaron los ambos TIN. Esta imagen definitiva se puede observar en la figura 4.35

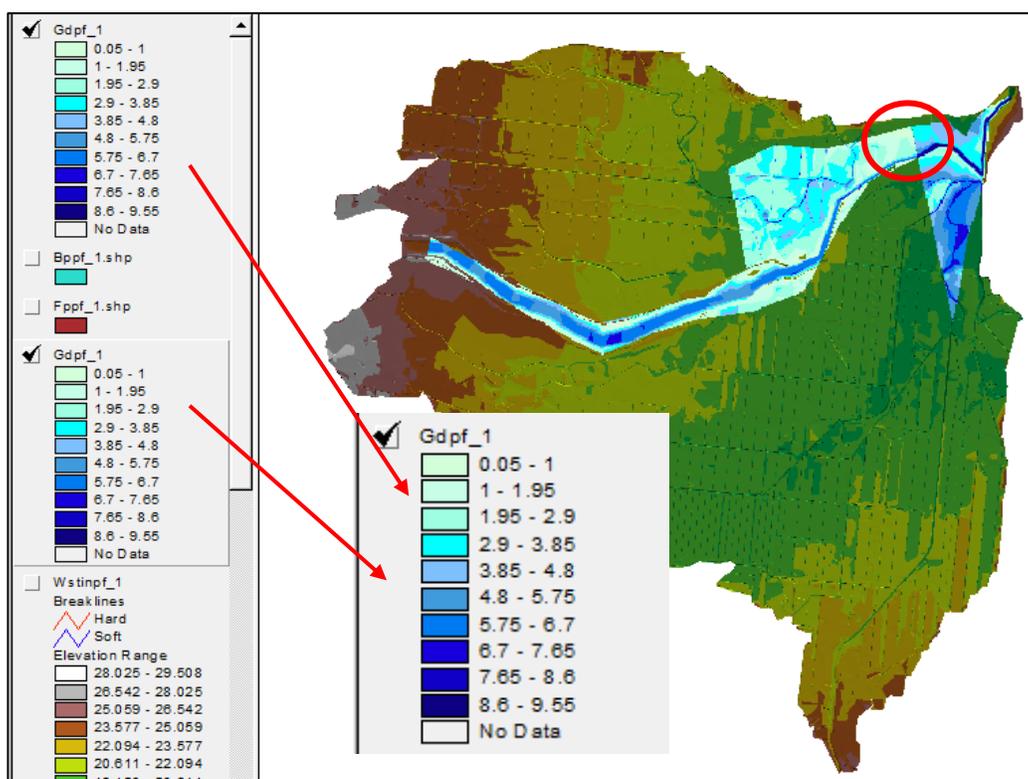


Figura 4.35. TIN de la superficie del agua con el caudal de calibración definitivo para todo el río.

Fuente: Los Autores.

Para ser consecuentes entre ambos TIN se utilizaron los mismos rangos para la profundidad del agua.

Así mismo se observa donde se encuentra el círculo, que el empate entre los dos TIN se da en una forma abrupta.

4.7. Análisis de estructuras, propuesta y priorización de obras

La modelación del río Estrella a través de los tramos, muestran que las obras de protección y mitigación aguas arriba de la sección 3571.507 y ubicados a ambos lados del río, según los registros logran contener los caudales extraordinarios de forma efectiva.

De acuerdo a la figura 4.23, aguas debajo de la sección 3571.507 la modelación sugiere mejorar la altura de las obras de protección ubicadas en la margen izquierda del río.

Con base en el análisis de las secciones de monitoreo mediante el levantamiento topográfico que se efectúa antes y después de realizar la limpieza de los sedimentos del cauce, se evidencia la importancia de esta labor y efecto positivo al restituir la capacidad de conducción hidráulica.

La figura 4.35 corresponde al mapa final obtenido de la modelación utilizando el caudal de 3,496 m³/s como caudal de calibración; que al compararlo con el mapa de la figura 3.13 se observa el efecto amortiguador y mitigador producto de la limpieza del cauce del río Estrella y del mantenimiento de las obras de protección ubicadas en las márgenes del río, así como a las demás de las obras de protección realizadas en las fincas.

Cuantitativamente el evento para el cual se registró el caudal de calibración afectó aproximadamente 1,300 has bajo cultivo de banano, lo cual contrasta con la situación posterior a las obras de protección en donde se logró disminuir el área afectada a valores cercanos a 300 has; lo que a su vez ha significado una importante

disminución en los costos por pérdida de producción y en los costos por recuperación de las plantaciones bananeras que anteriormente eran afectadas por las inundaciones.

Así mismo es importante resaltar el impacto social debido al hecho de que al lograr mitigar los efectos de las inundaciones, esto se traduce en una mayor estabilidad laboral de los colaboradores directos así como los indirectos, lo que a su vez favorece la economía y el desarrollo de la región.

Con el propósito de balancear las inversiones con respecto al beneficio, la finca bananera La Estrella ha planificado realizar con base en un plan a 5 años, la mejora y el reordenamiento de las estructuras de protección tanto existentes como nuevas, estableciendo prioridades según la susceptibilidad al riesgo de inundación, avanzando desde las áreas de menor riesgo hacia las de mayor riesgo, esto es de las zonas más elevadas y alejadas hacia las más bajas y cercanas del río Estrella.

5. CONCLUSIONES

5.1. Con respecto al Software de modelación.

- 5.1.1. Las herramientas utilizadas para realizar la modelación no son tecnologías autosuficientes y necesitan del criterio del experto para ser adaptadas a cada situación en particular.
- 5.1.2. Se logró calibrar el modelo por medio de un análisis por tramos, distribución y cantidad de secciones transversales.
- 5.1.3. Al calibrar el modelo se lograron estimar los parámetros a usar en el modelo, tales como la “n” de Manning y los demás valores que el programa utiliza por defecto como coeficientes de expansión y contracción entre otros.
- 5.1.4. El modelo puede utilizarse con otros caudales para futuras predicciones.
- 5.1.5. El modelado por tramos es una buena opción para condiciones complejas.
- 5.1.6. No siempre el uso de muchas secciones transversales en una condición como la estudiada es una buena alternativa para realizar la modelación hidráulica. Esto debido a que el río tiene un fuerte proceso de sedimentación lo cual produce cambios de pendiente de fondo, por lo que el programa tiene problemas para balancear la ecuación de la energía.

- 5.1.7. El uso de HEC-GeoRas permite visualizar dónde ubicar y cuántas secciones transversales se requiere utilizar.
- 5.1.8. Se logró calibrar con el caudal del $3,496 \text{ m}^3/\text{s}$ los Tramos 1-2-3 y 4.
- 5.1.9. El Tramo 5 ejerce una gran influencia aguas arriba incluso hasta el Tramo 3.
- 5.1.10. El perfil del Tramo 5 representa gráficamente el fenómeno en la realidad, sin embargo la modelación de este segmento produce alturas del agua mayores a las que se presentan en la realidad.
- 5.1.11. Al aumentar el caudal, aumenta la diferencia de las alturas del agua comparando las secciones con y sin Tramo 5, siendo mayores las diferencias al considerar el Tramo 5.
- 5.1.12. Al ir eliminando secciones aguas arriba del Tramo 5, se van reduciendo las diferencias de las alturas del agua comparando las secciones con y sin Tramo 5.
- 5.1.13. Con caudales menores a $1,150 \text{ m}^3/\text{s}$, las diferencias de las alturas del agua comparando las secciones con y sin Tramo 5 son menores a 1 m; si se eliminan las secciones aguas arriba del tramo 5 empezando desde la sección 162.931.
- 5.1.14. Para caudales mayores a $1,150 \text{ m}^3/\text{s}$, el comportamiento es complejo por lo que el modelo presenta dificultad para analizar el flujo.

5.1.15. En el Postproceso se logró crear un TIN de la superficie del agua, sin embargo hay varios puntos donde, debido a las características mismas de los software no permiten una correlación total entre lo que sucede en HEC-RAS y la imagen generada en ArcView.

5.2. Con respecto a las obras

5.2.1. El embudo natural al final del tramo en estudio ubicado en la comunidad de Pandora, ejerce un importante efecto regulador, determinando por un lado el comportamiento de las inundaciones aguas arriba y por otro lado regulando la dinámica de las descargas aguas abajo.

5.2.2. Los trabajos de limpieza del cauce del río Estrella aguas arriba del puente de Atalanta, efectivamente han permitido recuperar parte de la capacidad hidráulica del río.

5.2.3. Las obras de protección efectivamente han logrado mitigar los daños provocados por las inundaciones del río Estrella, salvaguardando la vida de los pobladores, los cuadrantes habitaciones, caminos de supervisión, caminos públicos, puentes y las plantaciones bananeras.

5.2.4. La modelación permitió generar el mapa de inundación para el caudal de calibración de 3,496 m³/s, para las condiciones sin y con obras de protección, reflejando las zonas de amenaza en función a la profundidad que alcanza el agua en las diferentes áreas.

- 5.2.5. La modelación sugiere restituir la altura original de 18.5 m.s.n.m. de las obras de protección a partir de la sección 3571.507 hacia aguas abajo, en la margen izquierda.
- 5.2.6. El modelo da sustento al criterio de priorizar el desarrollo de las obras según la sensibilidad, avanzando de las áreas de menor riesgo hacia las de mayor riesgo de inundación, esto es de las áreas de mayor elevación y alejadas del río hacia las de menor elevación y más cercanas al río.
- 5.2.7. La combinación entre diferentes tecnologías, el criterio del experto, las medidas de protección estructurales en conjunto con medidas de prevención del riesgo, como planes de emergencia y un uso racional de los recursos; forman una alternativa muy efectiva para la gestión de recursos naturales.

6. RECOMENDACIONES

6.1. Con respecto Software de modelación.

- 6.1.1. Se recomienda realizar el mismo proceso de modelación utilizando Arc-GIS 10, ya que desde Octubre del presente año se encuentra disponible la extensión HEC-GeoRAS para esta versión.

6.1.2. Para el Tramo 5, se recomienda realizar una modelación hidráulica con régimen de flujo no permanente.

6.1.3. Con respecto al mapa generado en el Postproceso, se recomienda utilizarlo sólo como una herramienta visual y para la toma de decisiones basarse en los resultados de HEC-RAS.

6.2. Con respecto a las obras.

6.2.1. Se recomienda restituir la altura original de 18.5 m.s.n.m. de las obras de protección a partir de la sección 3571.507 hacia aguas abajo, en la margen izquierda; así mismo se recomienda incrementar el bordo libre.

6.2.2. Se recomienda establecer un programa de monitoreo de las estructuras de protección, a efecto de orientar y priorizar el programa de mantenimiento.

6.2.3. Es recomendable continuar con el programa de siembra de Vetiver en las obras de protección.

6.2.4. Se recomienda continuar con el programa mantenimiento y limpieza de sedimentos del cauce del río Estrella y de las obras de protección de acuerdo al orden de prioridades según el riesgo a las inundaciones.

7. BIBLIOGRAFIA

- Actas de las I Jornadas Técnicas Sobre SIG y Teledetección en el Ámbito de la Ingeniería Forestal y del Medio Natural – SIGTEFOR (2009, Madrid, España) 2009. Aplicaciones de los SIG al análisis y gestión del riesgo de inundaciones: avances recientes.
- Alvarado Montero, R. 2006. Manejo de Inundaciones en el Valle de La Estrella mediante un modelo de flujo bidimensional no permanente. Tesis Lic. San José, CR. UCR. 88 p.
- Amador, JA; Chacón, RE y Lizano, O. 1994, Estudio de efectos geofísicos del Terremoto de Limón mediante percepción remota y análisis hidrometeoro lógico. Revista Geológica de América Central. Abril 1994. 153, 169.
- Bruce, P. y Casasola, R. 2003. Control Inundaciones Finca Fortuna, Valle La Estrella. *In* Proyecto Control Inundaciones Finca Fortuna, Valle La Estrella. Costa Rica. p 29.
- Bruce, P. y Casasola, R. 2005. Diagnostico Inundaciones Valle La Estrella. *In* Diagnostico Inundaciones Valle La Estrella. Costa Rica. p 60.
- Cárdenas Panduro, A. Aplicación de sistemas de información geográfica para el modelamiento de zonas con riesgo de inundación. Caso Estudio Río Lurin.
- Chow, VT. 1985. Hidráulica de los Canales Abiertos. Tercera Edición. México D. F, Editorial Diana. 633p.
- Denyer, P; Arias, O y Personius, S.1994. Efecto tectónico del Terremoto de Limón. Revista Geológica de América Central. Abril 1994.39, 52.
- Gracia Sánchez, J; Maza Álvarez JA. Manual de Ingeniería de Ríos. Morfología de Ríos. (en línea). México. Consultado 1 sep. 2011. Disponible en <http://foros.construaprende.com/manual-de-ingenieria-de-rios-a-j-maza-alvarez-vt6208.html>

- Grant *et al.* 2004. Comisión sobre la problemática de inundaciones en la Vertiente Atlántica. *In* Comisión sobre la problemática de inundaciones en la Vertiente Atlántica. Costa Rica. p 44.
- Introducción al uso de ArcView 3.2. Consultado 02 de Octubre del 2011. Disponible en <http://www.xeologosdelmundu.org/files/Tallerintrocucci%C3%B3nalusodeARCVIEW3.pdf>
- Martín Vide, JP. 2002. Ingeniería de ríos. Segunda Edición. Barcelona, España. Ediciones de la Universidad Politécnica de Catalunya. 379p.
- Martín, JP. 2003. Ingeniería de Ríos. Segunda Edición. México D. F, Ediciones Alfaomega. 331p.
- Mora, S. y Mora, R. 1994. Los deslizamientos causados por el Terremoto de Limón: Factores de control y comparación con otros eventos en Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*. Abril 1994. 139, 151.
- Mora, S. y Yasuda, S. 1994. Licuefacción de suelos y fenómenos asociados durante el Terremoto de Limón. *Revista Geológica de América Central*. Abril 1994. 121, 131.
- Oreamuno V, R. y Fernández A, RJ. 2009. Análisis hidrológico e hidráulico para la cuenca del río Estrella. *In* Análisis hidrológico e hidráulico para la cuenca del río Estrella. Costa Rica. p 32.
- Roberson, J. A; Crowe, C. T. 1985, *Mecánica de Fluidos*. Primera Edición. México D. F, Nueva Editorial Interamericana 680p.
- Sotelo, G. 2000, *Hidráulica General*. México D. F, Limusa 561p.
- Vergara, MA.1993. *Técnicas de Modelación en Hidráulica*. Primera Edición. México D. F, Ediciones Alfaomega. 294p.
- Villón, M. 2008. *HEC-RAS Ejemplos*. Segunda Edición. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 732p.

- Villón, M. 2008. Hidráulica de Canales. Segunda Edición. Cartago, Costa Rica, Editorial Tecnológica de Costa Rica. 446p.

8. ANEXOS

8.1. Ubicación y planta y secciones transversales para monitoreo de sedimentación.

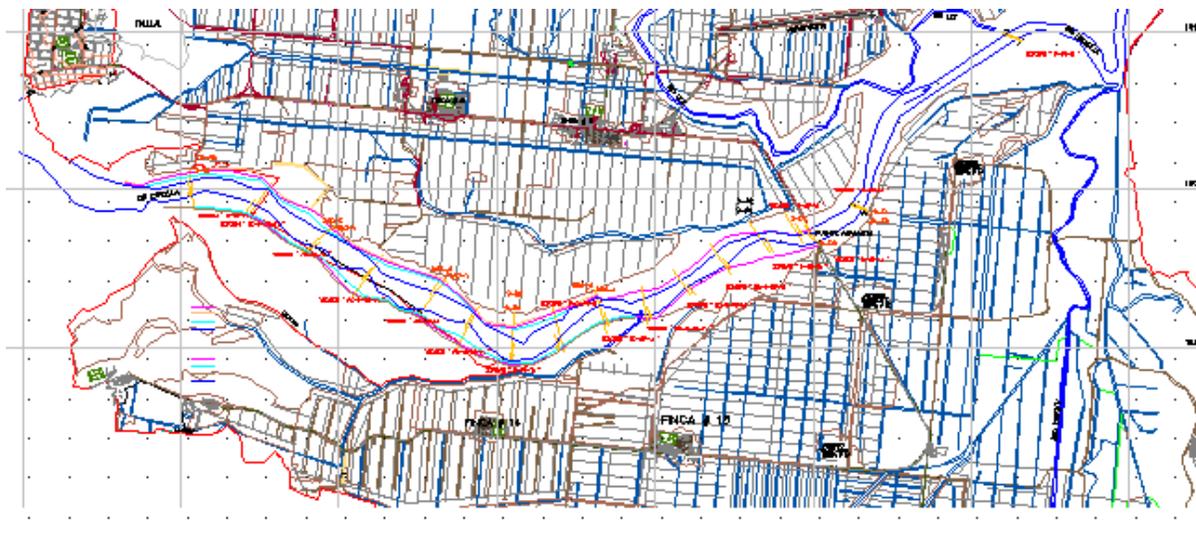


Figura 8.1. Planta de ubicación de secciones de monitoreo

Fuente: Consultopo

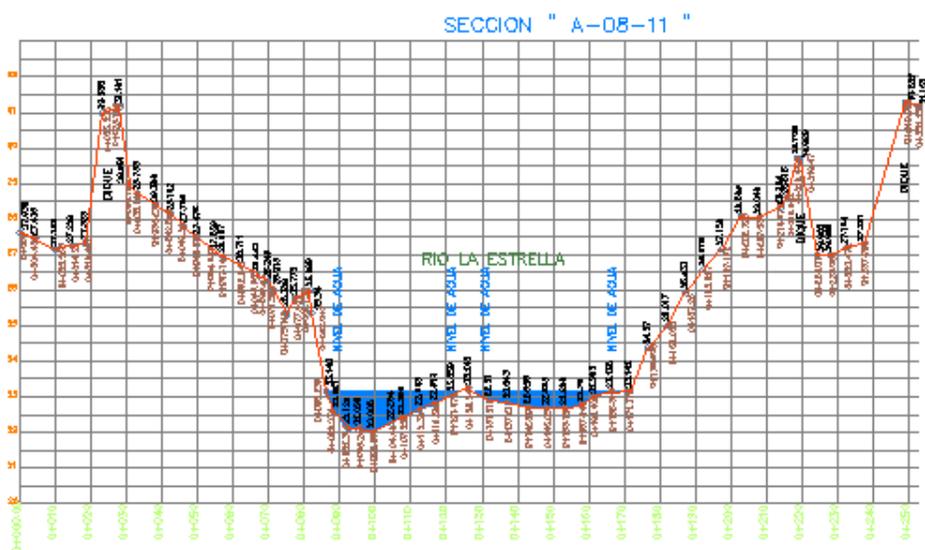


Figura 8.2. Sección A-08-11

Fuente: Consultopo

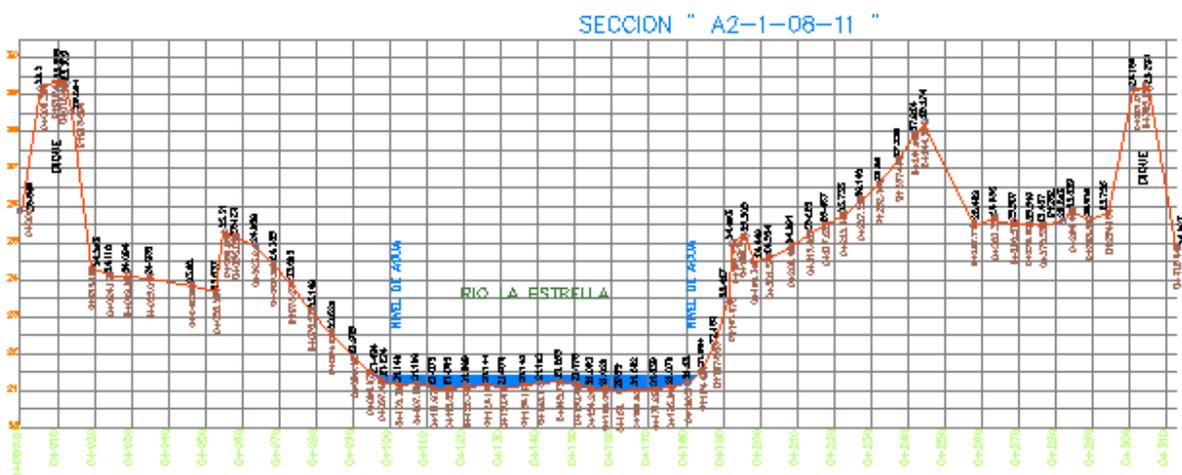


Figura 8.3. Sección A2-1-08-11

Fuente: Consultopo

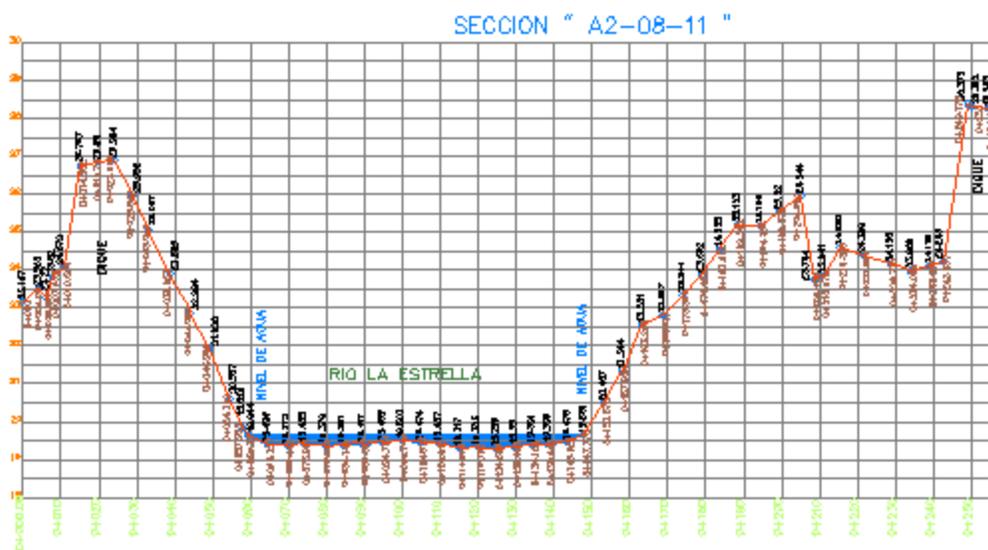


Figura 8.4. Sección A2-08-11

Fuente: Consultopo

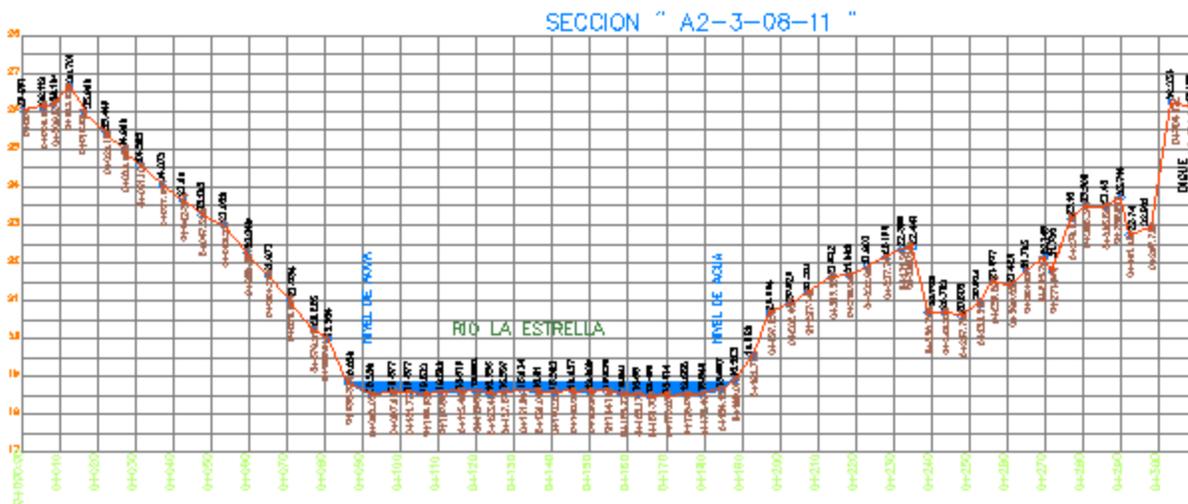


Figura 8.5. Sección A2-3-08-11

Fuente: Consultopo

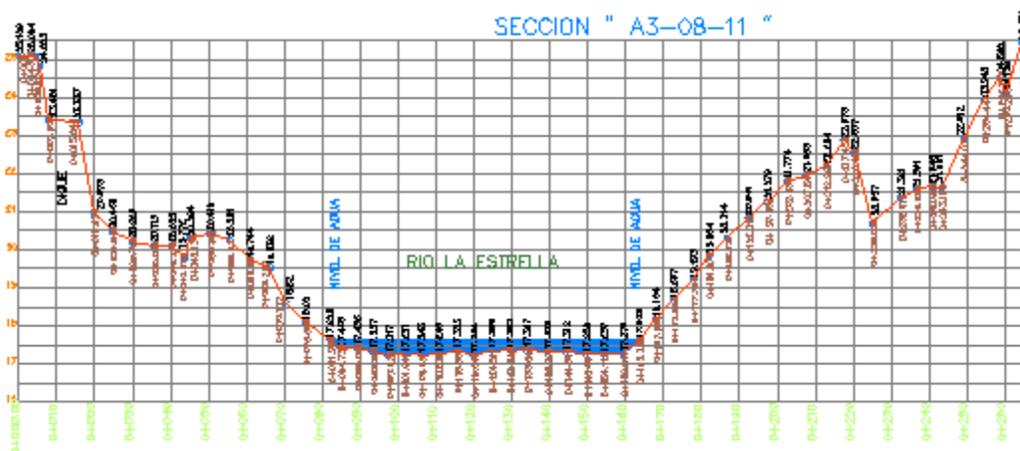


Figura 8.6. Sección A3-08-11

Fuente: Consultopo

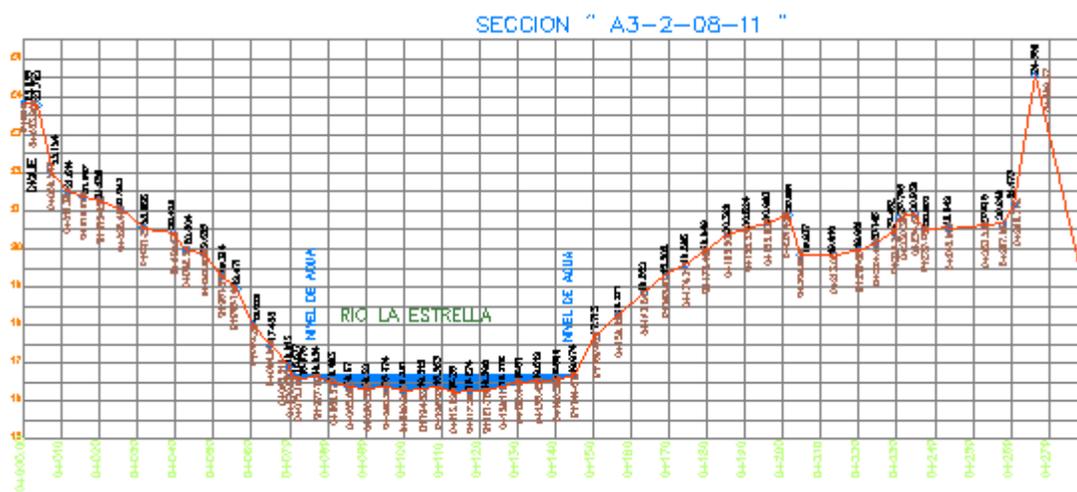


Figura 8.7. Sección A3-2-08-11
Fuente: Consultopo

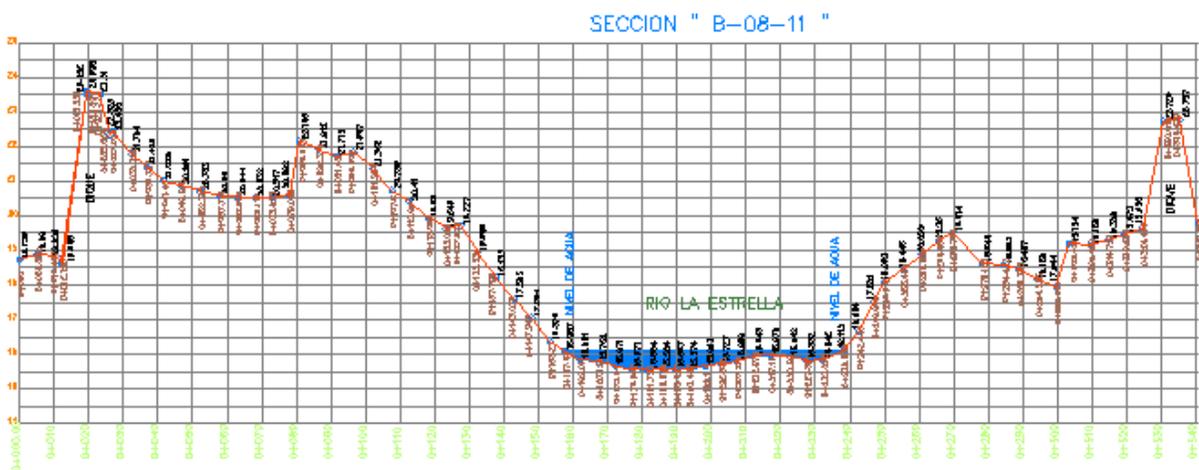


Figura 8.8. Sección B-08-11
Fuente: Consultopo

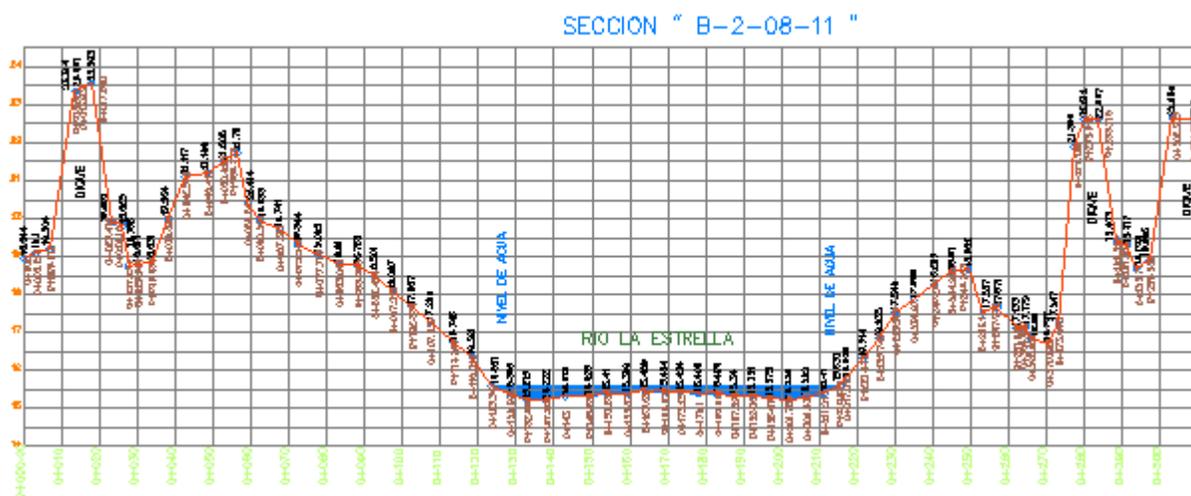


Figura 8.9. Sección B-2-08-11

Fuente: Consultopo

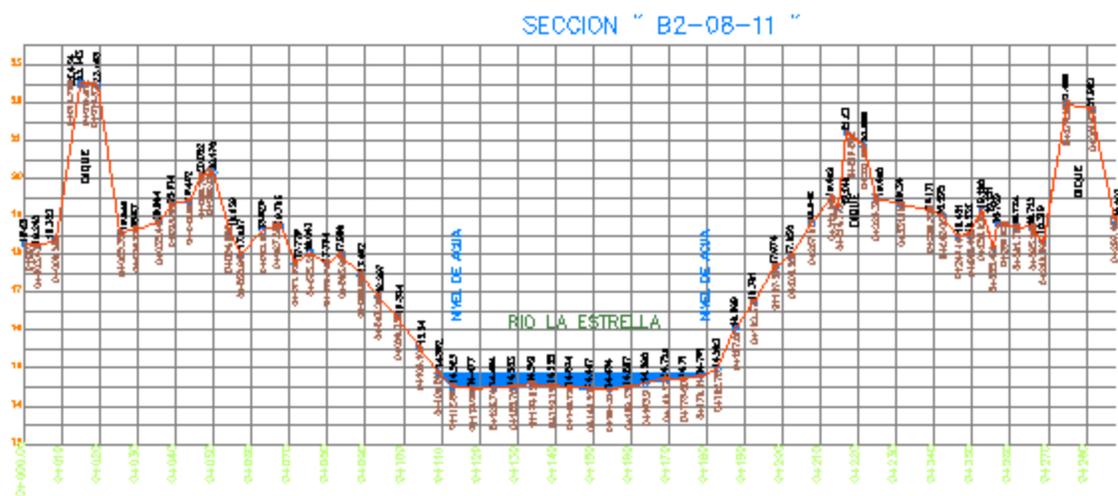


Figura 8.10. Sección B2-08-11

Fuente: Consultopo

SECCION " B2-2-08-11 "

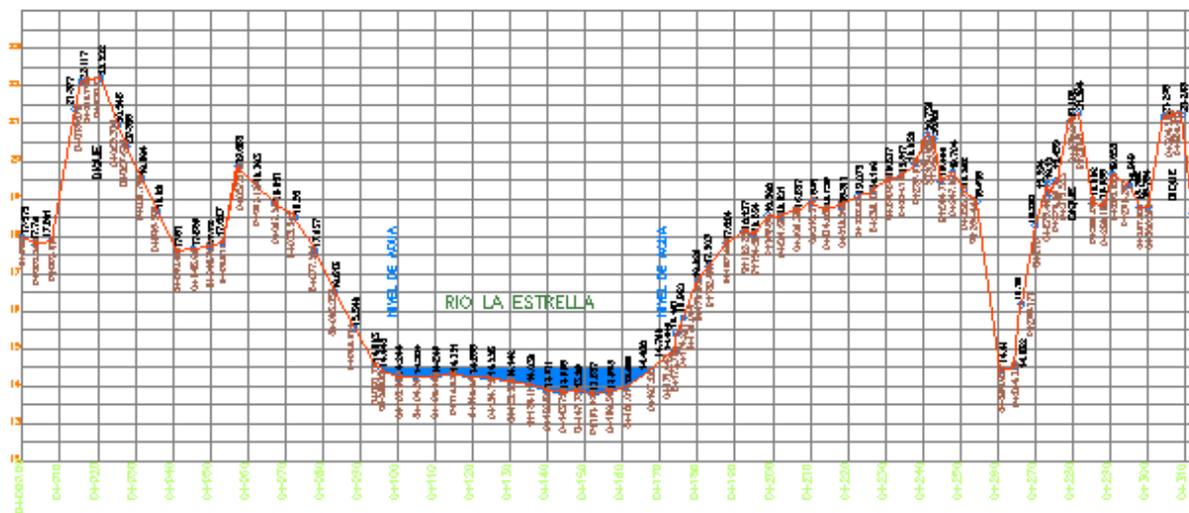


Figura 8.11. Sección B2-2-08-11

Fuente: Consultopo

SECCION " B2-3-08-11 "

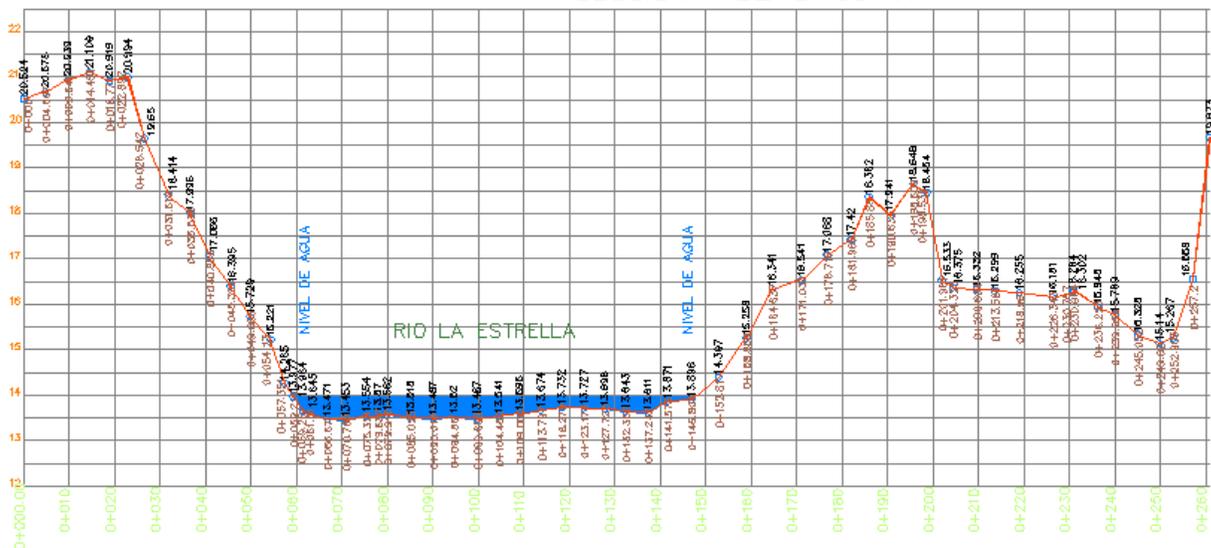


Figura 8.12. Sección B2-3-08-11

Fuente: Consultopo

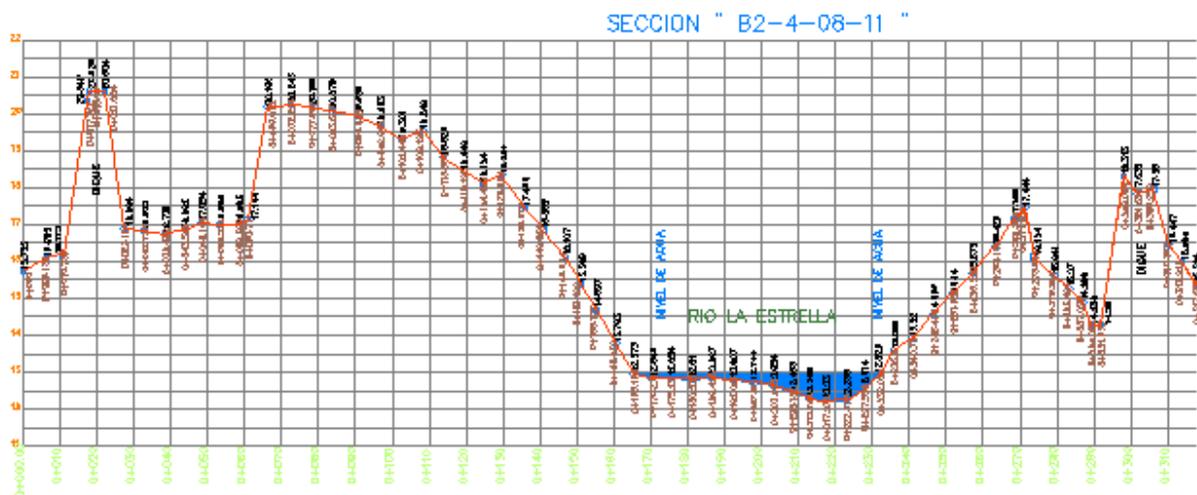


Figura 8.13. Sección B2-4-08-11

Fuente: Consultopo

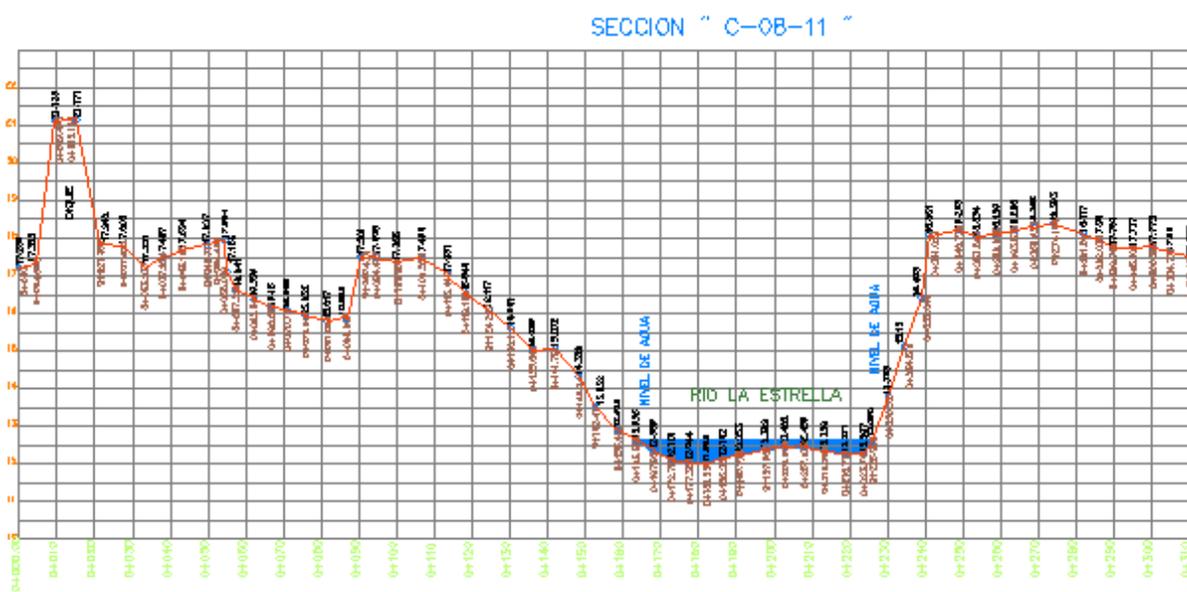


Figura 8.14. Sección C-08-11

Fuente: Consultopo

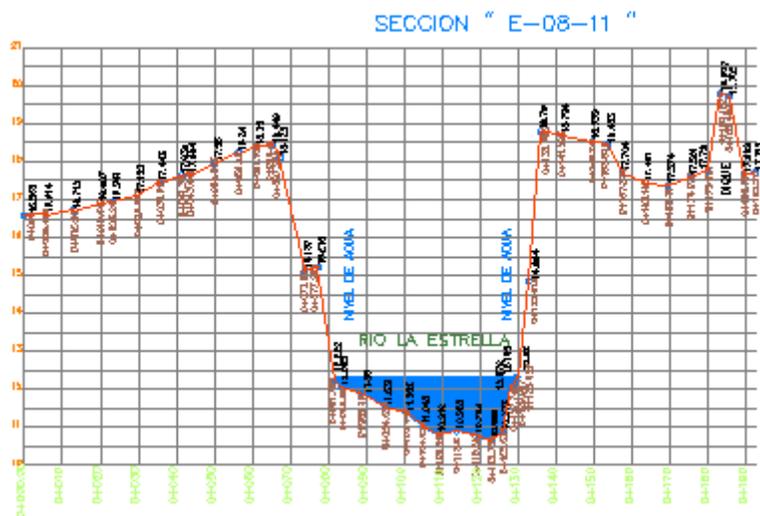


Figura 8.17. Sección E-08-11

Fuente: Consultopo

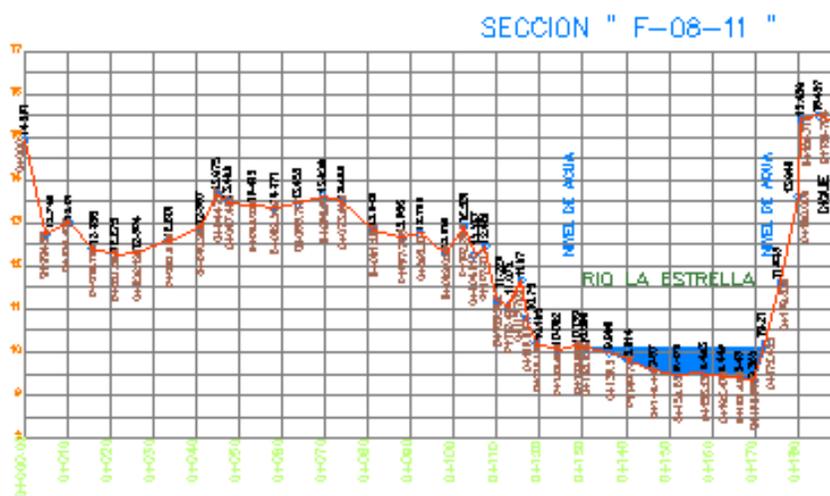


Figura 8.18. Sección F-08-11

Fuente: Consultopo

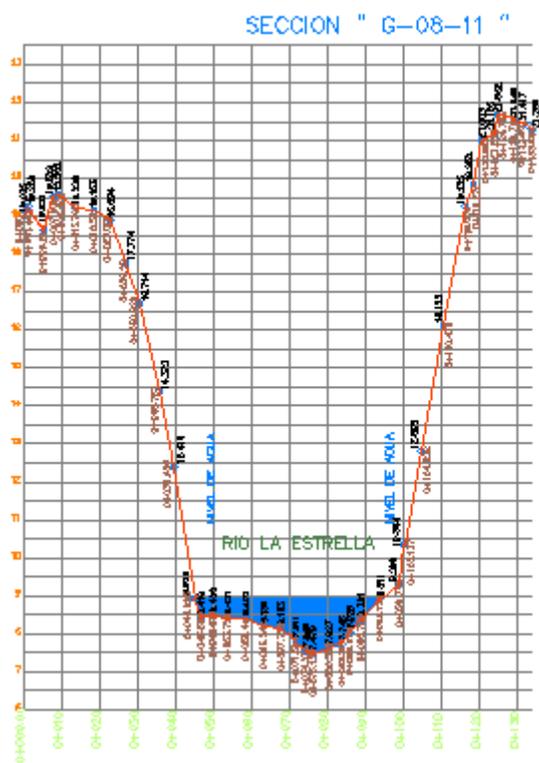
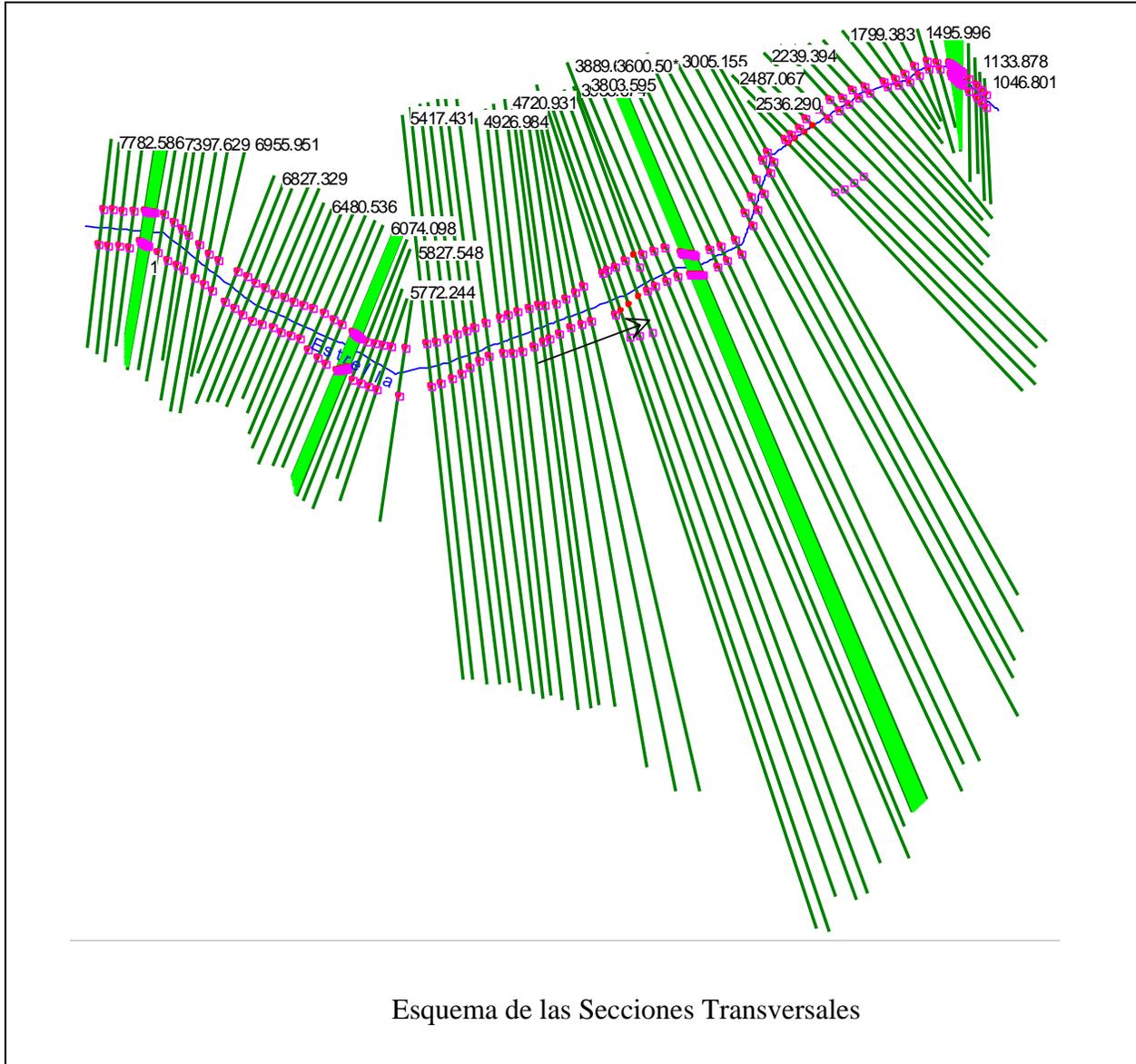


Figura 8.19. Sección G-08-11

Fuente: Consultopo

8.2. Secciones generadas en el Proceso de aguas arriba a aguas abajo.



Secciones transversales completas de aguas arriba hacia aguas abajo

