

**ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE LA CIÉNAGA LA VILLA
(MACHADO) Y SUS INTERCONEXIONES EN LA ECORREGIÓN DE LA
MOJANA A TRAVÉS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

**OSCAR IVAN HOYOS ARRIETA
ANDRI MUÑOZ ROBAYO**



Pontificia Universidad
JAVERIANA
Colombia

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
BOGOTÁ D.C.
2016**

**ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE LA CIÉNAGA LA VILLA
(MACHADO) Y SUS INTERCONEXIONES EN LA ECORREGIÓN DE LA
MOJANA A TRAVÉS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

**OSCAR IVAN HOYOS ARRIETA
ANDRI MUÑOZ ROBAYO**

**JORGE ESCOBAR – VARGAS, IC, MSc, PhD
DIRECTOR**

**TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OPTAR AL TÍTULO DE MAGISTER EN INGENIERÍA CIVIL**

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD JAVERIANA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN HIDRÁULICA E HIDROLOGÍA
BOGOTÁ D.C.**

2016

APROBACIÓN

El Trabajo de grado con título “ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE LA CIÉNAGA LA VILLA (MACHADO) Y SUS INTERCONEXIONES EN LA ECORREGIÓN DE LA MOJANA A TRAVÉS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL”, desarrollado por los estudiantes Oscar Ivan Hoyos Arrieta y Andri Muñoz Robayo, en cumplimiento de uno de los requisitos depuestos por la Pontificia Universidad Javeriana, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, para optar el Título de Magister en Ingeniería Civil, fue aprobado por:

Jorge Escobar – Vargas, IC, MSc, PhD
Director

Jurado 1

Jurado 2

Jurado 3

**ESTUDIO DE LA HIDRODINÁMICA DE LA CIÉNAGA LA VILLA
(MACHADO) Y SUS INTERCONEXIONES EN LA ECORREGIÓN DE LA
MOJANA A TRAVÉS DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS
COMPUTACIONAL**

OSCAR HOYOS ARRIETA
ANDRI MUÑOZ ROBAYO

La Pontificia Universidad Javeriana, no es responsable por los conceptos emitidos por los autores investigadores del presente trabajo, por lo cual son responsabilidad absoluta de sus autores y no comprometen la idoneidad de la institución ni de sus valores

DEDICATORIA

A Dios
por darme la oportunidad de existir y compartir tan hermoso regalo con las personas
que me rodean, las que han llegado de una u otra forma y las que han de llegar a mí
para aumentar la ya frondosa y excelsa experiencia de vivir.

A mis padres
Emerita
Por ser escudo, lanza y espada para librar las épicas batallas que me ha ofrecido la
vida.

Jorge
Por ser toque de añejos para dar excelente sabor al elixir de mi vida.

A mis hermanos Eliana y Jorge
Por ser fieles acólitos de vida.
A Durky Saray, Jorlis Emilio y Fhiorella Zoe
Esperanzas de vida.

Oscar Hoyos Arrieta.

A Dios y a mi familia

Andri

AGRADECIMIENTOS

Al Fondo Adaptación, en especial a los integrantes del Proyecto Mojana, por toda su colaboración y la información suministrada, sin esta no se hubiera podido desarrollar la presente investigación.

Al Ingeniero Aníbal Pérez García, IC, MSc, PhD, por los conceptos brindados y su ayuda en la estructuración de la presente investigación, así mismo por sus lazos de amistad brindados ampliamente sin restricciones de ninguna clase.

Al Ingeniero Jorge Escobar – Vargas, IC, MSc, PhD, por los conceptos brindados, el entusiasmo en el estudio del caso, y por su dirección en esta investigación, apoyo fundamental para el desarrollo del presente trabajo, que sin su ayuda no se hubiera podido realizar.

CONTENIDO

.....	1
RESUMEN.....	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓN.....	3
1. MARCOS DE REFERENCIA.....	6
1.1. Marco Geográfico	6
1.2. Marco Conceptual.....	7
1.3. Marco Teórico.....	8
1.3.1. Planteamiento de las Ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant).....	8
1.3.2. Método Numérico.....	9
1.4. Marco de Antecedentes	10
2. PROTOCOLO DE MODELACIÓN	13
2.1 Definición tipo de modelo.....	13
2.2 Definición del modelo conceptual del sistema	14
2.2.1 Recolección de Información de Campo	14
2.2.2 Definición del Dominio de Estudio	17
2.2.3 Definición de Unidades de Variabilidad Espacial	18
2.2.4 Definición de Procesos Relevantes	18
2.3 Selección del Código Computacional	22
2.3.1 Descripción del Código Computacional	23
2.3.2 Ecuaciones de Gobierno del Código Computacional	27
2.4 Diseño del Modelo	31
2.4.1 Definición de Condición de Fronteras	31
2.4.2 Definición de Condiciones Iniciales.....	36
2.4.3 Definición de la Geometría de Entrada del Modelo.....	38
2.5 Análisis de Sensibilidad	43
2.6 Calibración.....	44
2.7 Escenarios Críticos.....	45

3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	47
3.1	Resultados de niveles de agua y campos de velocidad.....	47
3.1.1	Niveles de agua	47
3.1.2	Campos de velocidad	53
3.2	Análisis de sensibilidad.....	58
3.3	Calibración.....	63
3.4	Escenarios críticos.....	65
3.4.1	San Benito Abad	66
3.4.2	La Jegua	77
4.	DISCUSIÓN.....	87
5.	CONCLUSIONES	90
5.1	Conclusiones Generales.....	90
5.2	Trabajo futuro	92
5.3	Recomendaciones	92
6.	BIBLIOGRAFÍA.....	93

FIGURAS

Figura 1. Mapa de localización general de la ecorregión de La Mojana	6
Figura 2. Mapa de localización de la ciénaga La Villa y sus principales conexiones	7
Figura 3. Representación gráfica del modelo de aguas someras	8
Figura 4. Protocolo de modelación	13
Figura 5. Tipos de modelos	14
Figura 6. Modelo de elevación digital (DEM) de la ciénaga La Villa y sus interconexiones	15
Figura 7. Localización espacial de las estaciones meteorológicas en la ecorregión de La Mojana.	16
Figura 8. Ciénaga La Villa e interconexiones	17
Figura 9. Modelo conceptual de la investigación	20
Figura 10. Análisis multitemporal de manchas de inundación. Enero 2012.....	21
Figura 11. Análisis multitemporal de manchas de inundación. Marzo 2011.	21
Figura 12. Malla escalonada de Delft 3D-Flow	24
Figura 13. Definición del nivel de agua (ζ), profundidad (d) y profundidad total H	29
Figura 14. Ejemplo de Malla σ	29
Figura 15. Caudales de entrada en el río San Jorge.	32
Figura 16. Caudales de entrada en el caño Castillo.	33
Figura 17. Caudales de entrada en el arroyo Dorada.....	34
Figura 18. Caudales y niveles de salida en el río San Jorge y el caño grande de Santiago.....	35
Figura 19. Curva relación QH en la salida del río San Jorge.....	35
Figura 20. Curva relación QH en la salida del caño Grande de Santiago.....	36
Figura 21. Nivel de agua de la condición inicial de las simulaciones.....	37
Figura 22. Ortofotos del cuerpo cenagoso La Villa.	38
Figura 23. Geometría de entrada del modelo Delft 3D.	38
Figura 24. Malla irregular.....	39
Figura 25. Malla regular con dominio computacional igual a dominio conceptual.	39
Figura 26. Malla regular con dominio computacional ajustado, 5.953 celdas.....	40
Figura 27. Malla regular con dominio computacional ajustado, 74.205 celdas.....	40
Figura 28. Malla regular con dominio computacional ajustado, 27.711 celdas.....	40
Figura 29. Malla regular con dominio computacional ajustado, 296.820 celdas.....	40
Figura 30. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 5.953 celdas.	41
Figura 31. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 27.711 celdas.	42
Figura 32. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 74.205 celdas.	42
Figura 33. Localización de puntos de observación para el análisis de sensibilidad.....	43

Figura 34. Localización de puntos de observación para la calibración	44
Figura 35. Ubicación de las poblaciones San Benito de Abad y Jegua.	46
Figura 36. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m ³ /s. Caño Castillo: 7 m ³ /s. Arroyo Dorada: 1 m ³ /s.	49
Figura 37. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m ³ /s. Caño Castillo: 13 m ³ /s. Arroyo Dorada: 2 m ³ /s.	49
Figura 38. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m ³ /s, Caño Castillo: 50 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.	50
Figura 39. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m ³ /s, Caño Castillo: 80 m ³ /s, Arroyo Dorada: 2 m ³ /s.	50
Figura 40. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m ³ /s, Caño Castillo: 115 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.....	51
Figura 41. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m ³ /s, Caño Castillo: 130 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.....	51
Figura 42. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s.	52
Figura 43. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s.	52
Figura 44. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m ³ /s. Caño Castillo: 7 m ³ /s. Arroyo Dorada: 1 m ³ /s.	54
Figura 45. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m ³ /s. Caño Castillo: 13 m ³ /s. Arroyo Dorada: 2 m ³ /s.	54
Figura 46. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m ³ /s, Caño Castillo: 50 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.	55
Figura 47. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m ³ /s, Caño Castillo: 80 m ³ /s, Arroyo Dorada: 2 m ³ /s.	55

Figura 48. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m ³ /s, Caño Castillo: 115 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.....	56
Figura 49. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m ³ /s, Caño Castillo: 130 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s.....	56
Figura 50. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s.	57
Figura 51. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s.	57
Figura 52. Localización de puntos de observación representativos para cuerpos de agua tipo lotico, lentico y desembocadura.	59
Figura 53. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74) Cuerpo de agua tipo lotico. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.	60
Figura 54. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210). Cuerpo de agua tipo lentico. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.	61
Figura 55. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 3: Caudales Máximos 2009. Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181). Cuerpo de agua tipo desembocadura. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.....	62
Figura 56. Comparación puntos de escenarios en estado estacionario modelados contra series de tiempo del modelo Sobek 1D del FONDO ADAPTACIÓN	63
Figura 57. Comparación puntos de escenarios en estado estacionario modelados contra series de tiempo del modelo Sobek 1D del FONDO ADAPTACIÓN	65
<i>Figura 58. Modelo Conceptual del Sistema. Ubicación de la población de San Benito Abad.....</i>	67
Figura 59. San Benito de Abad (Cabecera municipal). Ortofoto tomada en el año 2013 por el Fondo Adaptación.....	67
Figura 60. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m ³ /s. Caño Castillo: 7 m ³ /s. Arroyo Dorada: 1 m ³ /s. San Benito de Abad.....	69
Figura 61. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m ³ /s. Caño Castillo: 13 m ³ /s. Arroyo Dorada: 2 m ³ /s. San Benito de Abad.	69

Figura 62. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m ³ /s, Caño Castillo: 50 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. San Benito de Abad.....	70
Figura 63. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m ³ /s, Caño Castillo: 80 m ³ /s, Arroyo Dorada: 2 m ³ /s. San Benito de Abad.	70
Figura 64. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m ³ /s, Caño Castillo: 115 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. San Benito de Abad.	71
Figura 65. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m ³ /s, Caño Castillo: 130 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. San Benito de Abad.	71
Figura 66. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s. San Benito de Abad.	72
Figura 67. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s. San Benito de Abad.	72
Figura 68. Ubicación del punto de observación modelado y del punto de la medición de la huella de inundación.	74
Figura 69. Huella de Inundación 2010-2011.....	74
Figura 70. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012 (Vergara, 2016).....	75
Figura 71. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012 (Vergara, 2016).....	75
Figura 72. Comparación nivel de terreno - Nivel de agua modelado - Nivel de huella de inundación en la población de San Benito de Abad.....	76
Figura 73. Modelo Conceptual del Sistema. Ubicación de la población de La Jegua.....	78
Figura 74. La Jegua. Ortofoto tomada en el año 2013 por el Fondo Adaptación.....	78
Figura 75. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m ³ /s. Caño Castillo: 7 m ³ /s. Arroyo Dorada: 1 m ³ /s.....	79
Figura 76. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m ³ /s. Caño Castillo: 13 m ³ /s. Arroyo Dorada: 2 m ³ /s. La Jegua.....	79
Figura 77. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m ³ /s, Caño Castillo: 50 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. La Jegua.....	80

Figura 78. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m ³ /s, Caño Castillo: 80 m ³ /s, Arroyo Dorada: 2 m ³ /s. La Jegua.	80
Figura 79. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m ³ /s, Caño Castillo: 115 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. La Jegua.	81
Figura 80. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m ³ /s, Caño Castillo: 130 m ³ /s, Arroyo Dorada: 20 m ³ /s. La Jegua.	81
Figura 81. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s. La Jegua.	82
Figura 82. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m ³ /s, Caño Castillo: 165 m ³ /s, Arroyo Dorada: 19 m ³ /s. La Jegua.	82
Figura 83. Ubicación del punto de observación modelado y del punto de la medición de la huella de inundación.	84
Figura 84. Huella de Inundación 2010-2011.	84
Figura 85. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012. Imagen del río San Jorge y la Iglesia de Jegua en épocas de niveles de agua bajos.	85
Figura 86. Comparación nivel de terreno - Nivel de agua modelado - Nivel de huella de inundación en la población de San Benito de Abad.	85

TABLAS

Tabla 1. Escenarios de simulación.	22
Tabla 2. Condiciones de frontera para los escenarios de simulación iniciales.	32
Tabla 3. Condiciones de frontera para los escenarios de simulación adicionales.	36
Tabla 4. Puntos de observación para análisis de sensibilidad	44
Tabla 5. Puntos de observación para calibración	45

RESUMEN

Las condiciones atípicas que se presentaron con el fenómeno de la niña durante los años 2010-2011 pusieron en evidencia nacional las falencias en la ecorregión de La Mojana en cuanto a planificación y control de inundaciones. Por tanto, identificar el comportamiento hidrodinámico de los cuerpos cenagosos ayudará a establecer soluciones respecto a la sostenibilidad del recurso hídrico y a sistemas de alertas tempranas a la población en condición de riesgo. El objetivo principal de la presente investigación, es evaluar el comportamiento hidrodinámico del hidrosistema cenagoso La Villa (Machado) que hace parte de la región de La Mojana, mediante un modelo numérico bidimensional (Delft 3D) basado en la solución de las ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant) con el método de diferencias finitas, bajo condiciones normales y posibles escenarios de inundación. La metodología utilizada se basa en un protocolo de modelación, teniendo en cuenta la definición del tipo de modelo, del modelo conceptual del sistema, de la selección del código computacional y del diseño del modelo; asimismo, el análisis de sensibilidad, la calibración, y por último el establecimiento de escenarios críticos. A partir de los resultados obtenidos, se define que para la realización de simulaciones hidrodinámicas se debe tener en cuenta la extensión de la zona, e identificar si ésta cabe dentro de la escala de modelación hidrodinámica, se comprueba que la variabilidad del coeficiente de rugosidad de Manning no es muy influyente en los niveles de cuerpos de aguas someras y por último se verifican que los niveles obtenidos en el escenario de caudales cercanos a los máximos en el año 2010 (Escenario 6), presentan un buen ajuste a los niveles de huellas de inundación medidos por el IDEAM en las poblaciones de San Benito de Abad y Jegua.

Palabras Claves: Ciénagas de La Mojana, Hidrodinámica de Ciénagas, Ecuaciones de Aguas Someras, Delft 3D, Mecánica de Fluidos Computacionales, Modelación Numérica, Escenarios de Inundación, Modelo Bidimensional.

ABSTRACT

Anomalous conditions during El Niño-Southern Oscillation (ENSO) in its cold phase, during the years 2010-2011, have put in evidence the deficiencies in the ecorregion La Mojana regarding the planning and control of territory. Therefore, identifying the hydrodynamic behavior of the wetlands will help us to establish solutions for the sustainability of water resources, as well as the development of early warning systems for the population at risk condition. The main objective of this research is to evaluate the hydrodynamic behavior of the wetland “Ciénaga de La Villa (Machado)” that is part of La Mojana using the computational fluid dynamic platform DELFT 3D. This tool solves the Shallow Water Equations (Saint Venant) by means of the finite difference method in normal conditions and possible flooding scenarios. The methodology was based on a modelling protocol considering the model type, a conceptual model of the system, the selection of the software, and the model design. In addition to that, a sensitive analysis, calibration, and critical scenarios analyses are presented to assess the robustness of the simulations. From the results it was found that the correct definition of the computational domain is a critical step for the appropriate description of the scales of interest in the river-wetland interaction. It was also found that the Manning’s roughness coefficient is not very influential in the levels of the system due to the low velocities present in the wetland. Finally we showed that the water levels obtained for the scenarios that are close the maximum levels reported in 2010 (Scenario 6) have a good fit compared to the level traces of flooding measured by IDEAM in the towns of San Benito Abad and Jegua.

Keywords: Wetland, La Mojana, Hydrodynamics, Shallow Water Equations, Delft 3D, Computational Fluids Dynamics, Numerical Modeling, Flooding Scenario, 2D Model.

INTRODUCCIÓN

La Mojana es una ecorregión de especial importancia nacional que hace parte del complejo de humedales de la Depresión Momposina, la cual es una cuenca hidrográfica sedimentaria de 24.650 km², reguladora de los caudales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge. Estos humedales cumplen la función de amortiguación de inundaciones, ya que permiten distribuir las cabezas de agua originadas por lluvias en las partes altas de la región Andina, facilitando la decantación y acumulación de sedimentos, funciones de control indispensables para la costa Caribe (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012a).

En esta ecorregión, debido a sus características inundables, en la medida en que el poblamiento aumente de manera espontánea y desordenada, y la explotación económica de tierras y humedales se dé sin atención a los elementos naturales, crecerán los riesgos ambientales y los costos económicos derivados de la inundación, en especial cuando estos fenómenos superen los niveles históricos, como ha sucedido en los años recientes (CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2006).

Uno de los conflictos ambientales de la ecorregión La Mojana es el desarrollo de infraestructura, consistente en la construcción de obras civiles, tales como diques de control de inundación, que han generado daños en el equilibrio del complejo cenagoso y fluvial de la región. En los últimos años la infraestructura se ha orientado al control del agua mediante obras rígidas que afectan la dinámica hídrica y desestabilizan los sistemas hidrobiológicos, en lugar de adaptarse a las condiciones naturales para su aprovechamiento (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012a).

En (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012a), se plantea que algunos de los asuntos críticos a atender son el manejo, aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos, así como el monitoreo de la dinámica hídrica, sedimentológica y ecológica en tiempo real. Esto con el propósito de atender la pérdida de la funcionalidad de algunos ecosistemas y de la capacidad hídrica de la ecorregión.

En (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012b), se precisa que el funcionamiento natural del ecosistema de La Mojana ha sido alterado de manera significativa, debido en cierta medida a la intervención humana y esto acompañado de fenómenos naturales extremos, a tal punto que los ciclos y niveles tradicionales de inundaciones y sequías ya no ocurren en las condiciones regulares y se ha perdido la capacidad reguladora para amortiguar sus efectos al interior y al exterior de la ecorregión. Por lo que se presume que cualquier modelo de la hidrodinámica de los cuerpos cenagosos de la ecorregión realizados con anterioridad a la Ola Invernal 2010-2011, tales como los descritos en (Díaz-Granados, Camacho, & Alexander, 2001), (Restrepo, Toro, & Aguirre, 2006) y

(Zapata, 2005) puede estar representado unas condiciones que no se encuentran actualmente en la región.

A partir de la revisión de la información en (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012a) y (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012b) se evidencia la necesidad de establecer unos límites con respecto a los cuerpos de agua de la ecorregión La Mojana, que permitan una regulación en cuanto a asentamientos humanos y desarrollo de infraestructura, que reduzcan el nivel de riesgo para éstos. Para lograr esta meta es necesario inicialmente, conocer el comportamiento hidrodinámico de los cuerpos cenagosos de la ecorregión La Mojana.

La inundación en La Mojana corresponde a procesos naturales de ocurrencia periódica y se presenta asociada a las corrientes aluviales de los ríos Magdalena, Cauca y San Jorge y al sistema de ciénagas conexas, quebradas y caños de la región, como también, a la explotación inadecuada del oro, sin control ambiental, en los municipios del Bajo Cauca. Estas inundaciones han generado bastantes pérdidas en cada una de las olas invernales, sin embargo, unas de las más grandes pérdidas ocurrieron en el año 2005, donde fueron afectados alrededor de 67.088 Ha de cultivos y 4.931 familias (CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2006). Asimismo, según el (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012b), en la ecorregión de La Mojana se inundan periódicamente 201.821 Ha de 1.084.090 Ha de área municipal, teniendo en cuenta que los cuerpos de agua corresponden solamente a 140.806 Ha.

Dentro del ciclo hidrológico, las ciénagas desempeñan un rol crucial en el mantenimiento del equilibrio y la regulación de las cuencas hidrográficas, correspondiéndoles, entre otras funciones, la mitigación de impactos por inundaciones, absorción de contaminantes, retención de sedimentos y recarga de acuíferos. Además, proveen hábitats para animales y plantas, incluyendo un número representativo de especies amenazadas y en vía de extinción (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO).

Para una adecuada planificación y gestión de las regiones que se forman alrededor de las ciénagas, es recomendable entenderlos como sistemas integrales de recursos biológicos, provenientes del suelo y del agua, que desempeñan funciones vitales para el desarrollo sostenible, y que deben prevalecer sobre las formas de uso y ocupación que buscan imponer los asentamientos y actividades que se instalan en ellos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO). Por tanto identificar el comportamiento hidrodinámico de las ciénagas ayudará a establecer soluciones respecto a la sostenibilidad del recurso hídrico, a sistemas de alertas tempranas para la zona y a los Planes de Ordenamiento Territorial, teniendo en cuenta que hasta ahora en el país, éste tipo de modelaciones detallada se han realizado tan sólo en la ciénaga de Ayapel de la

región de La Mojana (Restrepo, 2005), (Restrepo, Toro, & Aguirre, 2006), (Zapata, 2005) sin tener en cuenta escenarios de inundación y con una metodología diferente a la propuesta en la presente investigación.

Recientemente el Fondo Adaptación realizó un modelo hidrodinámico 1D en el código computacional Sobek. Este modelo se realizó para toda la Ecorregión de La Mojana, se calibró con información observada en las estaciones hidroclimatológicas de la zona, pero se realizó a una escala bastante grande (DEM 400x400 m), sin embargo su información sirvió como insumo de forzamiento y calibración de la modelación de la presente investigación, teniendo en cuenta que en ésta se analiza detalladamente solo el cuerpo cenagoso de La Villa, el cual consta de la ciénaga La Villa con las ciénagas que se interconecta inmediatamente. El cuerpo cenagoso de La Villa se analiza, debido a su interconexión principal, la cual es el río San Jorge. Este río entra a la ciénaga La Villa por el costado occidental, se pierde en ella y luego vuelve a aparecer saliendo por el costado oriental de la ciénaga. Esta situación es muy particular, por tanto, es interesante analizarla.

Con base en el conocimiento de la problemática de la zona de estudio y su correspondiente justificación, la presente investigación evalúa el comportamiento hidrodinámico del hidrosistema cenagoso La Villa (Machado) que hace parte de la región de La Mojana mediante un modelo numérico bidimensional basado en las ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant), bajo condiciones normales y posibles escenarios de inundación. Para tal fin, se desarrolla un modelo computacional de las condiciones hidrodinámicas en la ciénaga La Villa (Machado) en la ecorregión de La Mojana. Con este modelo se comprueba la aplicabilidad de las ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant) en el comportamiento hidrodinámico en la ciénaga La Villa (Machado) en la región de La Mojana, mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración. Finalmente, se establecen escenarios críticos con diferentes niveles de inundación.

El presente documento se divide en cinco capítulos. El primer capítulo contiene los marcos de referencia, donde se describe la ubicación del área de estudio, los conceptos básicos, los planteamientos teóricos y los antecedentes de la investigación. En el segundo capítulo se presenta la metodología del proyecto, basada en un protocolo de modelación. El tercer capítulo muestra los resultados obtenidos con su respectivo análisis, y por último se encuentran los capítulos cuarto y quinto de discusión y conclusiones del estudio respectivamente.

1. MARCOS DE REFERENCIA

1.1. Marco Geográfico

La ecorregión de La Mojana, pertenece a la región fisiográfica del Caribe colombiano y a la región geográfica de la Depresión Momposina. Se localiza entre la margen izquierda del Brazo de Loba (río Magdalena), la margen izquierda del río Cauca desde Colorado (Antioquia) hasta su desembocadura en el Brazo de Loba y la margen derecha del río San Jorge desde la ciénaga de Ayapel hasta su desembocadura en el Brazo de Loba. La ecorregión está localizada en jurisdicción de cuatro departamentos (Sucre, Bolívar, Córdoba y Antioquia) y comprende 28 municipios (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, 2012a). Ver Figura 1.

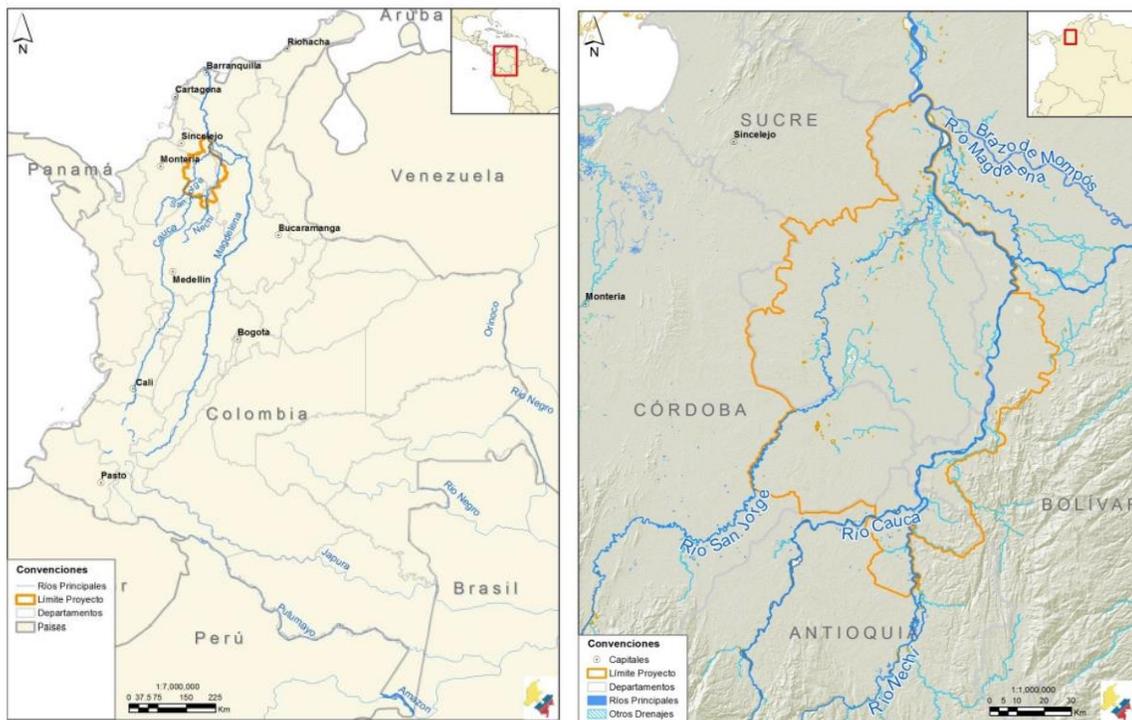


Figura 1. Mapa de localización general de la ecorregión de La Mojana
Fuente: (FONDO ADAPTACIÓN, 2013)

El ámbito geográfico regional de la ecorregión comprende dos zonas diferenciadas: los 11 municipios del núcleo central que abarcan un área de 10.892 km², localizados en los ecosistemas geoestratégicos, principalmente en las áreas inundables y zonas de humedales. La otra zona corresponde al área inmediata de los ecosistemas estratégicos regionales, donde se ubican la mayoría

de teorías anteriores. Si el cálculo de las ecuaciones que representan el modelo propuesto es capaz de ajustar las observaciones, entonces se habla de un modelo consistente con las mismas, y se dice también que el modelo numérico confirma las hipótesis (el modelo); si el cálculo no permite en ningún caso reproducir las observaciones, se habla de un modelo inconsistente con los datos y que refuta el modelo conceptual. A menudo, este término se utiliza como sinónimo de simulación numérica.

- Aguas Someras: son zonas acuáticas que tienen una extensión vertical mucho menor que la horizontal. Para esta investigación el termino se utilizará para las zonas de cuerpos de agua donde la relación entre la magnitud de la profundidad y cualquiera de las dimensiones horizontales es inferior $H:V = 1:100$.

1.3. Marco Teórico

1.3.1. Planteamiento de las Ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant)

El tipo de flujos que se pueden representar con las ecuaciones de Aguas Someras (Saint-Venant) son los de aguas poco profundas, es decir, aquellos en los que las extensiones horizontales son mucho mayores que las verticales (Inferior a $V:H=1:100$ aproximadamente). Este conjunto de flujos se presenta en ríos de planicies, lagunas, flujos geofísicos y ciénagas.

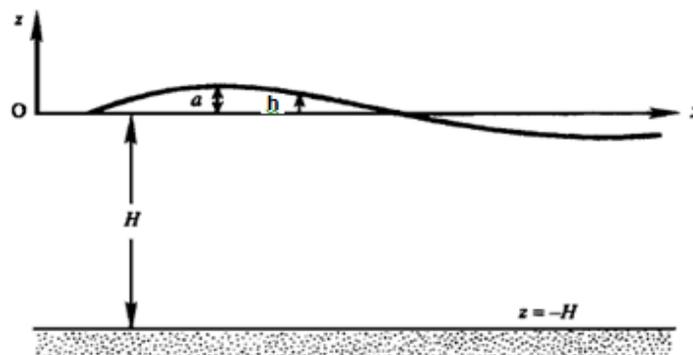


Figura 3. Representación gráfica del modelo de aguas someras
Fuente: Adaptado de (Kundu & Cohen, 2010)

Algunos de los supuestos más importantes consideradas para la deducción del modelo de Aguas Someras son:

- La magnitud de las componentes horizontales de la velocidad es superior a la de la componente vertical.
- Las fuerzas de masa que actúan, son la gravedad en la dirección vertical y la fuerza de Coriolis en el plano horizontal, esta última dependiendo de la escala del sistema.
- La curvatura de las líneas de corriente es pequeña, por lo que la distribución de la presión se considera hidrostática (López López, Álvarez-Ramirez, & Hernández López, 2009)

Con esto, el modelo de Aguas Someras es (Escobar Vargas, Diamessis, & Giraldo, 2012):

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(H + h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(H + h)v] = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - Z(u, v) = -g \frac{\partial h}{\partial x} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + Z(u, v) = -g \frac{\partial h}{\partial y} \quad (3)$$

Donde h es el desplazamiento de la superficie libre, H es la profundidad media, u y v son las velocidades horizontales, g es la aceleración de la gravedad, $Z(u, v)$ representan las fuerzas externas como por ejemplo el efecto de los vientos, la resistencia hidráulica (fricción), las condiciones geográficas del fondo (pendientes) o la fuerza de Coriolis (Escobar Vargas, Diamessis, & Giraldo, 2012).

Son necesarias condiciones iniciales y de contorno para la solución del sistema de Aguas Someras (Saint-Venant) y la calidad de la solución de estas depende de la información disponible.

1.3.2. Método Numérico

El método numérico utilizado es el de diferencias finitas, el cual se basa en la aproximación de la solución de un número finito de puntos. A su vez para la solución de las diferencias finitas se utilizó el método implícito. En este método la derivada espacial se aproxima en un nivel de tiempo posterior $l + 1$. Las formulaciones implícitas dan como resultado un conjunto de ecuaciones lineales

algebraicas con el mismo número de incógnitas. Por lo tanto, el método se reduce a la solución de un sistema de ecuaciones simultáneas en cada punto en el tiempo (Chapra & Canale, 2007).

1.4. Marco de Antecedentes

Se han realizado pocos intentos de modelar las condiciones hidrológicas e hidráulicas de los cuerpos de aguas conocidos en Colombia como ciénagas; éstos son los casos descritos en (Díaz-Granados, Camacho, & Alexander, 2001) (Toro & Gómez, 1997) y (Zapata, 2005).

Para esto se han utilizado diversos modelos, por ejemplo, el modelo de balance hídrico usado por (Díaz-Granados, Camacho, & Alexander, 2001) para las ciénagas Grande de Santa Marta, Zapatosa, Rinconada y Tesca; el de la ecorregión de La Mojana, el cual, se concentra en identificar las direcciones principales y de comunicación entre los distintos cuerpos de agua, y la magnitud de los volúmenes de intercambio resultantes, debido a estas comunicaciones, tendiendo esto a realizar un análisis de comportamiento hidráulico más regional y dejando de lado la propia hidrodinámica de los cuerpos de agua. Es decir, no se analizan los campos de velocidad en el interior de estos cuerpos, así como tampoco se contó con una información altimétrica confiable, por tanto, la modelación presenta resultados de aproximaciones preliminares y cualitativas.

Otro caso es el de la modelación hidrodinámica mediante la solución de las ecuaciones de aguas someras, usado por (Toro & Gómez, 1997) para simular el flujo en la ciénaga Grande de Santa Marta, teniendo en cuenta la influencia del Caño Clarín. Este caso de estudio cuenta principalmente con condiciones de frontera entre el mar y la ciénaga; caso diferente a la conexión entre dos ciénagas. En esta ocasión el modelo no pudo ser calibrado por falta de información de campo.

(Zapata, 2005) implementó un modelo basado en las ecuaciones de Navier Stokes, usando la aproximación hidrostática para la presión, para conocer el patrón de circulación del agua en el interior de la Ciénaga de Ayapel, usando la aplicación ELCOM (Estuary and Lake Computer Model). Este modelo utilizó como condiciones de frontera los resultados de un modelo de balance hídrico, sin llegar a validar el campo de velocidad en el interior de la ciénaga por falta de información de campo. Este trabajo tampoco analizó las expansiones y contracciones del área superficial de la ciénaga dependiendo de los niveles de la lámina de agua en ésta.

A partir del estudio de (Zapata, 2005), (Restrepo, Toro & Aguirre, 2006), desarrollaron un modelamiento matemático del nitrógeno y el fósforo en la Ciénaga de Ayapel, bajo el modelo ELCOM-CAEDYM, donde toman la hidrodinámica del modelo ELCOM y complementan la modelación con el módulo (CAEDYM) de calidad de agua para simular el transporte tridimensional de especies bioquímicas y su interacción física, química y biológica con el flujo.

De los resultados obtenidos en (Zapata, 2005) y (Restrepo, Toro & Aguirre, 2006), para las variables temperatura y velocidad, se puede inferir que no hay variaciones significativas en la vertical en la ciénaga de Ayapel, por lo tanto, emplear las ecuaciones de Aguas Someras es una opción óptima para la simulación de este tipo de cuerpos de agua que representaría un ahorro en los costos de tiempo en la aplicación de los modelos.

En zonas por fuera del territorio colombiano existen casos de aplicación de las ecuaciones de aguas someras para solucionar el problema de la hidrodinámica de cuerpos de agua con poca profundidad con relación a su extensión horizontal. (Arcos Espinosa, Jiménez Hernández, & Zavala Guerrero, 2012) logran describir el comportamiento hidrodinámico de la Laguna del Carpintero en la ciudad y puerto Tampico, México, a través de un modelo numérico solucionando las ecuaciones mediante diferencias finitas, lo que a su vez permite entender la dinámica del transporte de los sedimentos, y de factores físico-químicos de calidad del agua como Temperatura, pH, Salinidad, Turbidez.

Con respecto a las técnicas de discretización espacial para la solución de las ecuaciones de aguas someras, en (Fe Marqués, 2005) se hace un resumen sobre las más utilizadas en fluidos: elementos finitos, diferencias finitas y volúmenes finitos. Este trabajo concluyó que el método de los volúmenes finitos es muy ventajoso en la aplicación para la solución de las ecuaciones de aguas someras, así como los modelos 3D, debido a que permite una mayor adaptabilidad a condiciones de mallas no estructuradas y mayor entendimiento en el sentido físico del proceso de aplicación. También plantea que el tipo de ponderación utilizado por este método (constante en los volúmenes) permite aprovechar algunas propiedades conservativas, al tiempo que se plantean los algoritmos de resolución de forma muy ventajosa.

Otros autores como (Fernandez Nieto, 2003), (López López, Álvarez-Ramirez, & Hernández López, 2009) y (González-López & Ramirez León, 2011), plantean formas de solucionar las ecuaciones de Aguas someras con diferentes métodos y las aplican a situaciones particulares, pero ninguno de estos trabajos se realizaron en escenarios naturales reales.

Los trabajos analizados han aportado conocimiento hidrológico e hidráulico de las ciénagas. Desde balances hídricos entre cuerpos de agua cenagosos (hidrológicos), hasta los que han logrado describir el comportamiento hidrodinámico de cuerpos de aguas poco profundos (Zapata, 2005), (Restrepo C, 2005), (Restrepo, Toro & Aguirre, 2006).

A partir del fenómeno de La Niña de los años 2010 y 2011, se creó el Fondo Adaptación. Esta es una entidad adscrita al MINISTERIO DE HACIENDA Y CRÉDITO PÚBLICO DEL GOBIERNO COLOMBIANO creada para atender la construcción, recuperación y reactivación económica y social de las zonas afectadas por tal fenómeno (FONDO ADAPTACIÓN, 2016). El "Manejo del Sistema

Hídrico” enmarcado dentro del “Plan Integral de Ordenamiento Ambiental y Desarrollo Territorial de La Mojana” exige al Fondo Adaptación profundizar en la elaboración de estudios técnicos que permitan generar la información suficiente para construir un plan de intervenciones en la ecorregión de La Mojana, teniendo en cuenta que en este caso particular se pretende evitar la expansión de los efectos por las inundaciones, reducir la frecuencia de los desastres, mitigar el impacto a largo plazo de este problema recurrente y prevenir que a futuro vuelvan a presentarse crisis asociadas a fenómenos naturales con características similares al Fenómeno de La Niña 2010-2011 o aquellos que sean consecuencia de la variabilidad climática. Para garantizar esta condición, es necesario el desarrollo de un modelo hidrodinámico tridimensional o bidimensional que permita simular no sólo aspectos hidrológicos e hidráulicos, sino que también tenga la capacidad de simular la dinámica de sedimentos y aspectos de calidad de agua, con el fin de obtener una zonificación de la amenaza por inundación en la región (FONDO ADAPTACIÓN, 2013a), sin embargo hasta ahora se tiene información que sólo se ha realizado el modelo hidrodinámico en una dimensión utilizando el software Sobek. Sobek es un código computacional que realiza modelaciones en una y dos dimensiones en flujos de agua complejos (DELTARES, 2016).

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, esta investigación propone desarrollar un modelo hidrodinámico del cuerpo cenagoso La Villa y sus interconexiones, con una información topográfica y batimétrica detallada. Se busca determinar el campo de velocidades en el interior de estos cuerpos y las implicaciones que esto pueda tener en cuanto a niveles de inundación.

2. PROTOCOLO DE MODELACIÓN

Para el cumplimiento de los objetivos trazados, se realizó una metodología basada en el protocolo de modelación de la Figura 1.

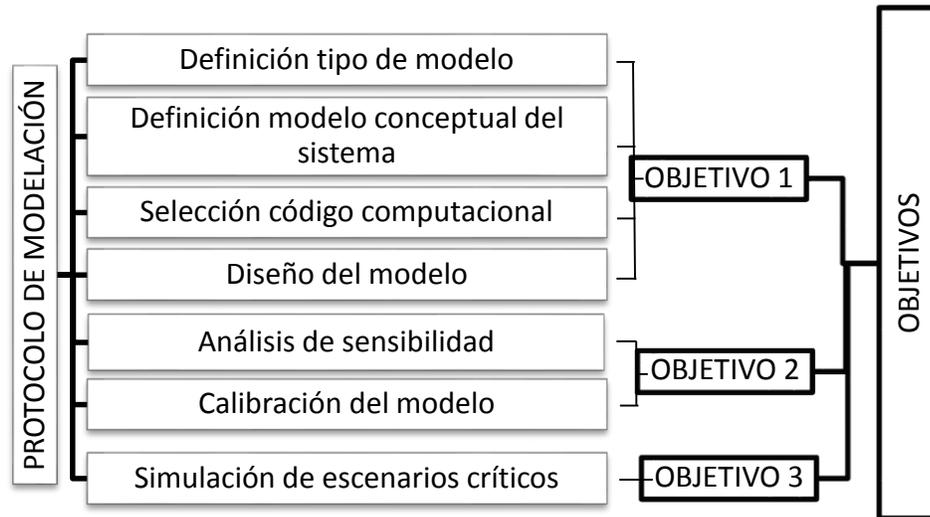


Figura 4. Protocolo de modelación

De acuerdo a la Figura 4 la metodología de la investigación se dividió, teniendo en cuenta cada uno de los objetivos específicos:

- Objetivo 1: Desarrollar un modelo computacional de las condiciones hidrodinámicas en la ciénaga de La Villa (Machado) en la ecorregión de La Mojana.
- Objetivo 2: Comprobar la aplicabilidad de las ecuaciones de Aguas Someras (Saint Venant) en el comportamiento hidrodinámico en la ciénaga de La Villa (Machado) en la región de La Mojana, mediante un análisis de sensibilidad de los parámetros de calibración.
- Objetivo 3: Establecer escenarios críticos con diferentes niveles de inundación.

A continuación, se describirá cada componente del protocolo de modelación

2.1 Definición tipo de modelo

Se definió, teniendo en cuenta el propósito final de la modelación, la necesidad y la aplicación que se busca con ésta, de acuerdo a los tipos de modelos de la Figura 5.

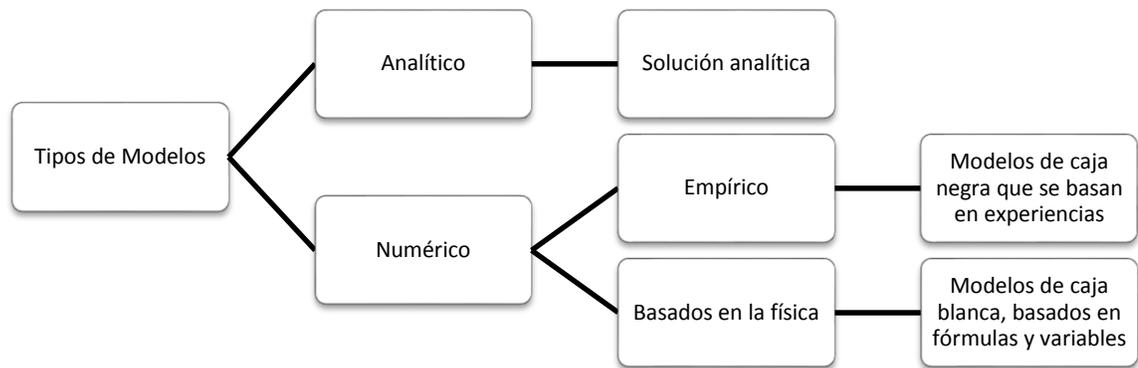


Figura 5. Tipos de modelos

La finalidad de la investigación es conocer el comportamiento hidrodinámico de la ciénaga La Villa con sus interconexiones, para así aportar a la prevención de desastres en épocas de crecientes. Por tanto, el modelo es numérico basado en la física y adicionalmente se tienen en cuenta experiencias para la definición de los diferentes parámetros y condiciones iniciales. Estos a su vez se desarrollan bajo las ecuaciones de aguas someras, Saint Venant.

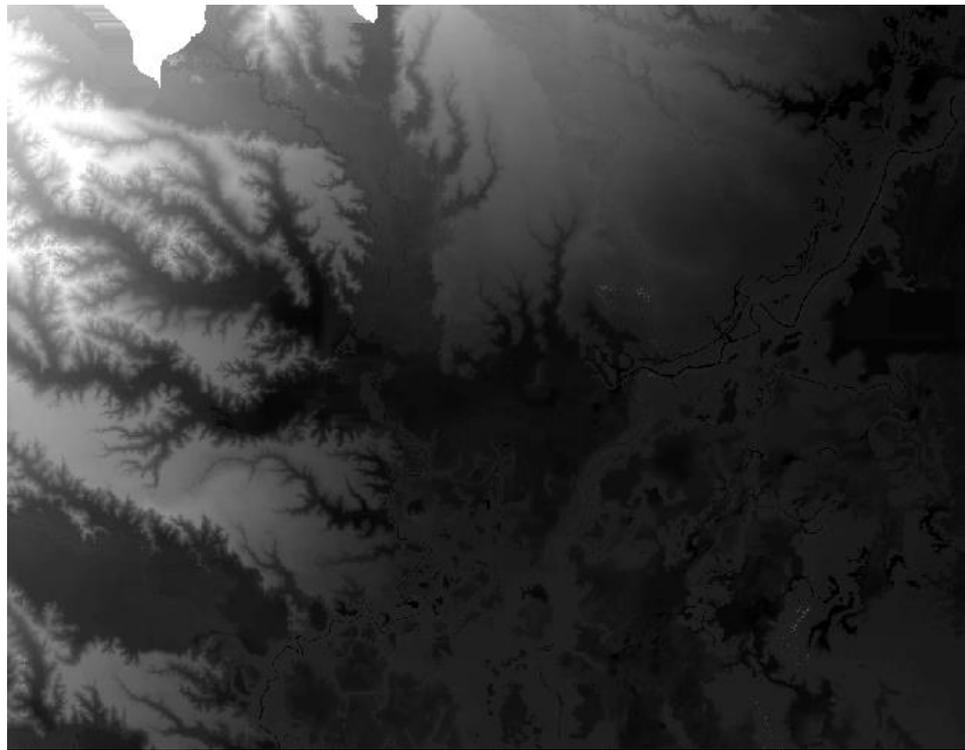
2.2 Definición del modelo conceptual del sistema

El modelo conceptual se establece con los siguientes componentes:

2.2.1 Recolección de Información de Campo

La información de campo utilizada en la investigación fue suministrada por el Fondo Adaptación, esta información se basa en información topográfica, batimétrica y altimétrica, así como información meteorológica de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

A partir de levantamientos topográficos con tecnología tipo LIDAR, levantamientos batimétricos y fotografías aéreas digitales, se obtuvo el modelo de elevación digital (DEM) de la Figura 6 (FONDO ADAPTACIÓN, 2013).



Bajo  Alto

Figura 6. Modelo de elevación digital (DEM) de la ciénaga La Villa y sus interconexiones

En la Figura 7 se muestra la localización de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona de La Mojana y 10 estaciones más, cercanas a la zona de estudio.

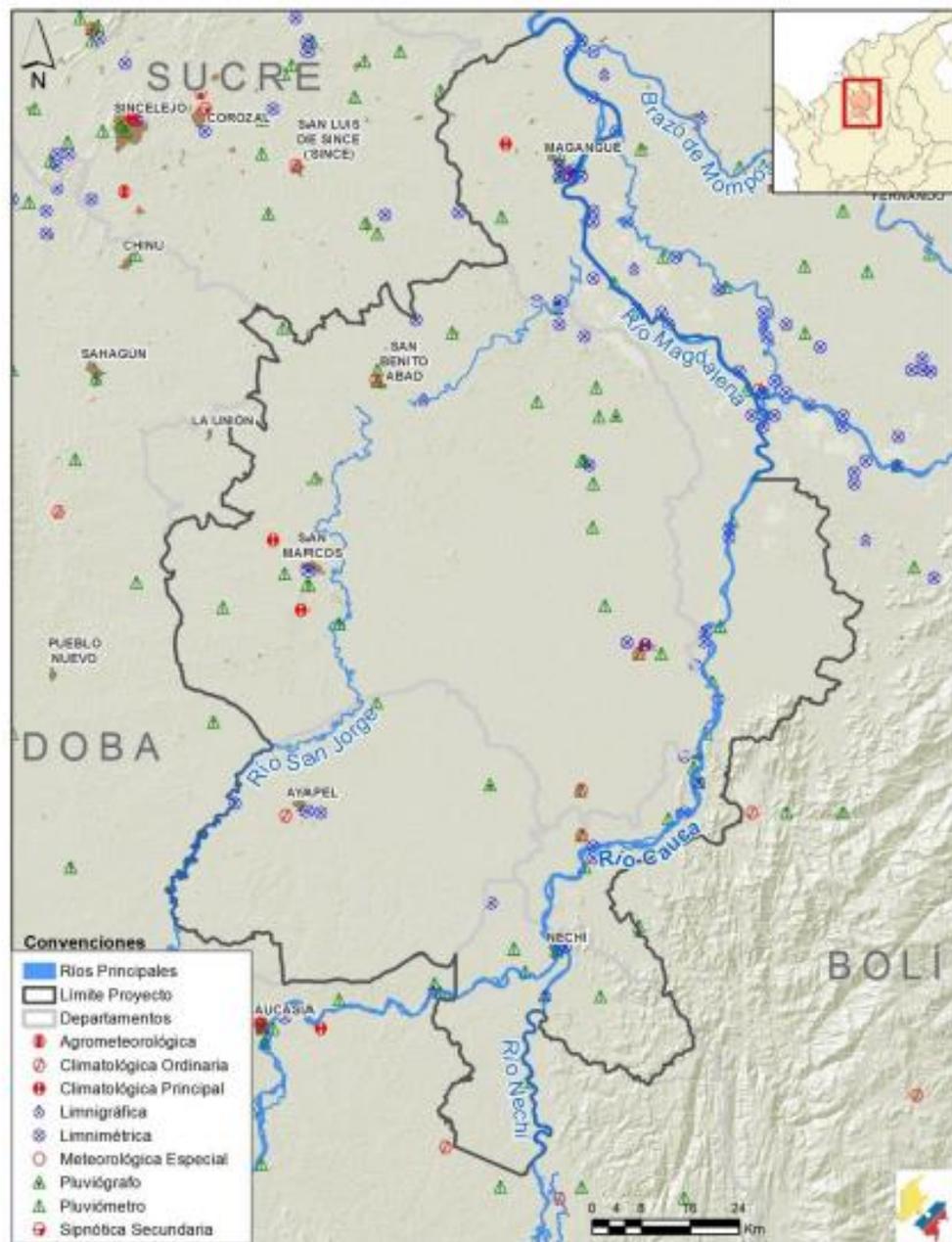


Figura 7. Localización espacial de las estaciones meteorológicas en la ecorregión de La Mojana.
Fuente: (FONDO ADAPTACIÓN, 2013)

2.2.2 Definición del Dominio de Estudio

El dominio de estudio es la ciénaga La Villa y sus interconexiones. La delimitación del dominio se definió con una frontera oriental y una occidental (ver Figura 8) la frontera oriental, se estableció dividiendo la ciénaga La Villa de las ciénagas Los palos y Los Patos, esto a su vez, para dividir la ciénaga La Villa del resto de la ecorregión de La Mojana. El parte aguas de estas dos zonas cuenta con una altura de 17 m.s.n.m. Si no se dividiera el cuerpo cenagoso de La Villa del resto de La Mojana, implicaría analizar toda esta región, debido a que todas las ciénagas se interconectan entre sí. Analizar toda la ecorregión de La Mojana implica un costo computacional exageradamente alto y no se cuenta con los recursos para asumir este costo en la presente investigación. La frontera occidental se estableció en la cota 18 m.s.n.m., teniendo en cuenta que si hay desbordamiento en la cota 17 m.s.n.m. por el costado oriental, no se alcanzaría la cota 18 m.s.n.m. por el costado occidental.

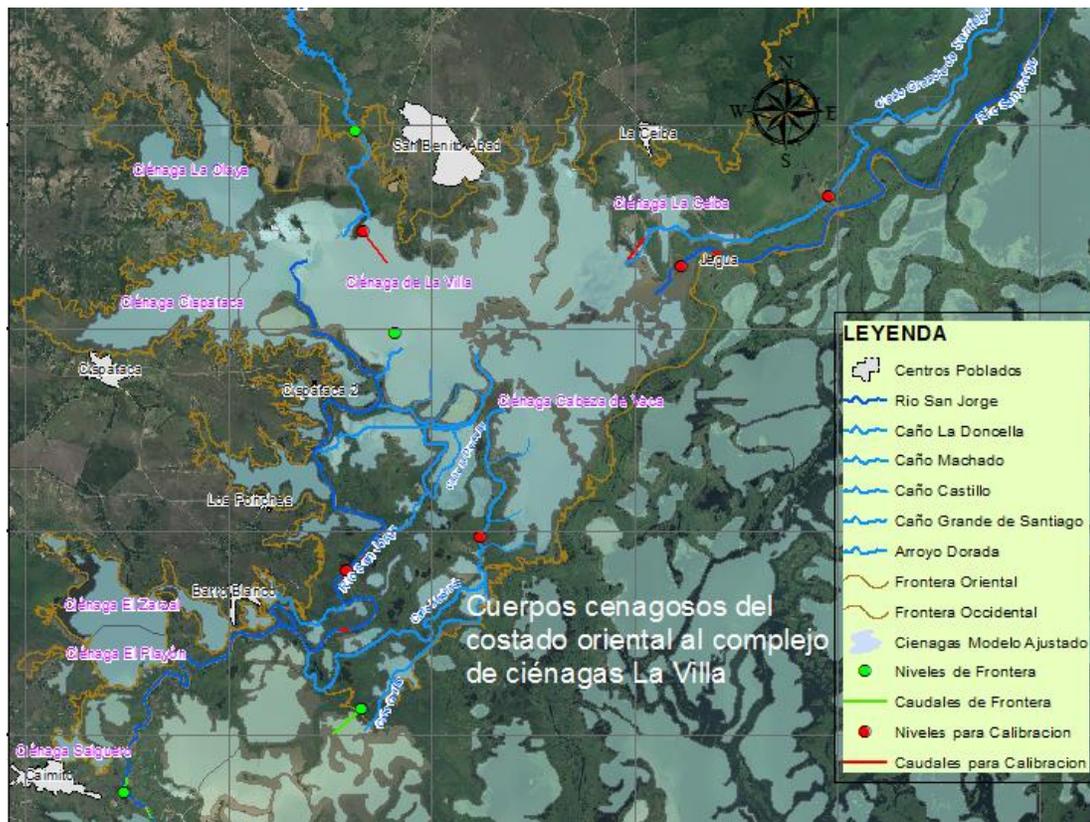


Figura 8. Ciénaga La Villa e interconexiones

2.2.3 *Definición de Unidades de Variabilidad Espacial*

Inicialmente se definió el coeficiente de rugosidad de Manning como parámetro de variabilidad espacial, sin embargo, las modelaciones iniciales se realizaron con coeficientes entre 0.025 y 0.060 uniformes para todo el cuerpo cenagoso, y la diferencia en los resultados fue mínima (ver numeral 3.1.1 Niveles de agua, Anexo 1), por tanto, se decidió no utilizar este parámetro como variable espacial, teniendo en cuenta que no afecta significativamente la hidrodinámica de la ciénaga en estudio.

2.2.4 *Definición de Procesos Relevantes*

El modelo conceptual es la base del modelo numérico, sin embargo, debido a la complejidad de la zona de estudio, en la presente investigación la modelación numérica no abarcó todo el modelo conceptual.

El modelo conceptual que se muestra en la Figura 9, parte de la identificación de la ciénaga La Villa y todas sus interconexiones en la ecorregión de La Mojana, esta ciénaga tiene una característica muy importante, la cual es su interconexión principal, esta interconexión es la entrada y salida del río San Jorge. El río San Jorge entra a la ciénaga por el costado occidental y sale por el costado oriental; cuando la ciénaga se encuentra con niveles de agua mínimos, se puede evidenciar como entra y sale el río, cuando los niveles de agua suben, la entrada del río se pierde en la ciénaga y pareciera que la entrada de éste fuera por el costado sur de la ciénaga.

Una de las complejidades del análisis, es en la entrada del río San Jorge a la ciénaga, debido a que tal como se muestra en la Figura 9, del río San Jorge se desprenden los caños La Doncella y Machado, estos caños solo se identifican en niveles bajos, en niveles altos todo se convierte en una mancha de inundación.

Además del río San Jorge, a la ciénaga entra el caño Castillo, este pasa primero por la ciénaga Cabeza de Vaca, que se encuentra al costado sur de la ciénaga La Villa. Asimismo, el arroyo Dorada ingresa por el costado norte de la ciénaga y el caño Grande de Santiago sale de la ciénaga La Villa paralelo a la salida del río San Jorge.

Las ciénagas, La Olaya, Cispataca y La Ceiba, también hacen parte del modelo, por su conexión inmediata con la ciénaga en estudio. Ver Figura 9.

El modelo conceptual cuenta con la inclusión del río Río San Jorge en la entrada y la salida, es decir no solo la interconexión.

Dentro de los procesos relevantes, también se establecieron las siguientes suposiciones iniciales:

- El movimiento principal de las partículas ocurre en los planos horizontales (solo existen las derivadas de las componentes u y v de la velocidad del flujo en la ecuación de momentum). Principio de las ecuaciones de Saint Venant.
- Cuando hay desbordamiento hacia las ciénagas Los Patos y Los Palos, es decir pasando la frontera definida en el costado oriental (ver Figura 9), se presenta una condición de frontera abierta que implicaría el estudio total de la ecorregión de La Mojana.
- Los aportes de agua por escorrentía y directamente en el espejo de agua por lluvia, no tiene un nivel de significancia importante en el comportamiento hidrodinámico del cuerpo de agua principal, teniendo en cuenta que los eventos de precipitación no son mayores a 6 horas, es decir no es un evento continuo que afecte la hidrodinámica de la ciénaga directamente.
- No se consideraron condiciones de contorno en las ciénagas La Olaya y Cispataca (ver Figura 9), debido a que el agua de escorrentía no tiene un cauce de entrada definido, además de que el área de la cuenca de estas ciénagas es tan solo un 15% del área de la cuenca del río San Jorge (mayor aportante de agua), y se necesitaría realizar un modelo hidrológico para tener una mejor estimación del caudal, lo cual se considera innecesario, ya que esta entrada de caudal es muy pequeña en comparación con el aportante mayor.
- El coeficiente de rugosidad de Manning se utilizó como un parámetro de calibración, teniendo en cuenta que de acuerdo al análisis de las ecuaciones de Momentum, éste es el único parámetro que permite su manipulación para lograr realizar la calibración del modelo.
- El modelo se desarrolló para cinco escenarios en estado estacionario (ver Tabla 1). Adicionalmente, luego de finalizado este trabajo se agregaron tres escenarios más con la intención de rellenar espacios en la información generada entre los escenarios de caudales máximos del año 2009 y 2010.

Dentro del modelo conceptual, también se tuvo en cuenta el análisis multitemporal de manchas de inundación, en el cual se puede ver como se encuentra la ecorregión de La Mojana en época seca y húmeda (ver Figura 10 y la Figura 11).

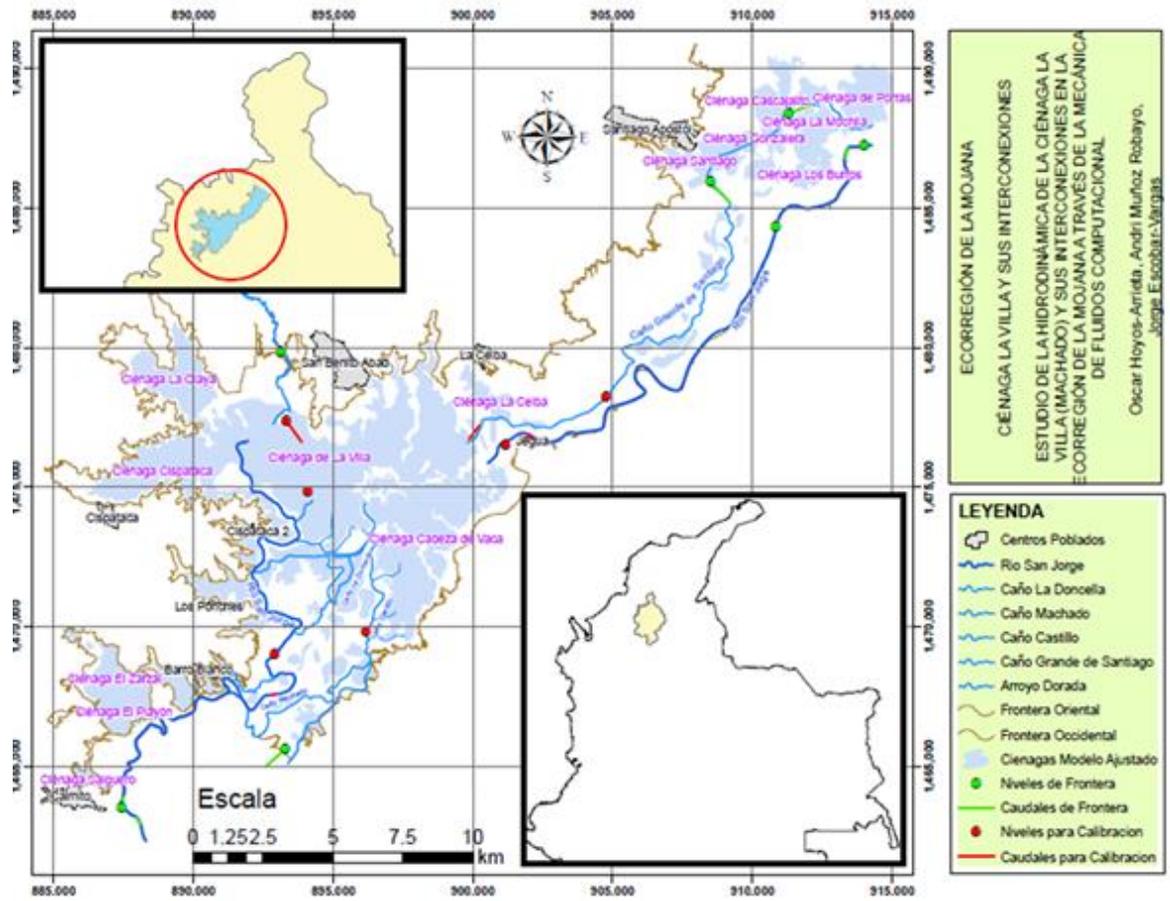


Figura 9. Modelo conceptual de la investigación

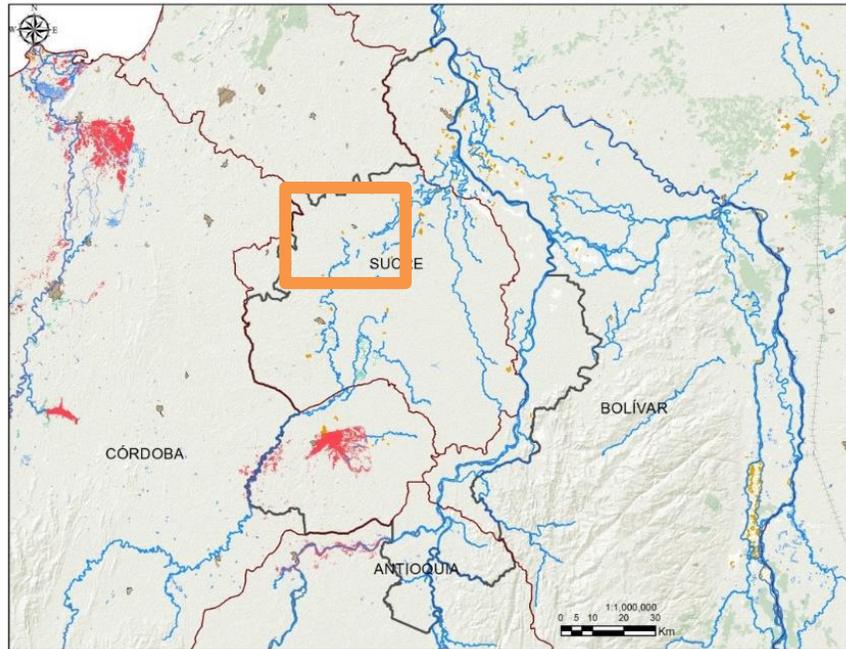


Figura 10. Análisis multitemporal de manchas de inundación. Enero 2012.
Fuente: (FONDO ADAPTACIÓN, 2013)

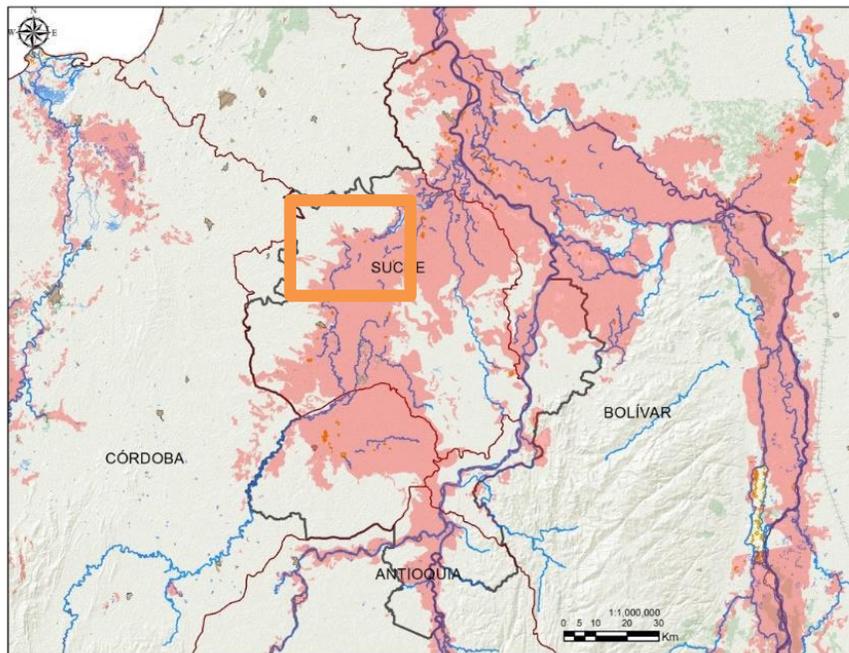


Figura 11. Análisis multitemporal de manchas de inundación. Marzo 2011.
Fuente: (FONDO ADAPTACIÓN, 2013)

Finalmente, a partir del análisis del modelo conceptual, se definió realizar diferentes simulaciones variando el coeficiente de rugosidad de Manning uniformemente entre 0.025 y 0.060, para diferentes condiciones de frontera (ver numeral 2.4.1 Definición de Condición de Fronteras), los escenarios se establecieron así:

Tabla 1. Escenarios de simulación.

RESISTENCIA HIDRÁULICA (Coeficientes de rugosidad de Manning - n)	MATRIZ DE ESCENARIOS - RESISTENCIA HIDRÁULICA				
	ESCENARIOS				
	Escenario 1:	Escenario 2:	Escenario 3:	Escenario 4:	Escenario 5:
	Caudales inicio de 2009	Caudales mínimos 2009	Caudales máximos 2009	Caudales mínimos 2010	Caudales máximos 2010
	Río San Jorge: 195 m ³ /s	Río San Jorge: 100 m ³ /s	Río San Jorge: 380 m ³ /s	Río San Jorge: 60 m ³ /s	Río San Jorge: 620 m ³ /s
	Caño El Castillo: 50 m ³ /s	Caño El Castillo: 13 m ³ /s	Caño El Castillo: 80 m ³ /s	Caño El Castillo: 7 m ³ /s	Caño El Castillo: 165 m ³ /s
	Arroyo Dorada: 20 m ³ /s	Arroyo Dorada: 2 m ³ /s	Arroyo Dorada: 2 m ³ /s	Arroyo Dorada: 1 m ³ /s	Arroyo Dorada: 19 m ³ /s
0.0250	Esc_1_0.0250	Esc_2_0.0250	Esc_3_0.0250	Esc_4_0.0250	Esc_5_0.0250
0.0338	Esc_1_0.0338	Esc_2_0.0338	Esc_3_0.0338	Esc_4_0.0338	Esc_5_0.0338
0.0425	Esc_1_0.0425	Esc_2_0.0425	Esc_3_0.0425	Esc_4_0.0425	Esc_5_0.0425
0.0512	Esc_1_0.0512	Esc_2_0.0512	Esc_3_0.0512	Esc_4_0.0512	Esc_5_0.0512
0.0600	Esc_1_0.0600	Esc_2_0.0600	Esc_3_0.0600	Esc_4_0.0600	Esc_5_0.0600

2.3 Selección del Código Computacional

El código computacional escogido fue Delft 3D, debido a que es un software que realiza modelación numérica en 3D y 2D para flujos, transporte de sedimentos, olas, calidad de agua y evolución morfológica y ecológica en costas, ríos, lagos y estuarios. Resuelve las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones (promedio de profundidades) o tres dimensiones. El sistema resuelve las ecuaciones de movimiento horizontal, de continuidad y transporte y de constituyentes conservativos. Asimismo, el método numérico se basa en las diferencias finitas; para la discretización de las ecuaciones de aguas someras en el espacio y el área es cubierta por una malla curvilínea ortogonal (DELTARES, 2014).

El desarrollador del software es DELTARES, el cual es un instituto independiente holandés para la investigación aplicada en el campo de los recursos hídricos (DELTARES, 2016).

Este software se ha empezado a utilizar en el país para estudios en el río Magdalena por CORMAGDALENA y el CIRMAG, así, como también el Fondo Adaptación en tramos de ríos de la ecorregión de La Mojana.

Por otro lado, se intentaron hacer pruebas en otro software (IBER), pero por la cantidad de información, el software no la soportó. IBER consta de un módulo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces (y en consecuencia posibilita la definición de zonas inundables, la delimitación de vías de intenso desagüe o en general la zonificación del Dominio Público Hidráulico), un módulo de turbulencia y un módulo de transporte sólido por arrastre de fondo y en suspensión para

la cuantificación de procesos de erosión y sedimentación (UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA; UNIVERSIDADE DA CORUÑA, 2016).

2.3.1 Descripción del Código Computacional

El software Delft 3D está compuesto por módulos, los cuales pueden ser ejecutados independientemente o combinados. En la presente investigación solo se utilizó el módulo de hidrodinámica, *Flow*, este es un programa de simulación hidrodinámica multidimensional (2D o 3D) que calcula flujo no permanente y fenómenos de transporte resultantes de mareas y fuerzas meteorológicas rectilíneas o curvilíneas, en una malla definida. Las ecuaciones de aguas someras que el software soluciona son derivadas de las ecuaciones en tres dimensiones de Navier-Stokes para un flujo incompresible en superficie libre (DELTARES, 2014).

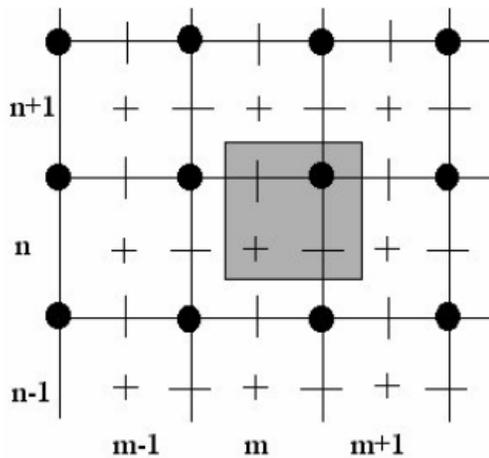
Para utilizar el módulo *Flow* se deben utilizar, el sub módulo RGFGRID, que genera la malla curvilínea y el sub módulo QUICKIN, que es donde se preparan y manipulan los datos de la malla, tales como, batimetrías o condiciones iniciales de niveles de agua, salinidad o concentraciones de componentes. Estos módulos se encuentran dentro del módulo *Grid* y el sub módulo Delft 3D-QUICKPLOT para visualizar y animar la simulación de resultados. (DELTARES, 2014)

Los componentes utilizados de *Flow* para la modelación hidrodinámica son:

2.3.1.1 Domain

Dentro de éste componente se encuentran:

- Grid: introduce la malla que se realiza a partir de un *land boundary*, el cual es un archivo .ldb que define el área de la malla. El programa permite hacer un proceso de generación de malla iterativo, a partir de un esbozo de malla inicial basada en *splines* (líneas de dibujo .spl). Los splines se transforman en la malla, la cual se puede ir refinando hasta el detalle que se requiera. En la malla escalonada que aplica Delft 3D-Flow (ver Figura 12), no todos los parámetros, tales como los niveles de agua, las profundidades, los componentes de la velocidad o la concentración de las sustancias, son definidos en la misma ubicación de la malla numérica (y por lo tanto en el espacio físico) (DELTARES, 2014).



Líneas completas: malla numérica

Área gris: ítems con los mismos índices de la malla (m, n).

+: Nivel de agua, concentración de constituyentes, salinidad, temperatura.

-: Componente horizontal de velocidad en dirección ε (también llamado u y dirección m).

|: Componente horizontal de velocidad en dirección η (también llamado v y dirección n).

●: Profundidad por debajo de la media, nivel de agua (nivel de referencia).

Figura 12. Malla escalonada de Delft 3D-Flow
Fuente: (DELTARES, 2014)

Las fronteras cerradas son definidas a través de los puntos u o v ; las fronteras abiertas a través, tanto de $u - v$ como de los puntos de niveles de agua (ζ -) dependiendo del tipo de la condición de frontera, si es de velocidad o de nivel de agua (DELTARES, 2014).

La malla debe ser ortogonal, es decir las líneas de la malla deben interceptarse perpendicularmente y el espaciado de la malla debe variar suavemente sobre la región computacional, para minimizar los errores de precisión en las operaciones de las diferencias finitas (DELTARES, 2014).

La calidad de la malla se determina a partir de la ortogonalidad y la tasa con que las propiedades cambien en el área de modelación (suavizado). Una medida de la ortogonalidad es el ángulo, o el coseno del ángulo entre las líneas de la malla. En una malla adecuada el $\cos \varphi < 0.02$, donde φ es el ángulo entre las líneas de la malla. Para medir el suavizado se utiliza la relación de aspecto de las celdas de la malla, que debe estar entre 1 y 2 a no ser que el flujo sea predominante a lo largo de una de las líneas de la malla, entonces la relación de la proporción de las celdas vecinas debe ser menor a 1.2 en el área de interés y hasta 1.4 en áreas lejanas (DELTARES, 2014).

- Bathymetry: introduce la batimetría que se obtiene a partir de la interpolación del modelo de elevación digital y la malla definida. El método de interpolación utilizado es el del promedio de celda de malla; este método es adecuado sí el modelo de elevación digital tiene mayor resolución que la malla y se basa en un simple promedio (DELTARES, 2014).

2.3.1.2 Time frame

En este marco se define la relación entre el tiempo real y el de la simulación (DELTARES, 2014). Se define la duración y el intervalo de tiempo de la simulación. Generalmente se puede escoger el intervalo de tiempo basado en la precisión solamente y en la mayoría de los casos la estabilidad no es un problema. La precisión es, entre otros parámetros, tan importante, como las escalas de longitud espacial en la malla numérica, que dependen del número de Courant-Friedrichs-número de Lewy (CFL), definido por:

$$CFL = \frac{\Delta_t \sqrt{gH}}{\{\Delta_x, \Delta_y\}} \quad (4)$$

Donde:

Δ_t es el intervalo de tiempo en segundos, g es la aceleración de la gravedad, H es la profundidad total, y $\{\Delta_x, \Delta_y\}$ es un valor característico (en muchos casos un valor mínimo) del espaciado de la malla en cualquier dirección. Generalmente el número de Courant no debe exceder un valor de 10, pero si hay problemas con variaciones muy pequeñas en el espacio y el tiempo, se puede tener un número de Courant mayor (DELTARES, 2014).

2.3.1.3 Initial Conditions

Esta condición se define para la variable dependiente, nivel de agua, teniendo en cuenta que la simulación sólo involucra la hidrodinámica (DELTARES, 2014).

Se puede definir con un valor uniforme en toda el área de estudio, o con valores variables en el espacio, obtenidos de campo o de una simulación anterior. Se puede seleccionar la condición inicial arbitrariamente. El valor óptimo depende de la combinación de los valores de las condiciones de frontera al inicio de la simulación, los valores de las variables de equilibrio del modelo y en cierta medida de la topografía (DELTARES, 2014).

2.3.1.4 Boundaries

Define las condiciones de contorno abiertas, su localización, tipo y todos los datos de entrada relacionados con la conducción de la simulación. En una frontera abierta se requieren las condiciones de contorno del flujo y el transporte. Estas condiciones representan la influencia del mundo exterior,

es decir el área más allá del área que no está modelada. El flujo puede ser forzado usando niveles de agua, velocidades, gradientes de niveles de agua, caudales (total o por celda de la malla) y el invariante Rieman, el cual es una combinación de niveles de agua y velocidades. La forzante hidrodinámica se puede definir con componentes armónicos, astronómicos o series de tiempo. Para la forzante del nivel de agua en la condición de contorno también se puede especificar en términos de la relación QH (DELTARES, 2014).

Los tipos de forzantes utilizadas son: series de tiempo y relación QH, la cual deriva el nivel de agua a partir de un caudal simulado dejando el dominio a través de la condición de contorno (esta opción solo sirve para una condición de contorno de niveles de agua) (DELTARES, 2014).

2.3.1.5 Physical parameters

Dentro de éste ítem se seleccionan los parámetros relacionados con la condición física del área de la modelación, tales como la aceleración de la gravedad, la densidad del agua, el método de cálculo para tener en cuenta la rugosidad, la consideración de rugosidad en las paredes y la viscosidad horizontal de eddy (DELTARES, 2014).

2.3.1.6 Numerical parameters

Se especifican los parámetros numéricos relacionados de secado e inundación y algunas otras opciones avanzadas para las aproximaciones numéricas. Se deben definir los siguientes parámetros:

- *Drying and floodig check*: determina si se quiere realizar un chequeo adicional de la profundidad del agua en el centro de la celda (puntos de niveles de agua) o solo un chequeo en la superficie de la celda (puntos de velocidad) (DELTARES, 2014).
- *Depth and grid cell faces*: determina la profundidad de la superficie de la celda.
- *Threshold depth*: determina la profundidad límite para que se considere que una celda está húmeda (DELTARES, 2014).
- *Marginal depth*: determina la profundidad mínima del agua (DELTARES, 2014).
- *Smoothing time*: determina el intervalo de tiempo utilizado en el inicio de la simulación para una transición sin problemas entre las condiciones iniciales y de contorno (DELTARES, 2014).
- *Relaxation factor QH-forcing*: en algunos casos cuando el caudal fluctúa rápidamente, es necesario regularlo para estabilizar esta relación. Este parámetro se encuentra entre el rango de 0 y 1 para especificar la cantidad de regulación que necesite; si no requiere regulación el parámetro es 0 (DELTARES, 2014).

2.3.1.7 Monitoring

Los resultados computacionales pueden ser monitoreados en función del tiempo con puntos de observación, anclas flotantes o secciones transversales. Los puntos de monitoreo se caracterizan por un nombre y su localización en la malla (DELTARES, 2014).

2.3.1.8 Output

Especifica los resultados de los cálculos, para almacenarlos y luego analizarlos. Dentro de los archivos de salida, se encuentran los mapas que son instantáneos de las cantidades calculadas en toda el área, por tanto, se pueden visualizar los resultados en cualquier punto de la malla (DELTARES, 2014).

En la ventana *Storage* se define el inicio y el final de la simulación, y el intervalo del tiempo de muestra de los resultados. El inicio y final de la simulación no se pueden cambiar de lo definido en el *Time Frame* ni en las condiciones de contorno (DELTARES, 2014).

2.3.2 Ecuaciones de Gobierno del Código Computacional

2.3.2.1 Ecuaciones hidrodinámicas

Delft 3D resuelve las ecuaciones de Navier Stokes en un flujo incompresible para agua someras, bajo la hipótesis de Boussinesq. En la ecuación de momentum, la aceleración en la vertical no se tiene en cuenta, lo que conduce a la ecuación de la presión hidrostática. En los modelos 3D las velocidades en la vertical se calculan mediante la ecuación de continuidad. El sistema de ecuaciones diferenciales parciales en combinación con el sistema de condiciones iniciales y de contorno se resuelve en una malla de diferencias finitas (DELTARES, 2014).

Delft 3D en la dirección horizontal usa coordenadas curvilíneas ortogonales. Dos sistemas de coordenadas son soportados:

- Coordenadas cartesianas (ε, η)
- Coordenadas esféricas (λ, φ)

Las coordenadas esféricas son un caso especial de coordenadas curvilíneas ortogonales con:

$$\begin{aligned}\varepsilon &= \lambda, \\ \eta &= \varphi, \\ \sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}} &= R \cos \varphi, \\ \sqrt{G_{\eta\eta}} &= R\end{aligned}\tag{5}$$

Donde λ es la longitud, φ es la latitud, R es el radio de la tierra (6378.137 km, WGS84), y $\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}$ y $\sqrt{G_{\eta\eta}}$ son coeficientes para transformar coordenadas curvilíneas a rectangulares.

En Delft 3D las ecuaciones son formuladas en coordenadas curvilíneas ortogonales. La escala de la velocidad está en el espacio físico, pero los componentes están perpendiculares a las superficies de las celdas de la malla curvilínea. La transformación de la malla introduce términos de curvatura en las ecuaciones de momentum (DELTARES, 2014).

- Sistema de coordenadas σ :

En el sistema de coordenadas σ se asume que la profundidad es mucho menor que la longitud horizontal. Esta suposición es válida para aguas someras, lo que significa que la vertical en la ecuación de momentum se reduce a la relación de la presión hidrostática. Por lo tanto, se asume que las aceleraciones verticales son muy pequeñas comparadas con la aceleración de la gravedad y por esto no se tienen en cuenta (DELTARES, 2014).

La malla vertical consta de capas de fronteras en dos planos σ , los cuales no son estrictamente horizontales, pero siguen la topografía de fondo y de la superficie libre. La malla σ tiene en cuenta la frontera de fondo y el movimiento de la superficie libre, la cual, obtiene una representación suave de la topografía (DELTARES, 2014).

El número de capas sobre toda el área horizontal de cálculo es constante, independientemente de la profundidad de agua local (ver Figura 14). La distribución del espesor relativo de la capa usualmente no es uniforme. Esto permite una mayor resolución en las zonas de interés, tales como las áreas cerca de la superficie o al fondo. (DELTARES, 2014).

El sistema de coordenadas σ es definido así:

$$\sigma = \frac{z - \zeta}{d + \zeta} = \frac{z - \zeta}{H} \quad (6)$$

Donde z es la coordenada vertical en el espacio físico, ζ es la elevación de la superficie libre sobre el plano de referencia (como $z = 0$), d es la profundidad bajo el de referencia y H es la profundidad de agua total, obtenida por $d + \zeta$ (DELTARES, 2014).

En el fondo $\sigma = -1$ y en la superficie $\sigma = 0$ (ver Figura 13). Las derivadas parciales del sistema de coordenadas cartesiano original son expresadas en coordenadas σ por la regla de la cadena introduciendo términos adicionales. El dominio de flujo en el modelo 3D de aguas someras, está en el plano horizontal de una zona restringida, compuesta de fronteras abiertas y cerradas y en la vertical de varias capas. En un sistema de coordenadas de varias capas se tiene la misma localización en todo el plano horizontal, es decir las interfaces de las capas son escogidas en los planos de la constante σ (ver Figura 14). Para cada capa se resuelve un sistema de ecuaciones de conservación acoplado (DELTARES, 2014).

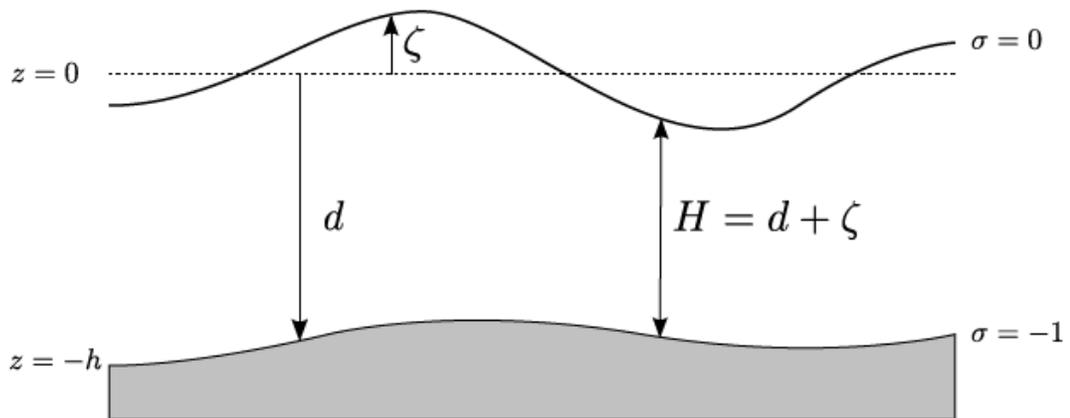


Figura 13. Definición del nivel de agua (ζ), profundidad (d) y profundidad total H
Fuente: (DELTARES, 2014)

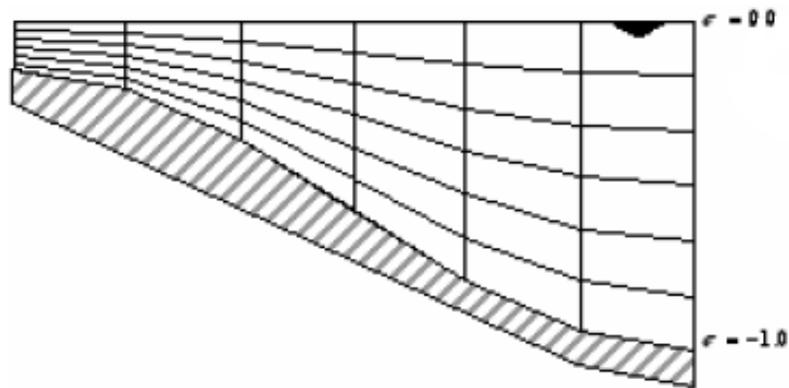


Figura 14. Ejemplo de Malla σ
Fuente: Adaptado de (DELTARES, 2014)

- Ecuación de continuidad

La profundidad promedio en la ecuación de continuidad se deriva por la integración de la ecuación de la continuidad para fluidos incompresibles ($\Delta \cdot \vec{u} = 0$) sobre la profundidad total. Se tienen en cuenta condiciones de fronteras cinemáticas en la superficie del agua y el nivel del fondo, y se obtienen así (DELTARES, 2014):

$$\begin{aligned} \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{1}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)U\sqrt{G_{\eta\eta}} \right)}{\partial \varepsilon} \\ + \frac{1}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \left((d + \zeta)V\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}} \right)}{\partial \eta} = (d + \zeta)Q \end{aligned} \quad (7)$$

Donde U y V son las velocidades promedio respecto a las profundidades en una malla curvilínea ortogonal.

$$U = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta u \, dz = \int_{-1}^0 u \, d\sigma \quad (8)$$

$$V = \frac{1}{d + \zeta} \int_d^\zeta v \, dz = \int_{-1}^0 v \, d\sigma \quad (9)$$

y Q representa las contribuciones por unidad de área debido al caudal o a la captación de agua, precipitación y evaporación.

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out})d\sigma + P - E \quad (10)$$

Donde q_{in} y q_{out} son los caudales de entrada y salida por unidad de volumen [1/s], respectivamente, P es la precipitación y E es la evaporación.

- Ecuaciones de momentum en la dirección horizontal

Las ecuaciones de momentum en la dirección ε y η se obtienen así:

$$Q = \int_{-1}^0 (q_{in} - q_{out})d\sigma + P - E \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}} \frac{\partial U}{\partial \varepsilon} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial U}{\partial \eta} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \varepsilon} - \frac{V^2}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \varepsilon} \\ - fU = - \frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}} P_\varepsilon - \frac{gU\sqrt{U^2V^2}}{C_{2D}^2(d + \zeta)} + F_\varepsilon + F_{S\varepsilon} + M_\varepsilon \end{aligned} \quad (12)$$

y

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{U}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}} \frac{\partial V}{\partial \varepsilon} + \frac{V}{\sqrt{G_{\eta\eta}}} \frac{\partial V}{\partial \eta} + \frac{UV}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\eta\eta}}}{\partial \varepsilon} - \frac{U^2}{\sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}\sqrt{G_{\eta\eta}}}} \frac{\partial \sqrt{G_{\varepsilon\varepsilon}}}{\partial \eta} \\ + fV = -\frac{1}{\rho_0 \sqrt{G_{\eta\eta}}} P_\eta - \frac{gV \sqrt{U^2 V^2}}{C_{2D}^2 (d + \zeta)} + F_\eta + F_{s\eta} + M_\eta \end{aligned} \quad (13)$$

Las variaciones de densidad se descuidan, excepto en los términos de presión baroclínica, P_ε y P_η representan los gradientes de presión. Las fuerzas F_ε y F_η en la ecuación de momentum representan el desequilibrio de los esfuerzos de Reynolds en la horizontal. M_ε y M_η representan las entradas y salidas de momentum, f es el parámetro de Coriolis (frecuencia inercial) y C_{2D} es el coeficiente de Chézy que se determina a partir de la siguiente formulación de Manning

$$C_{2D} = \frac{\sqrt[6]{H}}{n} \quad (14)$$

Donde H es la profundidad total del agua y n es el coeficiente de rugosidad de Manning (DELTAIRES, 2014).

2.4 Diseño del Modelo

Dentro del diseño del modelo se encuentra la descripción de la definición de las condiciones de frontera, las condiciones iniciales y la geometría de diseño.

2.4.1 Definición de Condición de Fronteras

Para la definición de las condiciones de frontera se revisó la información hidroclimatológica de las estaciones cercanas a la zona de estudio, sin embargo, no se encontró ninguna estación dentro ni cerca a la ciénaga La Villa, ni en sus interconexiones, en la información entregada por el Fondo Adaptación y debido a que esta información fue suministrada por el IDEAM, no se tuvo más fuentes de información hidroclimatológica observada. En el proceso de búsqueda de información, se encontró que el Fondo Adaptación realizó un modelo hidrodinámico en 1D para toda La Mojana con el código computacional Sobek para los años 2009 y 2010 (fenómeno niña), y que a su vez éste modelo se calibró con información medida de diferentes estaciones en esta ecorregión. Teniendo en cuenta que este modelo se calibró con información real, se decidió utilizar los datos de niveles y caudales de las estaciones virtuales del modelo Sobek 1D más cercanas a las fronteras establecidas. A partir de esto,

se realizaron escenarios iniciales de simulación en estado permanente o estacionario para caudales iniciales en 2009, mínimos y máximos en 2009 y 2010 (ver Tabla 2).

Tabla 2. Condiciones de frontera para los escenarios de simulación iniciales.

ESCENARIOS INICIALES

Escenario 1:	Escenario 2:	Escenario 3:	Escenario 4:	Escenario 5:
Caudales inicio de 2009	Caudales mínimos 2009	Caudales máximos 2009	Caudales mínimos 2010	Caudales máximos 2010
Río San Jorge: 195 m ³ /s	Río San Jorge: 100 m ³ /s	Río San Jorge: 380 m ³ /s	Río San Jorge: 60 m ³ /s	Río San Jorge: 620 m ³ /s
Caño El Castillo: 50 m ³ /s	Caño El Castillo: 13 m ³ /s	Caño El Castillo: 80 m ³ /s	Caño El Castillo: 7 m ³ /s	Caño El Castillo: 165 m ³ /s
Arroyo Dorada: 20 m ³ /s	Arroyo Dorada: 2 m ³ /s	Arroyo Dorada: 2 m ³ /s	Arroyo Dorada: 1 m ³ /s	Arroyo Dorada: 19 m ³ /s

Las condiciones de frontera se dividen en condiciones de entrada y de salida.

2.4.1.1 Condiciones de Frontera de Entrada

- Caudales en el río San Jorge

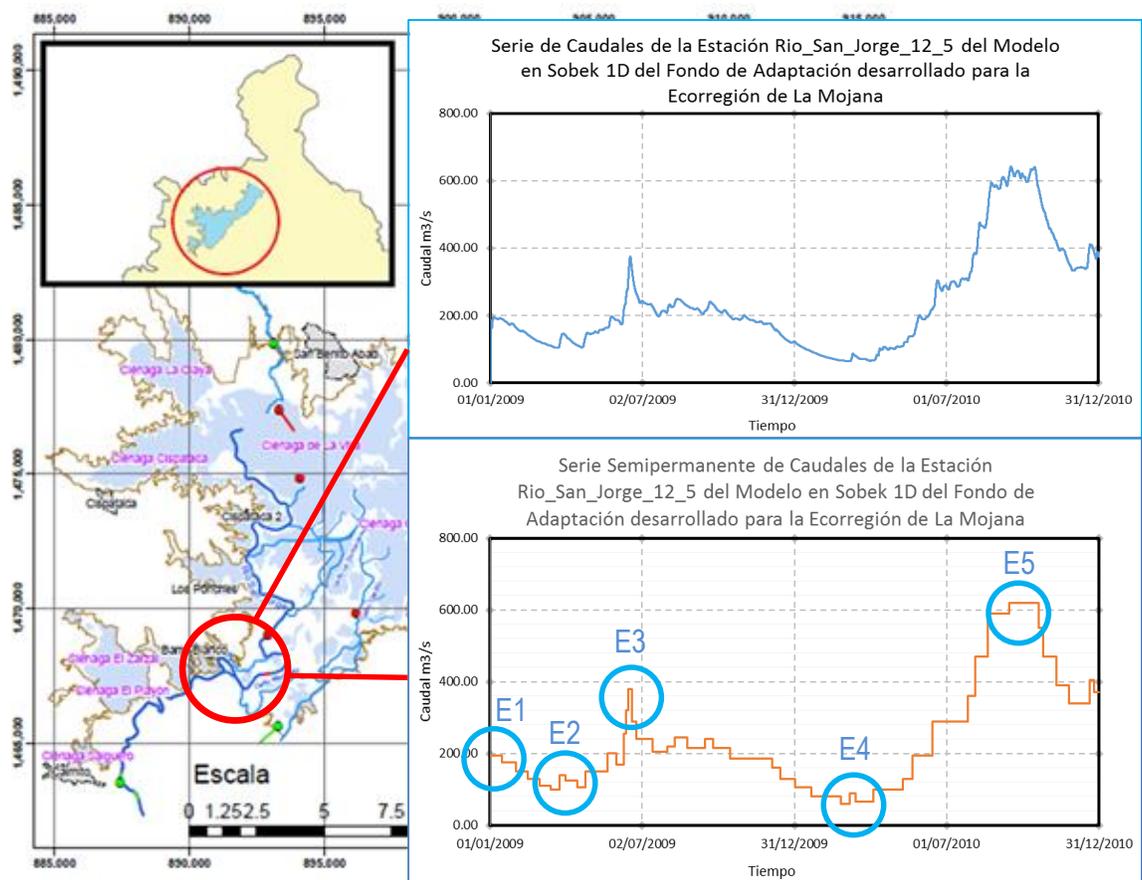


Figura 15. Caudales de entrada en el río San Jorge.

- Caudales en el caño Castillo

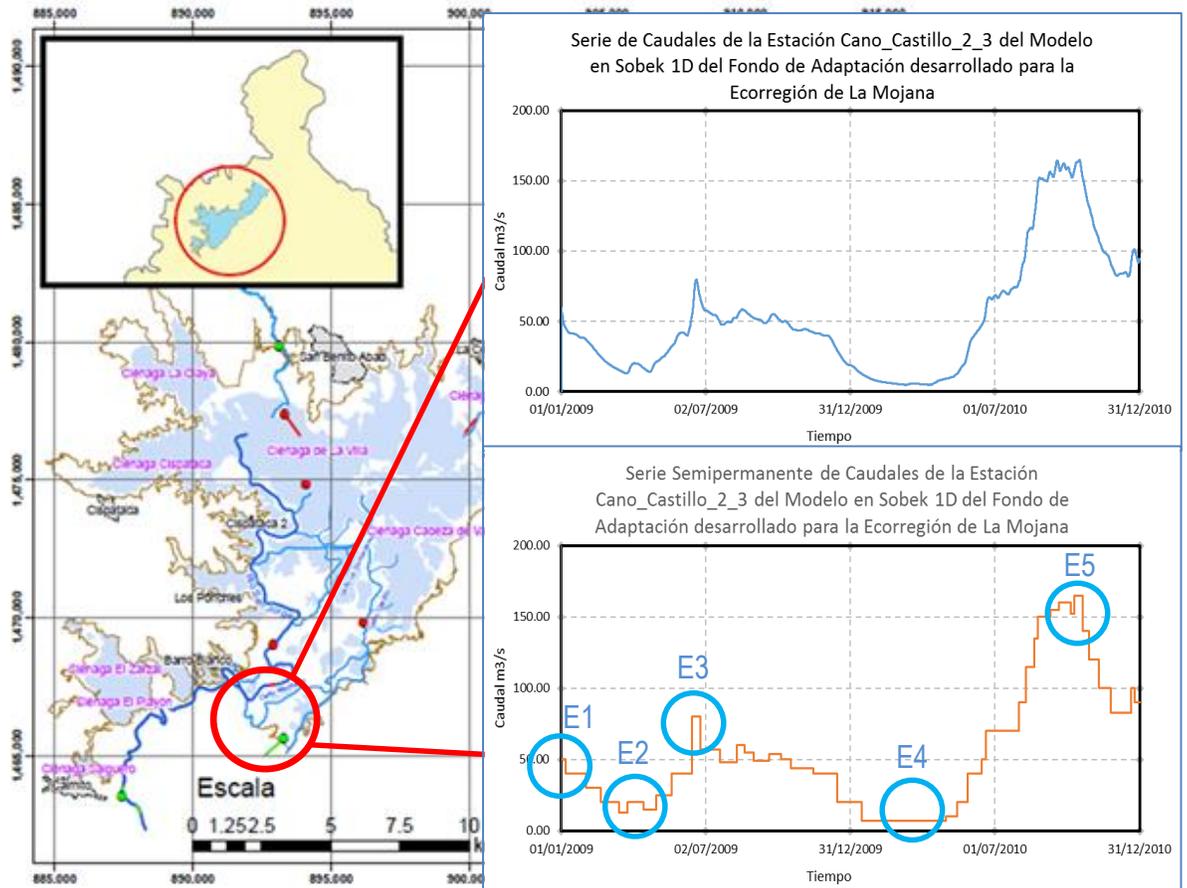


Figura 16. Caudales de entrada en el caño Castillo.

- Caudales en el arroyo Dorada

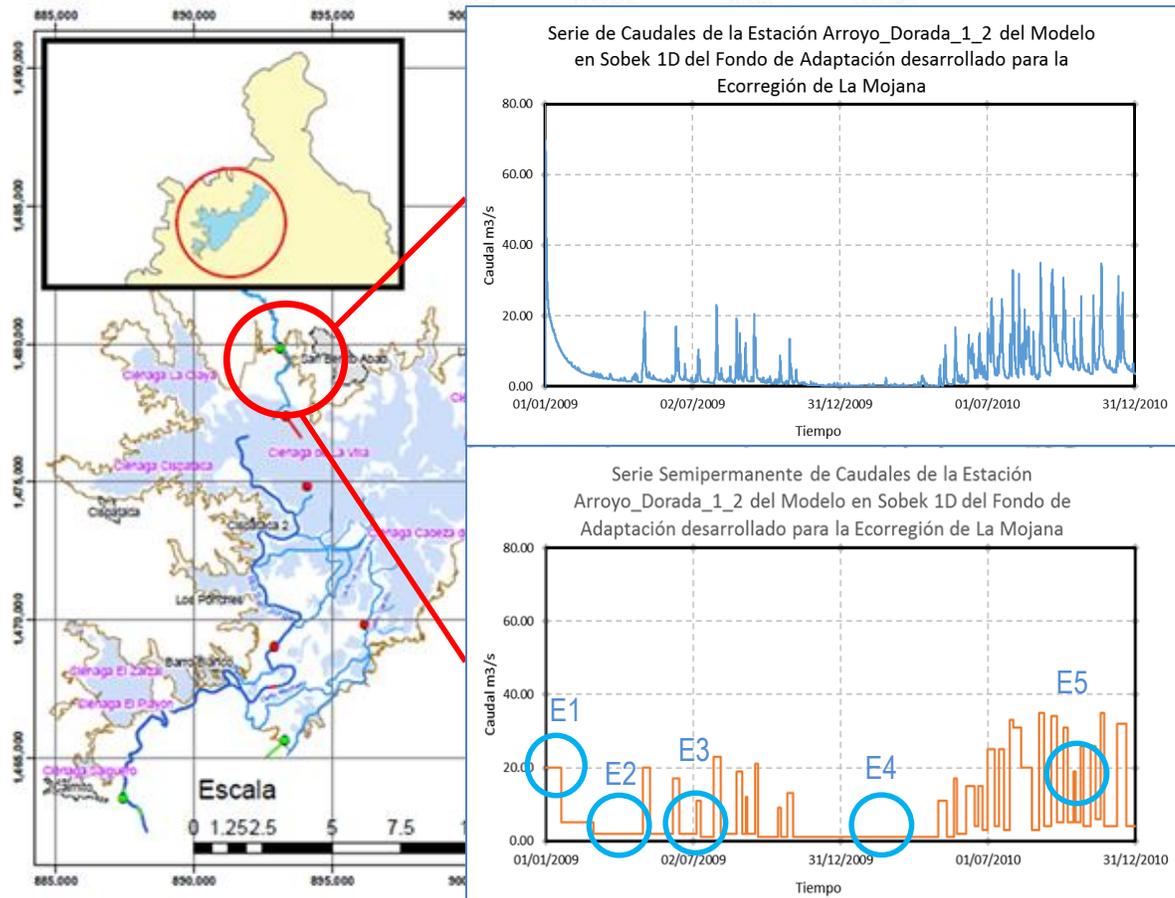


Figura 17. Caudales de entrada en el arroyo Dorada.

2.4.1.1 Condiciones de Frontera de Salida

La condición de frontera de salida se estableció con una relación QH en el río San Jorge y en el caño Grande de Santiago. La relación QH en el río San Jorge se definió con caudales y niveles del río San Jorge y en el caño Grande de Santiago con caudales del caño Grande de Santiago y niveles del río San Jorge (ver Figura 18, Figura 19 y Figura 20).

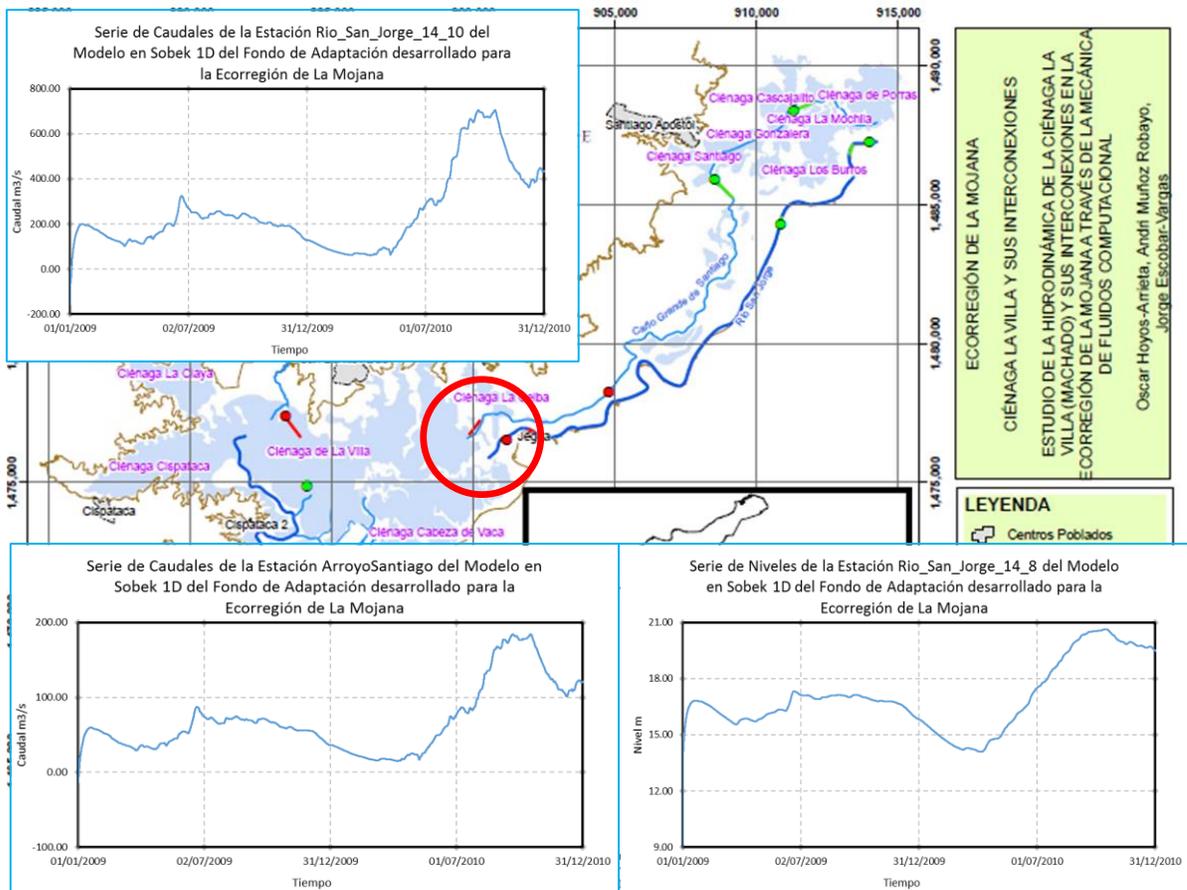


Figura 18. Caudales y niveles de salida en el río San Jorge y el caño grande de Santiago.

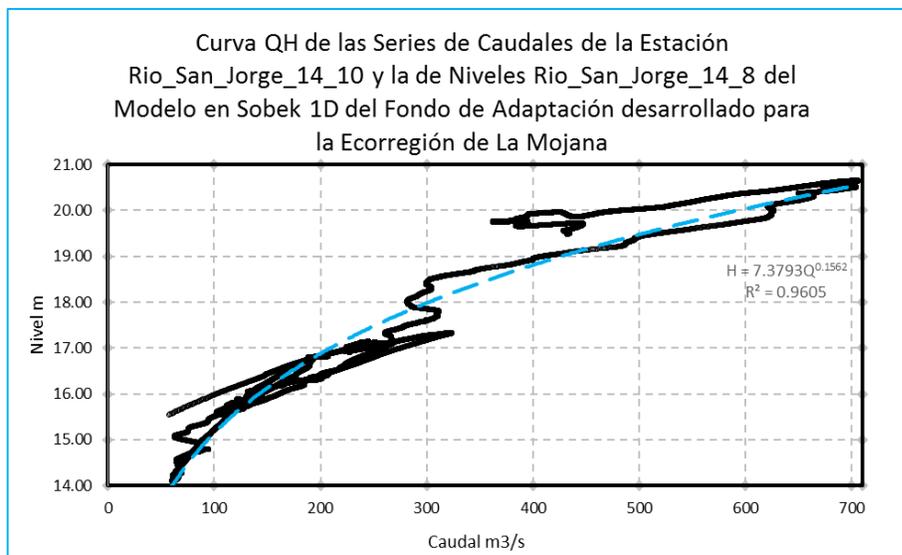


Figura 19. Curva relación QH en la salida del río San Jorge

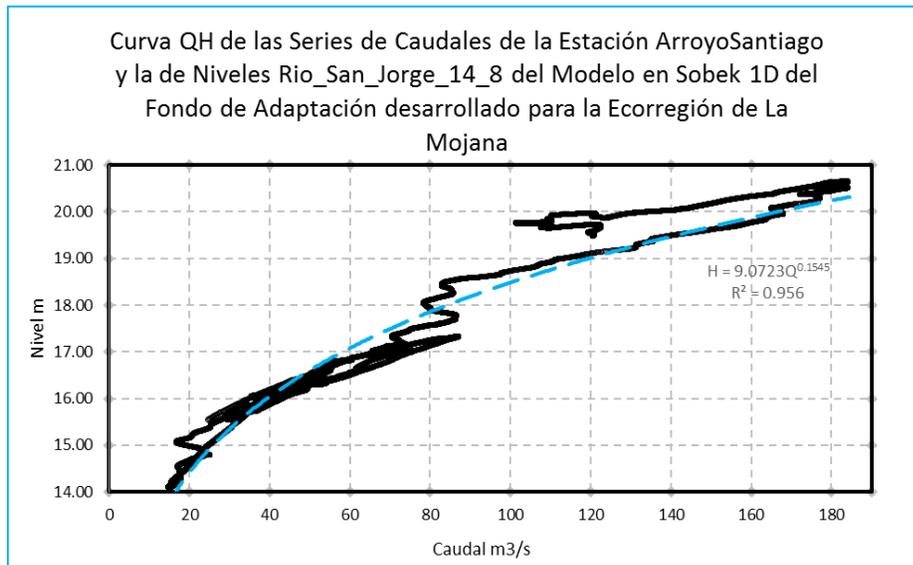


Figura 20. Curva relación QH en la salida del caño Grande de Santiago.

Adicionalmente, se agregaron tres escenarios más, dos para rellenar espacios entre los escenarios de caudales máximos del año 2009 (escenario 3) y del año 2010 (escenario 5), con el fin de revisar el comportamiento para diferentes valores intermedios de los caudales máximos y otro para extrapolar condiciones de caudales mayores al máximo (ver Tabla 3).

Tabla 3. Condiciones de frontera para los escenarios de simulación adicionales.

ESCENARIOS ADICIONALES

Escenario 6: Caudales intermedios 2010_1	Escenario 7: Caudales intermedios 2010_2	Escenario 8: Caudales intermedios 2010_ extrapolados
Río San Jorge: 460 m ³ /s	Río San Jorge: 555 m ³ /s	Río San Jorge: 710 m ³ /s
Caño El Castillo: 115 m ³ /s	Caño El Castillo: 130 m ³ /s	Caño El Castillo: 165 m ³ /s
Arroyo Dorada: 20 m ³ /s	Arroyo Dorada: 20 m ³ /s	Arroyo Dorada: 19 m ³ /s

2.4.2 Definición de Condiciones Iniciales

En el proceso de definición de la condición inicial, se encontró que el código computacional no acepta un nivel de condición inicial menor al nivel de fondo de las fronteras de entrada. En este caso el nivel de fondo de la condición de entrada principal (entrada del río San Jorge) se encuentra aproximadamente en una cota de 16 m.s.n.m. De acuerdo a lo anterior, si se dejara este nivel de fondo, la condición inicial debería ser superior a 16 m.s.n.m., sin embargo, se hicieron pruebas con

diferentes niveles de agua como condición inicial (desde 13.0 m a 17 m) uniformes en toda la zona de estudio y se encontró que con un nivel muy alto no se puede apreciar el llenado de la ciénaga y conocer cómo es el proceso de la inundación del cuerpo cenagoso en estudio. Por tanto, se tuvo que hacer un ajuste manual a los niveles de las condiciones de frontera de entrada, bajando el nivel de fondo a 13 m.s.n.m., para poder establecer una condición inicial de 13.5 m.s.n.m. y así lograr que el software no generara problemas y pudiera realizar la simulación. Asimismo, evidenciar como se suben los niveles en la zona y cuál es el proceso de inundación, teniendo en cuenta que con éste nivel inicial (13.5 m.s.n.m.) tan solo se encuentra agua en las zonas más profundas del cuerpo cenagoso, así como se puede ver en la Figura 21.

Cabe aclarar que el ajuste manual que se realizó no afectó el comportamiento general de la hidrodinámica del cuerpo cenagoso.

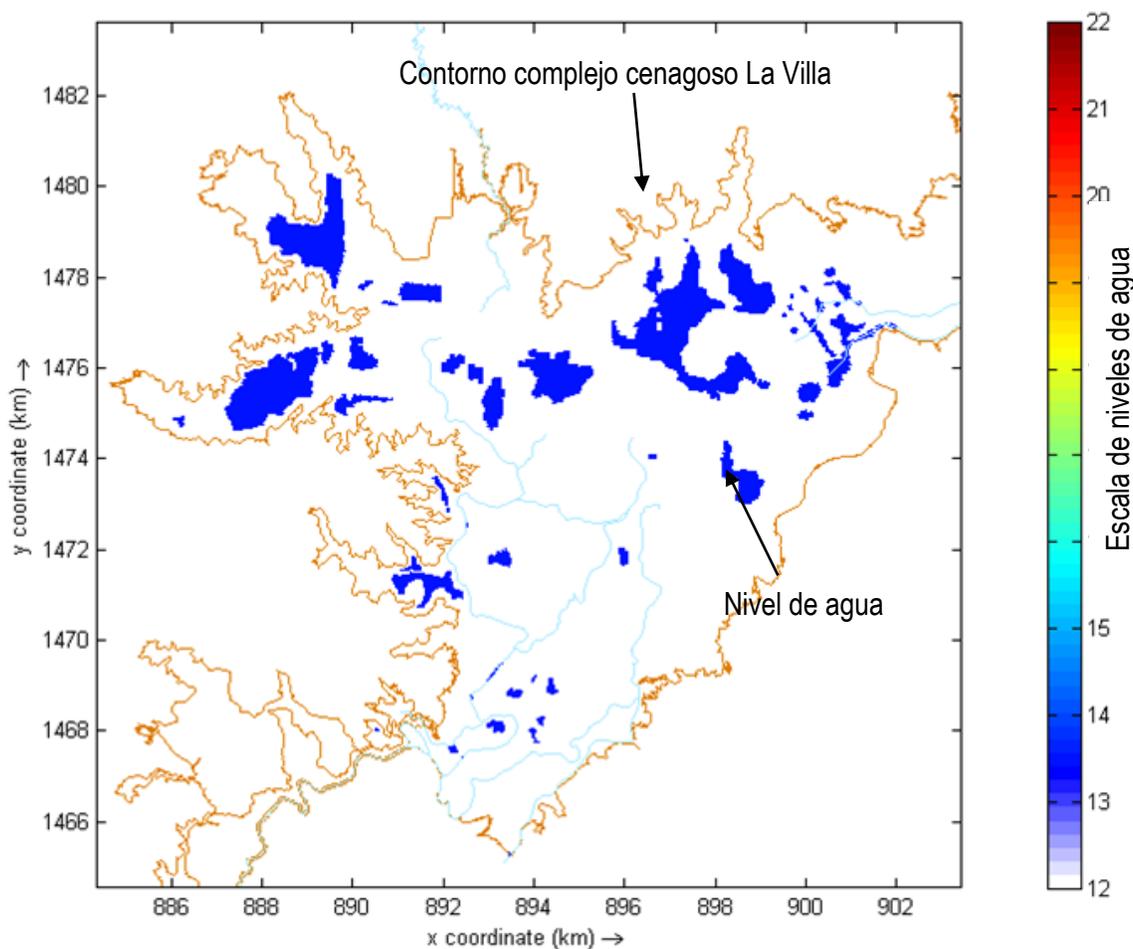


Figura 21. Nivel de agua de la condición inicial de las simulaciones.

2.4.3 Definición de la Geometría de Entrada del Modelo

La definición de la geometría de entrada del modelo, se basa en el dominio de estudio. La geometría es la malla que se va a utilizar para la simulación, esta geometría se realizó con base en las ortofotos (ver Figura 22), redes de drenaje, modelo de elevación digital y la ubicación puntual de cada espejo de agua de la zona de estudio (ver Figura 6) que el Fondo Adaptación proporcionó para la presente investigación. A partir de la información obtenida, se procedió a realizar el archivo *land boundary* ver (Figura 23) en el código computacional, definiendo la geometría de entrada.



Figura 22. Ortofotos del cuerpo cenagoso La Villa.

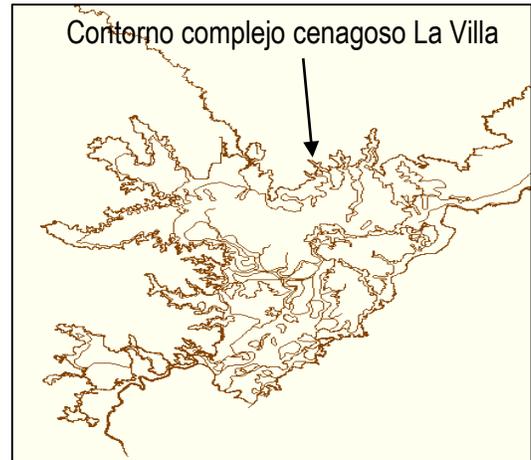


Figura 23. Geometría de entrada del modelo Delft 3D.

2.4.3.1 Test de Malla

Con la geometría de entrada se procedió a realizar un test de malla y así encontrar la malla adecuada para las simulaciones. Una malla adecuada en el presente estudio, es una malla que cumpla con los criterios de ortogonalidad y suavizado, asimismo que con la resolución establecida se obtengan resultados coherentes y el costo computacional pueda ser asumido con los recursos disponibles.

- Malla irregular

Inicialmente se desarrolló una malla irregular para delimitar por partes las ciénagas y los ríos. Con esto se buscaba tener una malla con características diferentes de acuerdo a lo que se necesitaba simular aprovechando las características morfológicas de cada cuerpo de agua y así maximizar los recursos computacionales disponibles (ver Figura 24). Sin embargo, éste tipo de malla no la pudo resolver el código, debido a que éste resuelve diferencias finitas, es decir que no puede resolver mallas que no sean rectangulares, así como, sí se podría realizar con volúmenes finitos. Teniendo en cuenta lo anterior, se procedió a realizar mallas regulares.

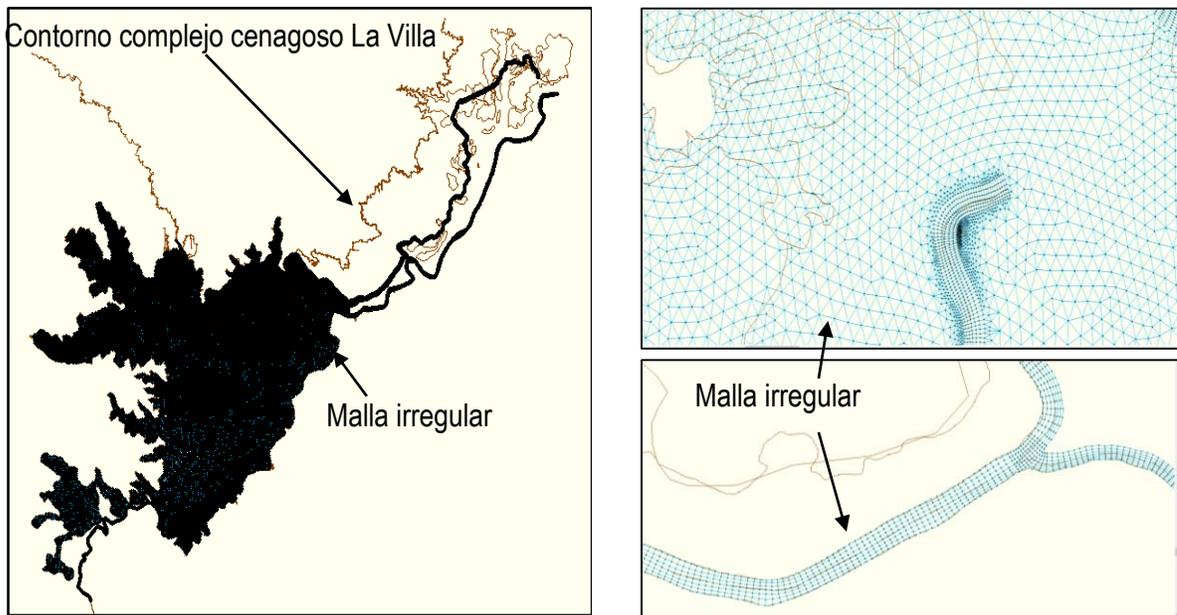


Figura 24. Malla irregular

Mallas regulares

La malla regular se realizó igual para toda el área de simulación, con celdas de cuatro lados. Ésta se hizo inicialmente para el dominio conceptual definido anteriormente (ver Figura 25), sin embargo, esta malla tiene 294.012 celdas, lo cual hace que el costo computacional sea muy alto.

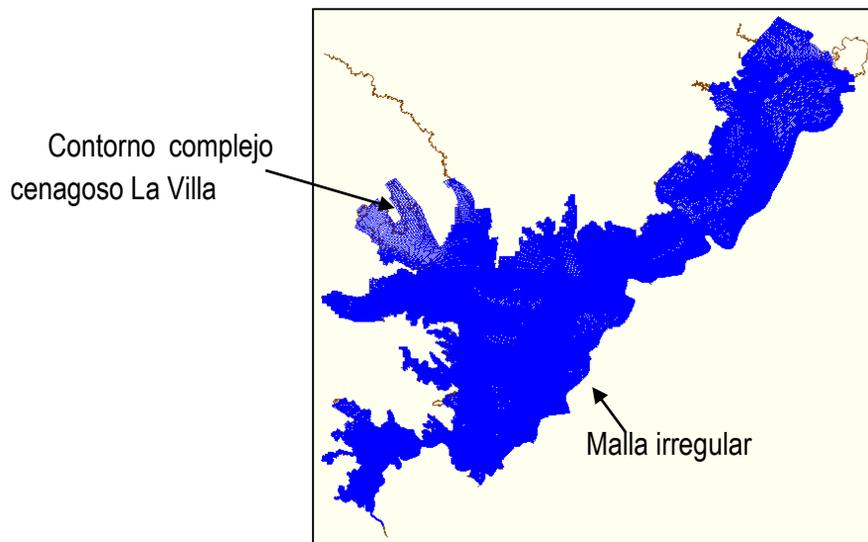


Figura 25. Malla regular con dominio computacional igual a dominio conceptual.

Se continuó con el test de malla, en mallas regulares con el dominio computacional ajustado, es decir se limitó el río San Jorge a sólo las interconexiones de entrada y salida y no se modeló el río como tal. Se variaron las dimensiones de las celdas, hasta encontrar el refinamiento adecuado. Se realizaron pruebas con mallas de distancia de celdas entre 100 m y 300 m (5.953 celdas) (ver Figura 26), entre 50 m y 100 m (27.711 celdas) (ver Figura 27), entre 30 m y 50 m (74.205 celdas) (ver Figura 28) y con celdas menores a 30 m (296.820 celdas) (ver Figura 29).

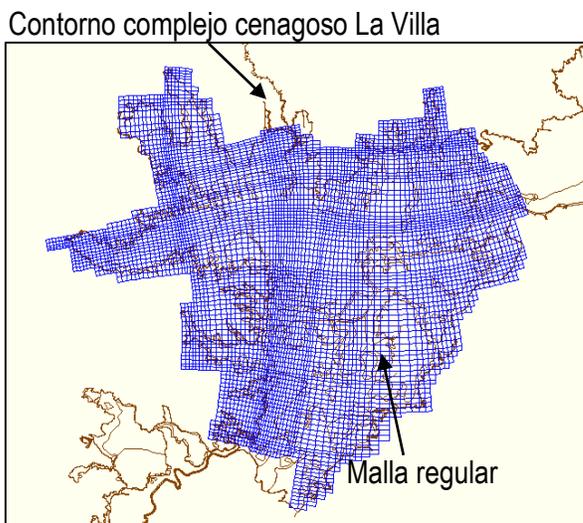


Figura 26. Malla regular con dominio computacional ajustado, 5.953 celdas.

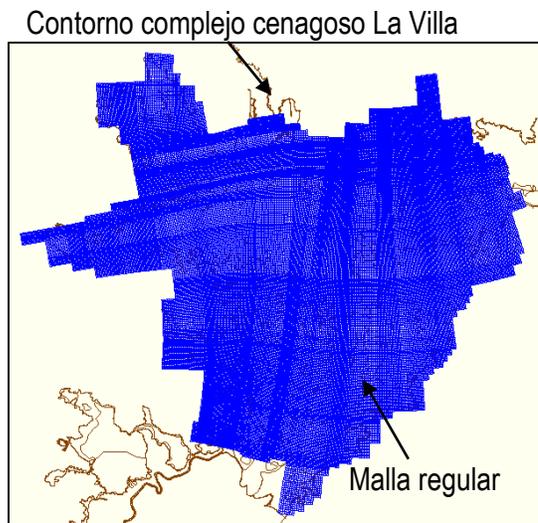


Figura 28. Malla regular con dominio computacional ajustado, 27.711 celdas.

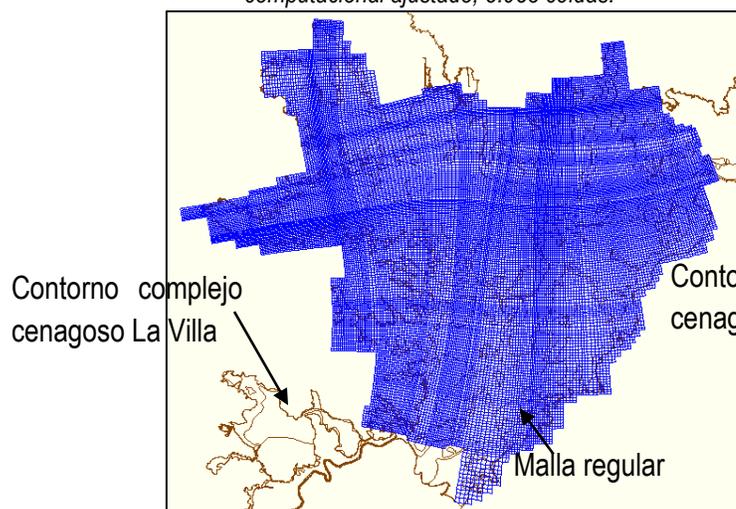


Figura 27. Malla regular con dominio computacional ajustado, 74.205 celdas.

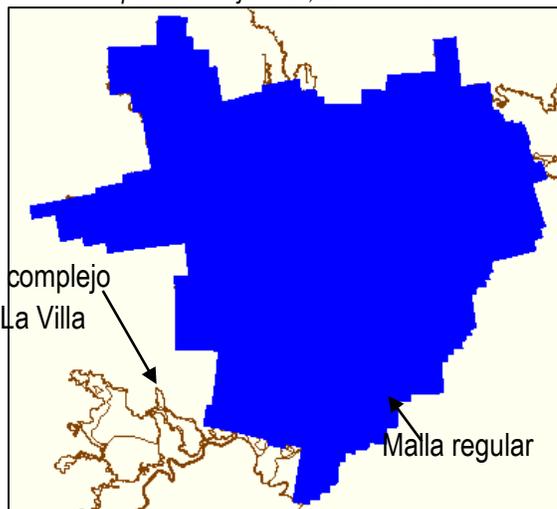


Figura 29. Malla regular con dominio computacional ajustado, 296.820 celdas.

Después de la generación de las mallas regulares, se encontró que la malla con 74.205 celdas, era la malla adecuada, debido a que cumplió con los criterios de ortogonalidad y suavizado, así como los costos computacionales se ajustaban a los disponibles, ya que la malla de 296.820 celdas, requería un costo computacional demasiado alto (para 5 días de simulación se requerían 30 días computacionales).

En los resultados preliminares de profundidades de agua que se realizaron para las diferentes mallas regulares (ver Figura 30, Figura 31 y Figura 32), se encontró que los resultados en la malla de 74.205 celdas (ver Figura 32) se evidenciaban las interconexiones del cuerpo cenagoso de La Villa, por tanto, se confirmó que esta malla era la adecuada para continuar las simulaciones, debido a que los resultados inicialmente encontrados evidenciaban el proceso de inundación del cuerpo cenagoso. Asimismo los tiempos computacionales eran posibles de trabajar.

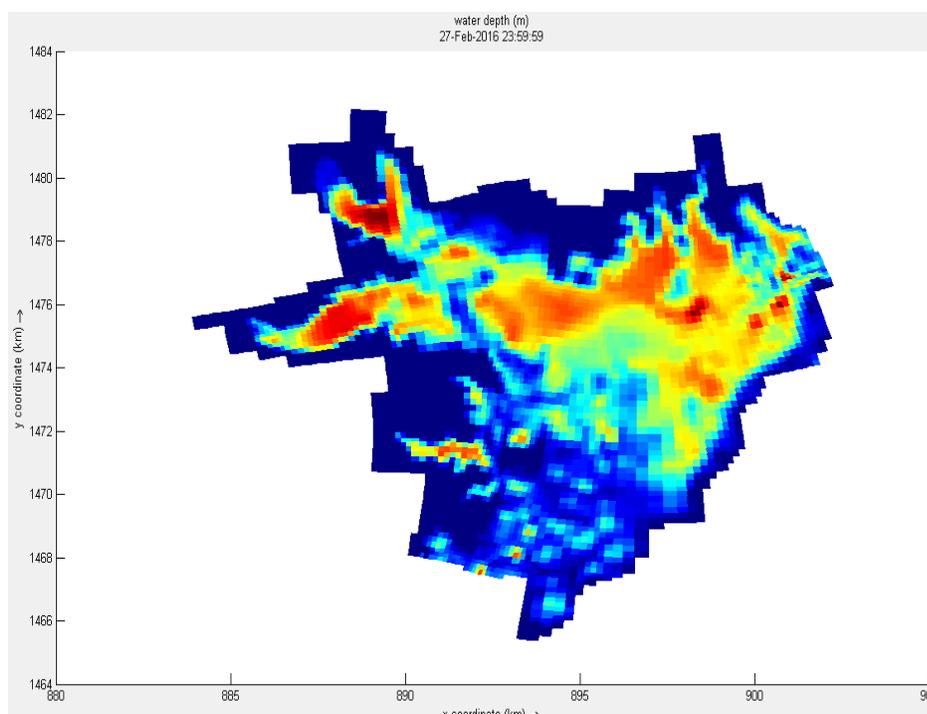


Figura 30. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 5.953 celdas.

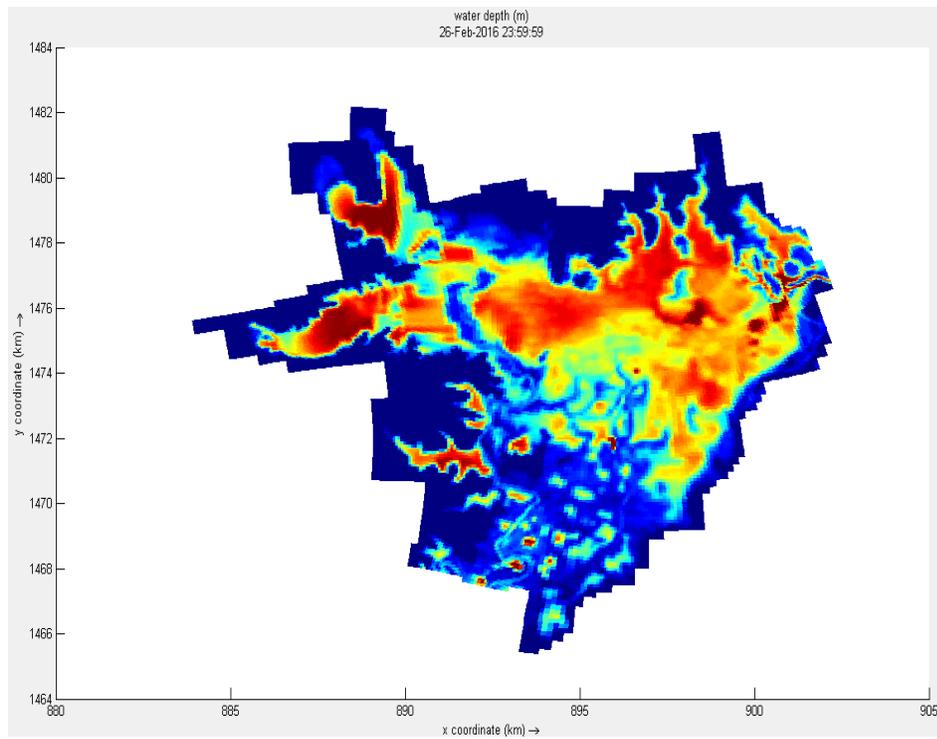


Figura 31. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 27.711 celdas.

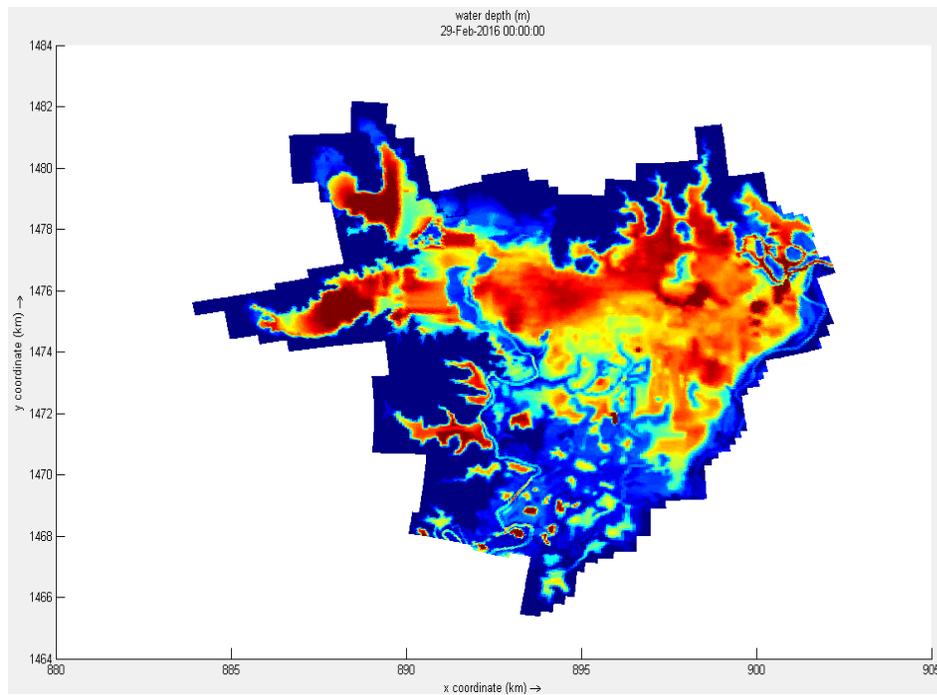


Figura 32. Profundidades de agua en malla regular con dominio computacional ajustado, 74.205 celdas.

2.5 Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó en cada uno de los escenarios de simulación para los coeficientes de rugosidad de Manning uniformes (no se utilizó la variabilidad espacial contemplada inicialmente) en toda la zona de estudio de 0.025, 0.0338, 0.0425, 0.0512 y 0.0600 (ver Tabla 1).

El primer y último valor (0.025 y 0.060) de coeficiente de rugosidad de Manning corresponden a los valores mínimos y máximos según Chow, (1985) para corrientes con anchos superficiales (en nivel de crecientes) mayores a 100 ft, para una sección regular sin cantos rodados ni matorrales. Los otros tres corresponden a valores intermedios linealmente espaciados.

Se escogieron seis puntos de observación en todo el cuerpo cenagoso para el análisis de sensibilidad (ver Figura 33), es decir que se realizaron corridas de todos los escenarios de simulación (ver Anexo 1) para cada punto y en estos puntos se analizó que tanto incide en el comportamiento hidrodinámico el coeficiente de rugosidad de Manning. Asimismo, se analizó si el modelo llega al estado permanente o estacionario.

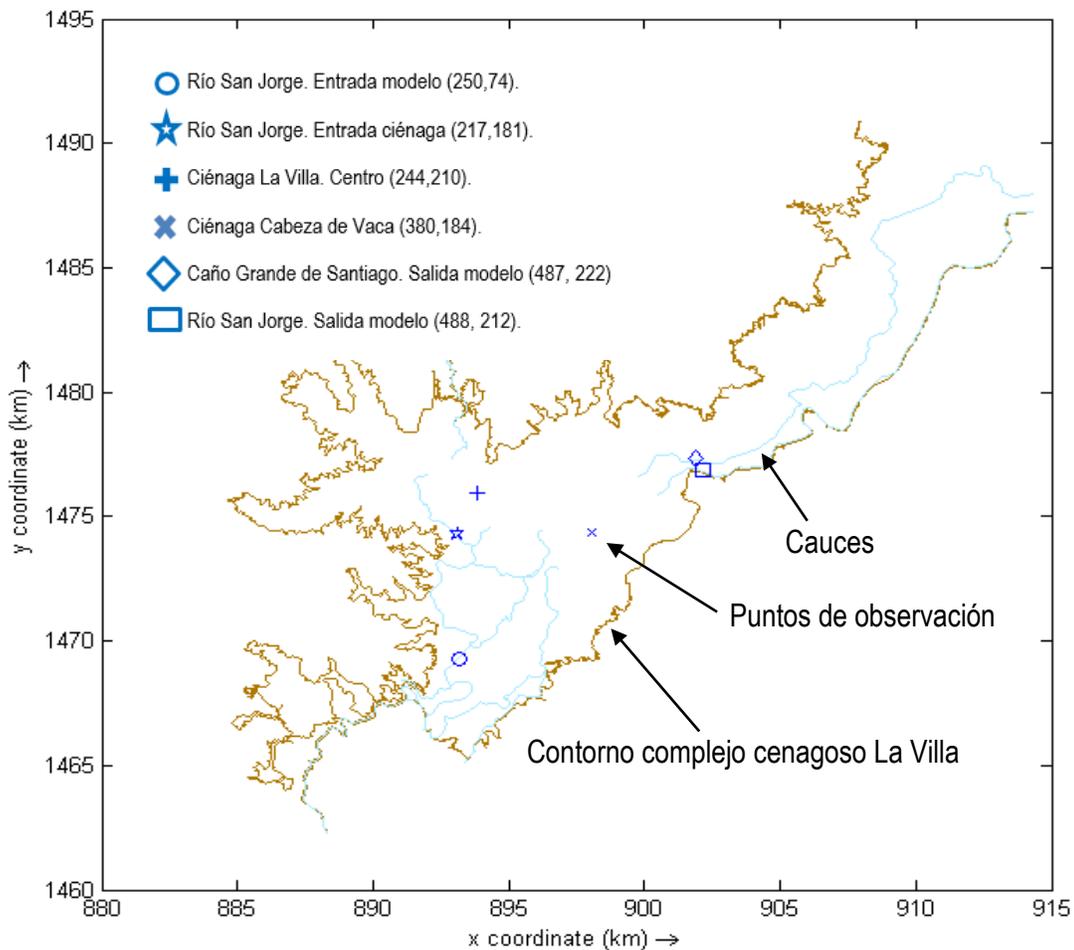


Figura 33. Localización de puntos de observación para el análisis de sensibilidad.

Tabla 4. Puntos de observación para análisis de sensibilidad

ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO CON RELACIÓN AL COEFICIENTE DE MANNING (n)

DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN	UBICACIÓN EN EL MODELO		ESCENARIOS	VARIABLES	COEFICIENTES DE MANNING (n)
	M	N			
Rio San Jorge Entrada Modelo	250	74	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600
Rio San Jorge Entrada Ciénaga La Villa	217	181	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600
Ciénaga La Villa (Centro)	244	210	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600
Ciénaga Cabeza de Vaca	380	184	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600
Caño Grande de Santiago Salida Modelo	487	222	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600
Rio San Jorge Salida Modelo	488	212	1, 2, 3, 4, 5	(H+h), u, v, u	0.0250, 0.0338, 0.0425, 0.0512, 0.0600

2.6 Calibración

Para la calibración, se escogieron los puntos de observación en el lugar más cercano, a cada una de las estaciones virtuales que se tienen del Modelo Sobek 1D del Fondo Adaptación en el cuerpo cenagoso de La Villa (ver Tabla 5). La ubicación espacial de estos puntos se puede ver en la Figura 34.

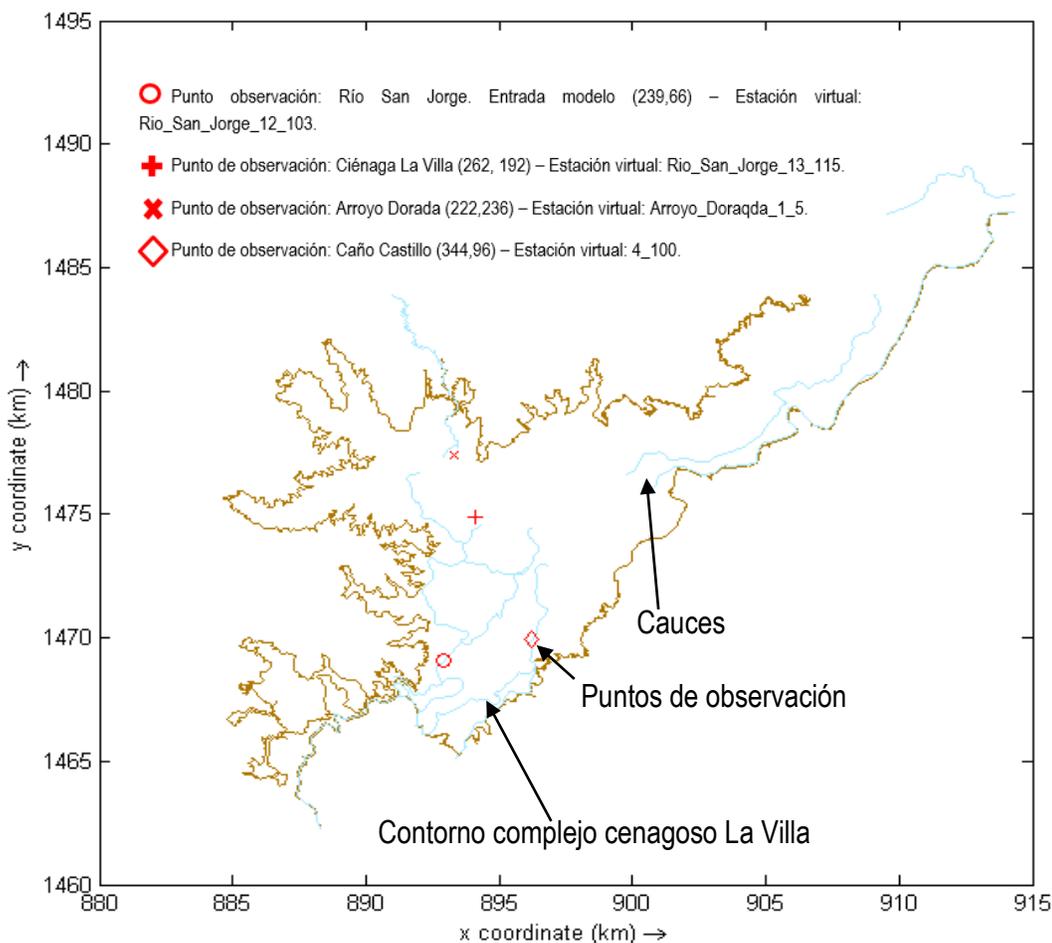


Figura 34. Localización de puntos de observación para la calibración

Tabla 5. Puntos de observación para calibración

CALIBRACIÓN: PUNTOS DE OBSERVACIÓN Y VARIABLES DE ANÁLISIS

DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN SEGÚN MODELO	UBICACIÓN EN EL MODELO		DESCRIPCIÓN DEL PUNTO DE OBSERVACIÓN SEGÚN MODELO SOBEK 1D DEL FONDO DE ADAPTACIÓN	COORDENADAS		ESCENARIOS VARIABLES	COEFICIENTES DE MANNING (n)
	M	N		X	Y		
	Río San Jorge Entrada	239		66	Rio_San_Jorge_12_103		
Ciénaga La Villa	262	192	Rio_San_Jorge_13_115	894.083,89	1.474.880,15	1, 2, 3, 4, 5 (H+h)	0.025
Arroyo Dorada	222	236	Arroyo_Dorada_1_5	893.321,09	1.477.377,70	1, 2, 3, 4, 5 (H+h)	0.025
Caño Castillo	344	96	4_100	896.189,94	1.469.859,29	1, 2, 3, 4, 5 (H+h)	0.025

En las series de tiempo del Modelo Sobek 1D de cada una de las estaciones virtuales, se ubicaron los resultados en estado permanente o estacionario obtenidos de cada uno de los escenarios para el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025 y se realizó el análisis correspondiente.

2.7 Escenarios Críticos

La simulación de escenarios críticos, se basó en el análisis de todos los escenarios en dos poblaciones que se encuentran dentro de la zona de estudio, las cuales son: San Benito de Abad y Jegua (ver Figura 35), estas poblaciones han sido afectadas por las inundaciones durante el fenómeno de la niña en los años 2010 y 2011 (FONDO ADAPTACIÓN, 2013a).

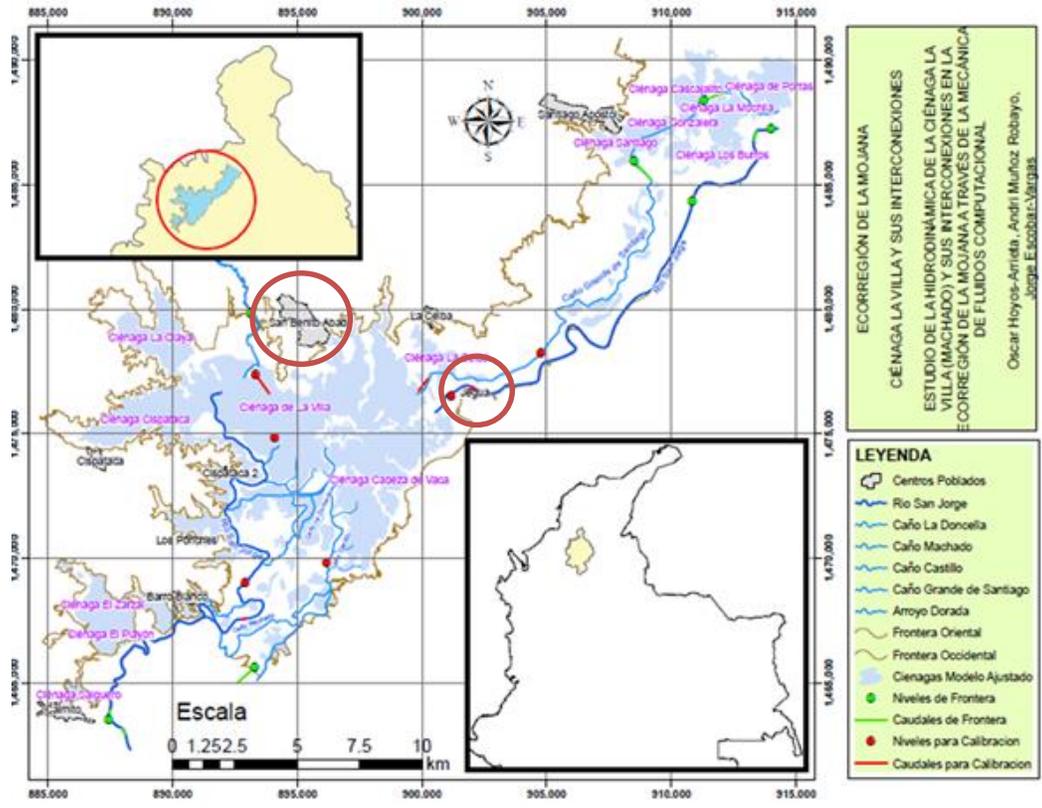


Figura 35. Ubicación de las poblaciones San Benito de Abad y Jegua.

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los resultados obtenidos son bastante amplios e incluyen niveles de agua y campos de velocidad para cada escenario propuesto e influenciado por diversos coeficientes de rugosidad de Manning, con periodos de simulación promedios de veinte (20) días y con resultados presentados cada cinco (5) minutos. Para poder visualizar esta información de forma rápida, se hace necesario hacerlo de una manera interactiva a través de videos y con apoyo del software usado, donde se aprecia el llenado del cuerpo cenagoso y la evolución en el patrón de flujo del agua (ver Anexo 2). Sin embargo para poder presentar los resultados más representativos y significantes, en este documento se han organizado de la siguiente forma:

- Resultados de niveles de agua y campos de velocidad en toda el área del cuerpo cenagoso, para todos los escenarios establecidos, es decir tanto los iniciales como los adicionales con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025 en el estado estacionario (ver Tabla 2 y Tabla 3).
- Resultados del análisis de sensibilidad. Se presentarán los resultados representativos de todos los escenarios simulados. Por tanto, se escogieron de los Escenarios 4 y 3, los puntos en la entrada al río San Jorge, en la ciénaga La Villa y en la conexión del río San Jorge con la ciénaga. Adicionalmente, se presenta el Anexo 1, con toda la información usada para este análisis.
- Resultados de calibración. Se presenta una verificación de los resultados obtenidos con el modelo para cada escenario, tomando como referencia la información de las estaciones virtuales del modelo Sobek 1D (ver numeral 2.6).
- Resultados de los escenarios críticos. Estos resultados presentan, como se afectan la cabecera municipal de San Benito Abad y el corregimiento Jegua con cada escenario planteado y se analizan en que momento y condiciones estas poblaciones se verían amenazadas por inundaciones.

3.1 Resultados de niveles de agua y campos de velocidad

3.1.1 Niveles de agua

De la Figura 36 a la Figura 43, se presentan los niveles de agua para todos los escenarios de simulación. Es importante aclarar que los resultados que se plasman corresponden a los estados estacionarios para cada escenario planteado, luego de que se pudo observar la forma como se llena el cuerpo de agua a partir de un nivel inicial de 13.5 m.s.n.m. El orden en que se organizaron las figuras corresponde a un nivel ascendente, desde caudales mínimos hasta caudales máximos, sin tener en cuenta el tiempo cronológico en que se sitúa cada escenario, esto con el fin de apreciar los

niveles de inundación que se alcanzan a medida que los caudales aumentan, logrando mostrar una evolución de los niveles de agua desde los niveles más bajos hasta los más altos, emulando en cierta medida lo que se podría decir una serie de tiempo cuasitransitoria para el año 2010 en su rama ascendente principal (Marzo – Octubre), el cual es el año que tiene una mayor variabilidad desde sus caudales mínimos hasta sus máximos.

Se puede observar que el nivel del agua no alcanza las fronteras computacionales hasta el Escenario 1 (ver Figura 38), es decir hasta que el río San Jorge no transporta un caudal de 195 m³/s. Para caudales mayores los niveles de agua del modelo tocan las fronteras computacionales, generando con esto un estancamiento virtual que en la realidad no sucede, sino que se genera un desbordamiento hacia la frontera oriental, donde se encuentra el resto del complejo cenagoso de La Mojana (ver Figura 8).

Para evitar el estancamiento virtual, se haría necesario modelar toda la ecorregión de La Mojana, debido a que no se cuenta con información que permita cuantificar el caudal que se genera en este desbordamiento para usarlo como una frontera abierta. Los resultados para escenarios donde los caudales el río San Jorge sean superiores a 195 m³/s se deben analizar y usar teniendo en cuenta este factor. Así mismo hay que tener en cuenta que la información que se genera con este modelo a partir de este punto sigue siendo valiosa, ya que es una aproximación muy cercana a las condiciones reales que se tienen en la ecorregión, como se mostrara más adelante en los subcapítulos de calibración y escenarios críticos.

Del análisis de las gráficas en los diferentes escenarios, se puede ratificar que a mayor caudal se presentan mayores niveles en el sistema hídrico. Así, detallando el Escenario 4 (ver Figura 36) y el Escenario 2 (ver Figura 37) se presenta una diferencia de niveles en promedio de 1 m en las ciénagas, lo mismo ocurre para los siguientes escenarios consecutivos, disminuyendo esta diferencia para los últimos escenarios hasta 0.5 m aproximadamente. Es decir que a medida que los caudales son más grandes, cuando se llegan a sus estados estacionarios respectivos, la diferencia entre niveles de inundación de escenarios consecutivos disminuye, esto, debido a que las áreas y por ende los volúmenes a llenar en niveles superiores por cada unidad de nivel es mayor que para los niveles inferiores. Lo anterior ratifica el comportamiento típico de las curvas de almacenamiento (Cota-Volumen), donde a alturas superiores éstas presentan una disminución en la pendiente.

A nivel general, se tiene que el sistema cenagoso pasa de un nivel de 16 m.s.n.m., en escenarios de caudales bajos, a 21 m.s.n.m., en escenarios de caudales altos. Es decir, se plantea una variación general de 5 m en promedio en el cuerpo cenagoso.

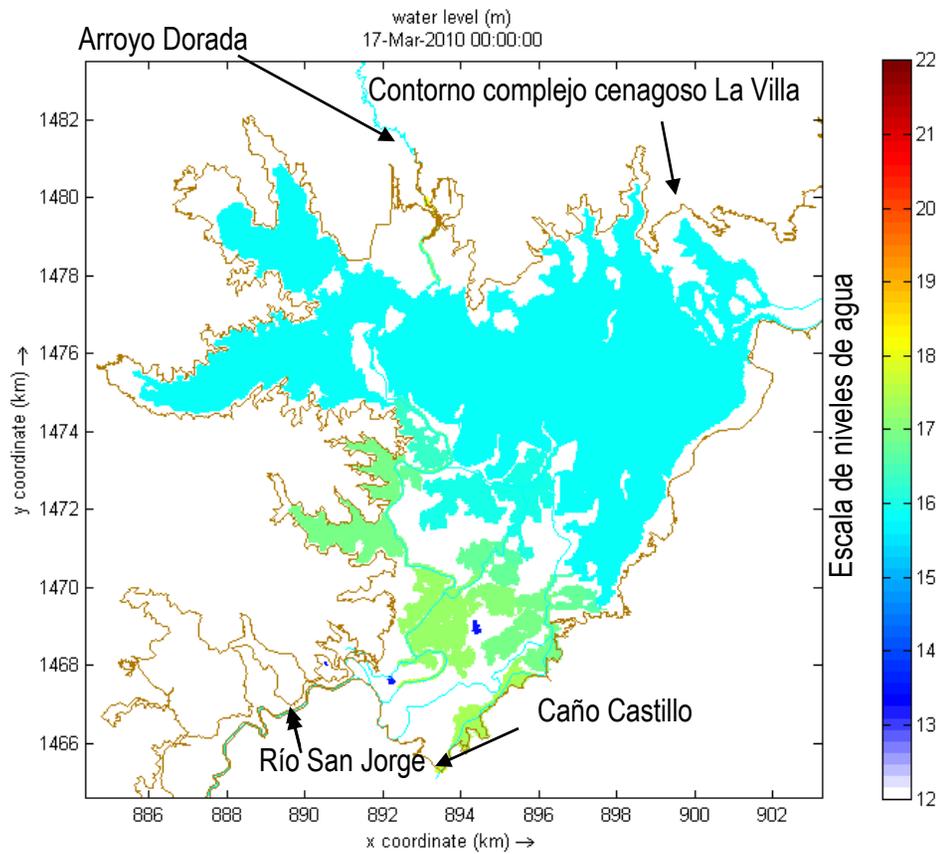


Figura 36. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m³/s. Caño Castillo: 7 m³/s. Arroyo Dorada: 1 m³/s.

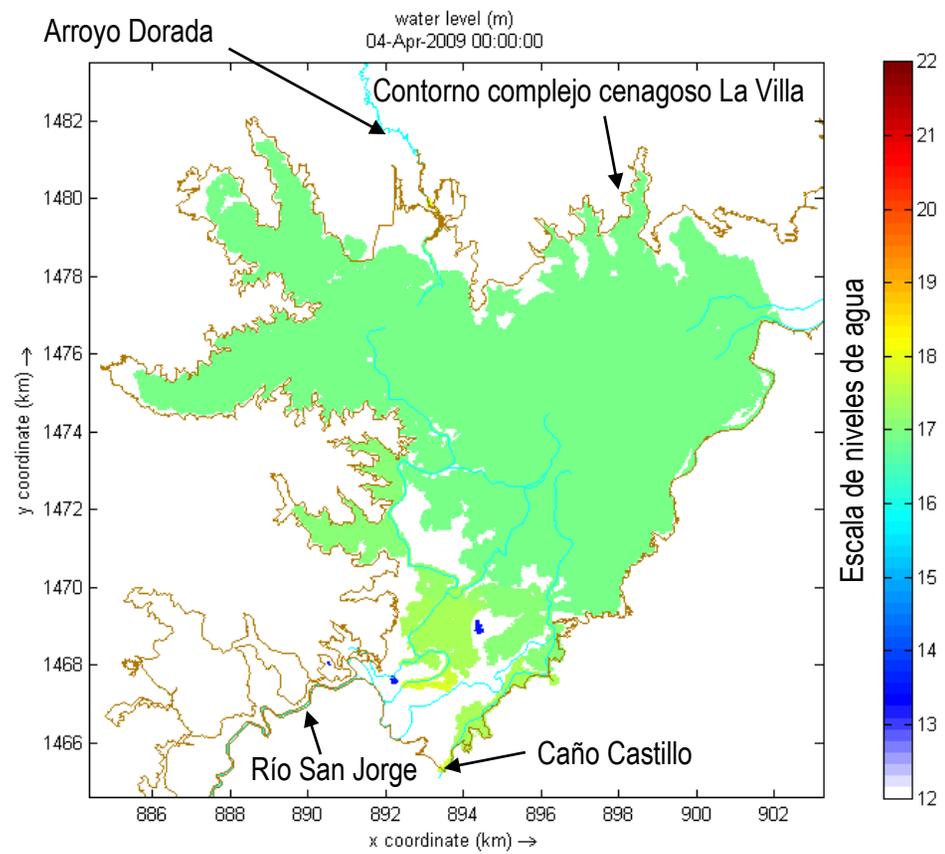


Figura 37. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m³/s. Caño Castillo: 13 m³/s. Arroyo Dorada: 2 m³/s.

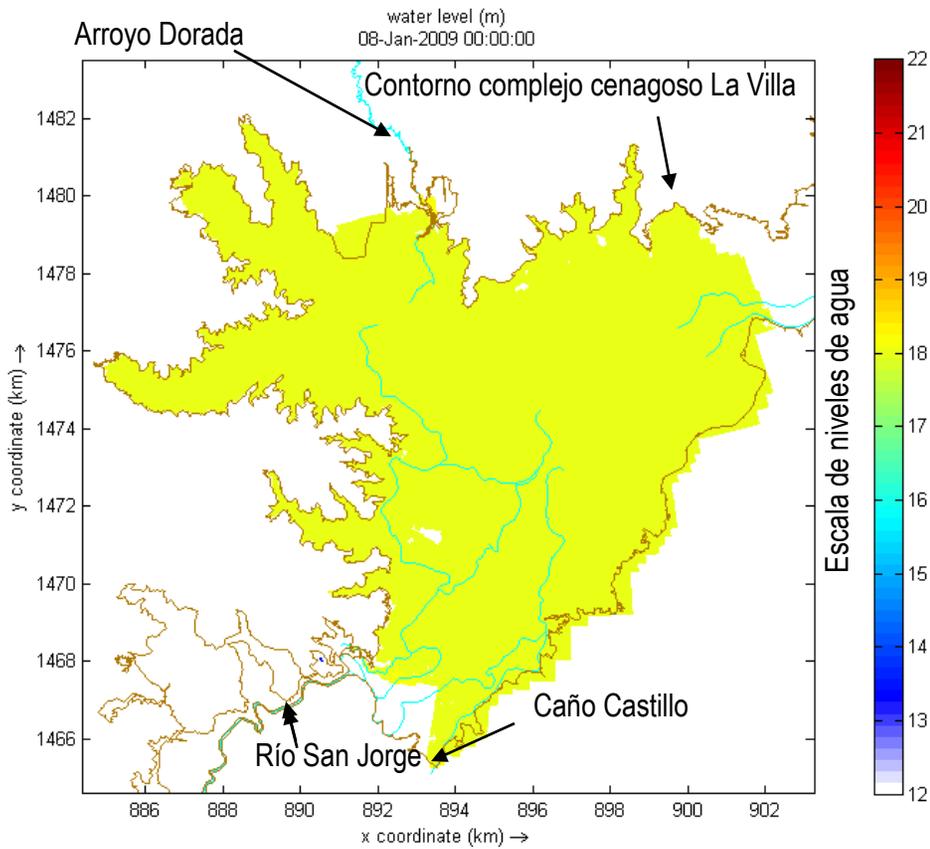


Figura 38. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m³/s, Caño Castillo: 50 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

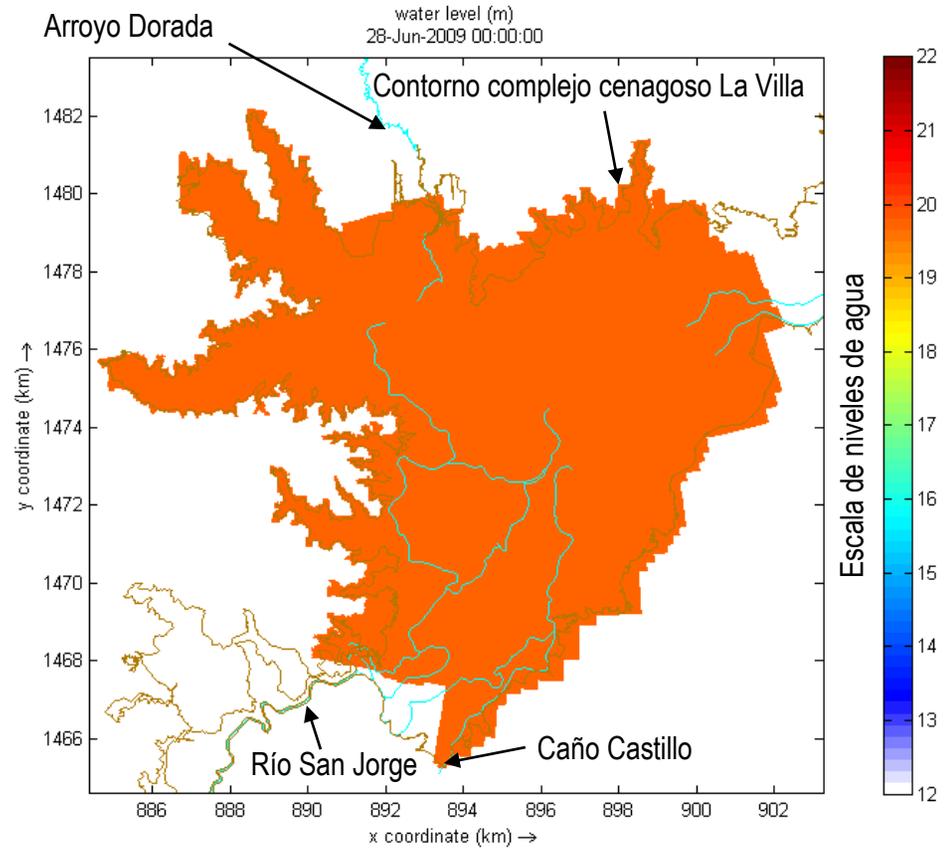


Figura 39. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m³/s, Caño Castillo: 80 m³/s, Arroyo Dorada: 2 m³/s.

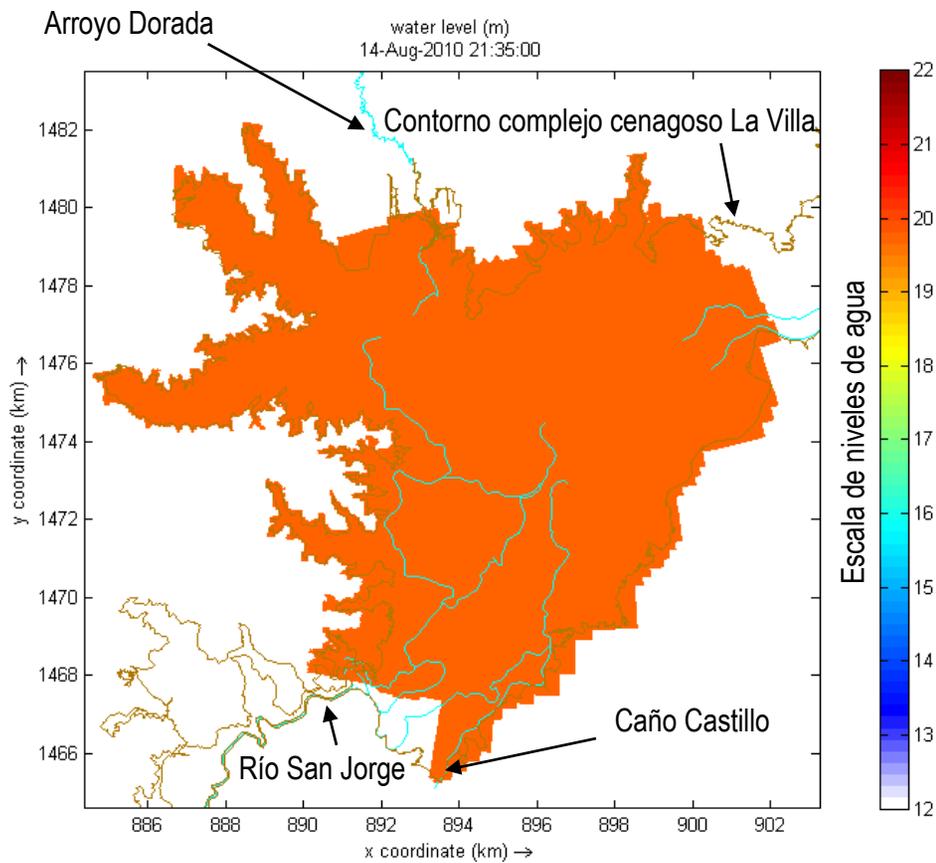


Figura 40. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m³/s, Caño Castillo: 115 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

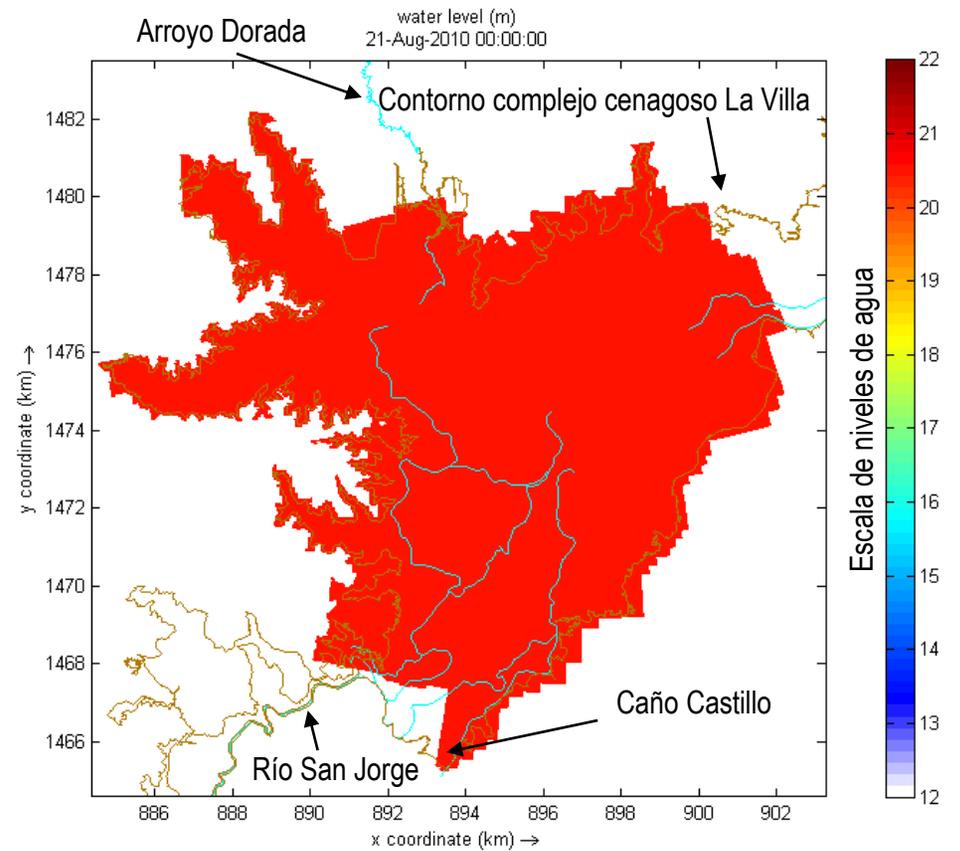


Figura 41. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m³/s, Caño Castillo: 130 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

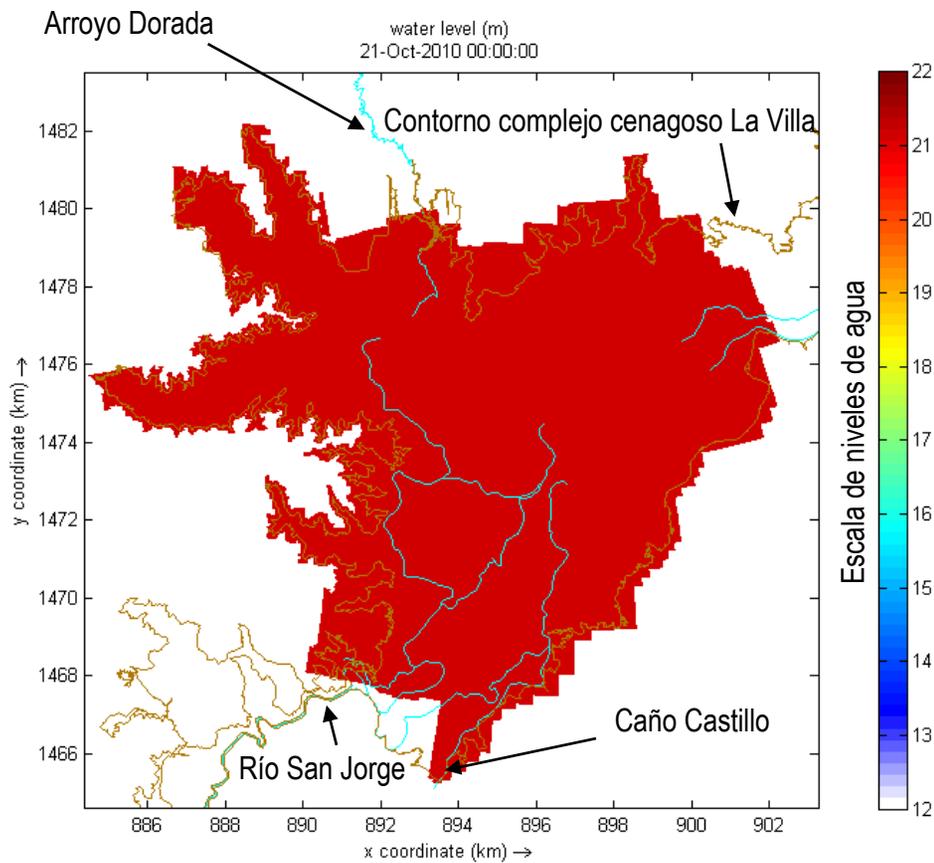


Figura 42. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s.

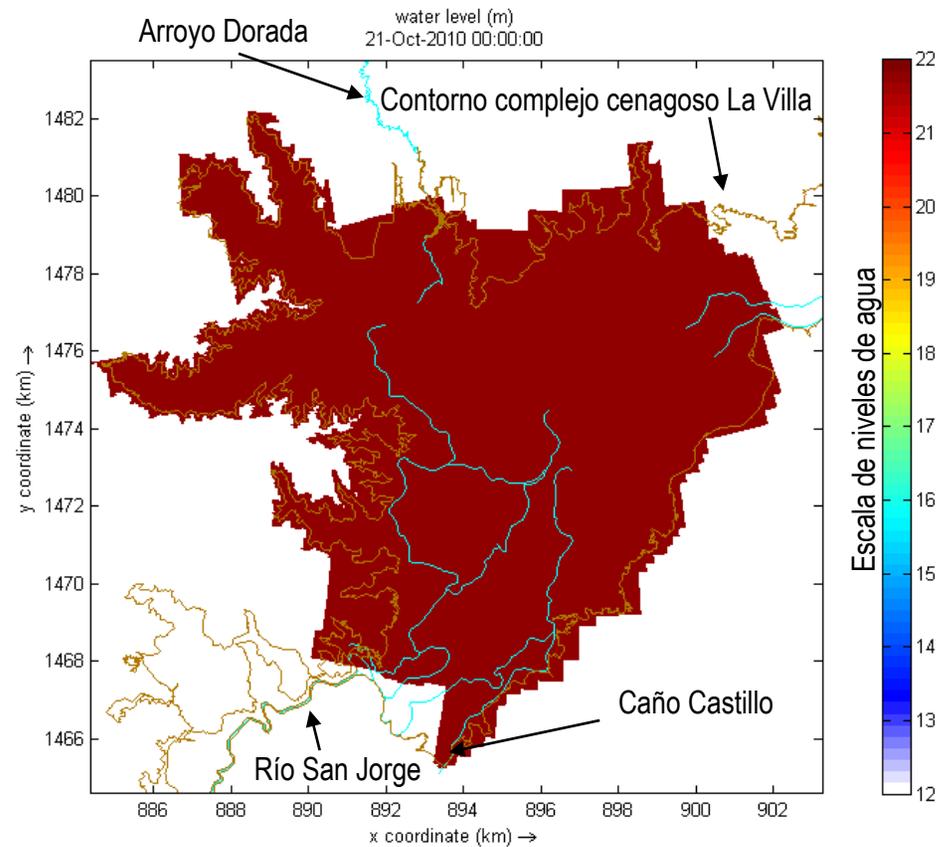


Figura 43. Niveles de agua en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s.

3.1.2 Campos de velocidad

De la Figura 44 a la Figura 51 se presentan los campos de velocidad para todos los escenarios de simulación. Así como en los niveles de agua se muestran los estados estacionarios para cada escenario, luego de que se pudo observar la forma como evoluciona el campo de velocidades, a medida que el cuerpo cenagoso se llena a partir de un nivel inicial de 13.5 m.s.n.m.

Para los diferentes escenarios encontramos de forma general que las velocidades se encuentran entre un rango de 0 y 0.5 m/s, donde las mayores velocidades se concentran en las entradas del modelo y algunas estrangulaciones del terreno, y las menores se encuentran mayoritariamente hacia los centros de las ciénagas.

Cuando se analizan todas las corridas realizadas durante todos los tiempos, es decir, en el proceso de llenado de los cuerpos de agua previos al estado estacionario, se encuentra que en los tramos modelados del río San Jorge y en los caños, se presentan los mayores valores, con magnitud de alrededor de 0.10 a 0.20 m/s, de forma típica y hasta 0.30 a 0.50 m/s en estrechamientos. Estos valores presentan un alto grado de congruencia con los medidos por (Zapata, 2005) para el río San Jorge a la altura de la Ciénaga de Ayapel (0.37 m/s), mientras que el (IDEAM, 2014a) reporta valores de 0.695 m/s para el arroyo Dorada.

Para el caso de las ciénagas, las magnitudes de velocidad encontradas varían entre 0 a 0.10 m/s, con una mayor tendencia hacia las velocidades inferiores a 0.05 m/s. En el caso de (Zapata, 2005), aunque no valido su modelo para campos de velocidad, encontró para la ciénaga de Ayapel en la ecorregión de La Mojana, valores de velocidad entre 0 y 0.15 m/s. Para el caso de la Ciénaga Grande de Santa Marta, (Toro & Gómez, 1997) reportan valores con predominio de los inferiores a 0.05 m/s para el interior de la ciénaga.

Los campos de velocidad modelados, para todos los escenarios, muestran claramente dos tendencias en el patrón de flujo. Se presenta un flujo que viene desde el río San Jorge en la entrada del modelo y que a medida que entra hacia el centro alimenta la ciénaga de La Villa, La Olaya y Cispataca generando un flujo que presenta un giro hacia el costado occidental del modelo. Por otro lado, está un flujo que viene desde el caño Castillo, ayudado por una parte del río San Jorge que entra a la ciénaga Cabeza de Vaca, a su vez este presenta un giro hacia el costado oriental del modelo y se dirige finalmente a las salidas del modelo en el río San Jorge y el caño Grande de Santiago.

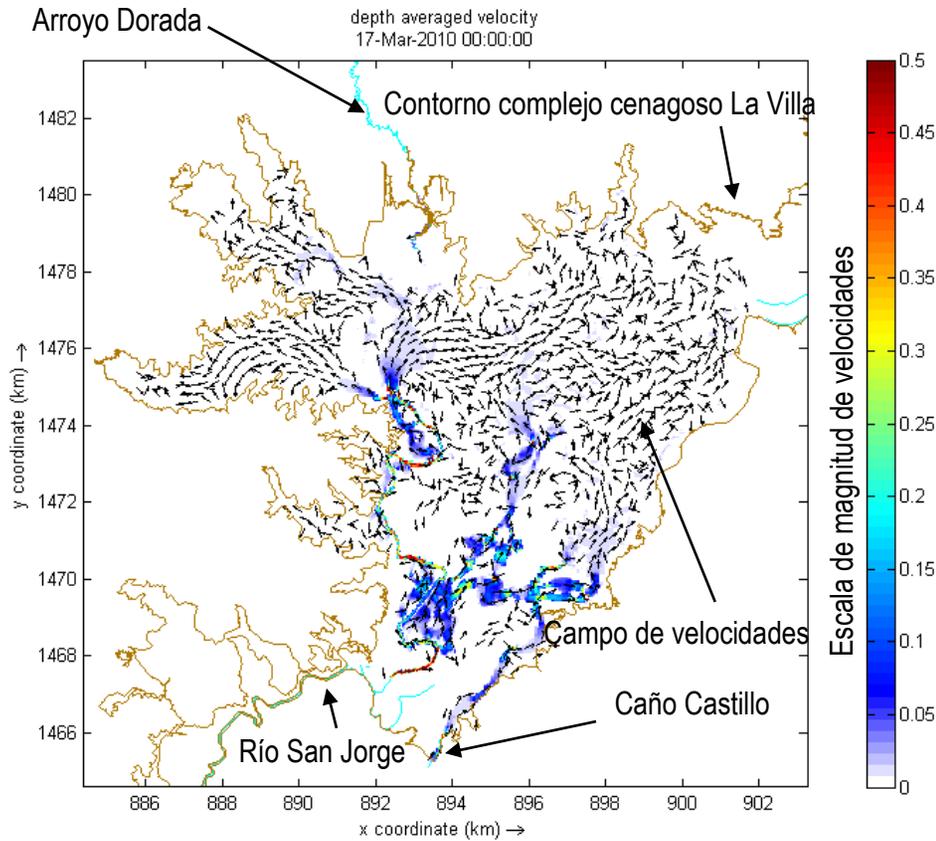


Figura 44. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m³/s. Caño Castillo: 7 m³/s. Arroyo Dorada: 1 m³/s.

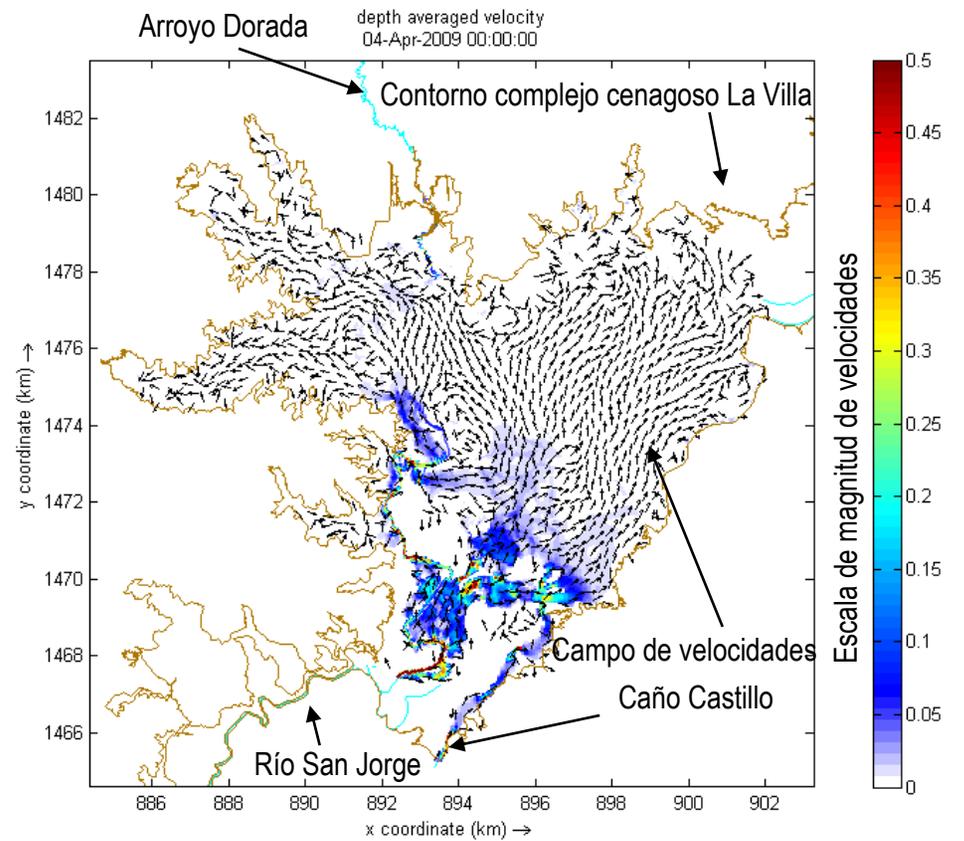


Figura 45. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m³/s. Caño Castillo: 13 m³/s. Arroyo Dorada: 2 m³/s.

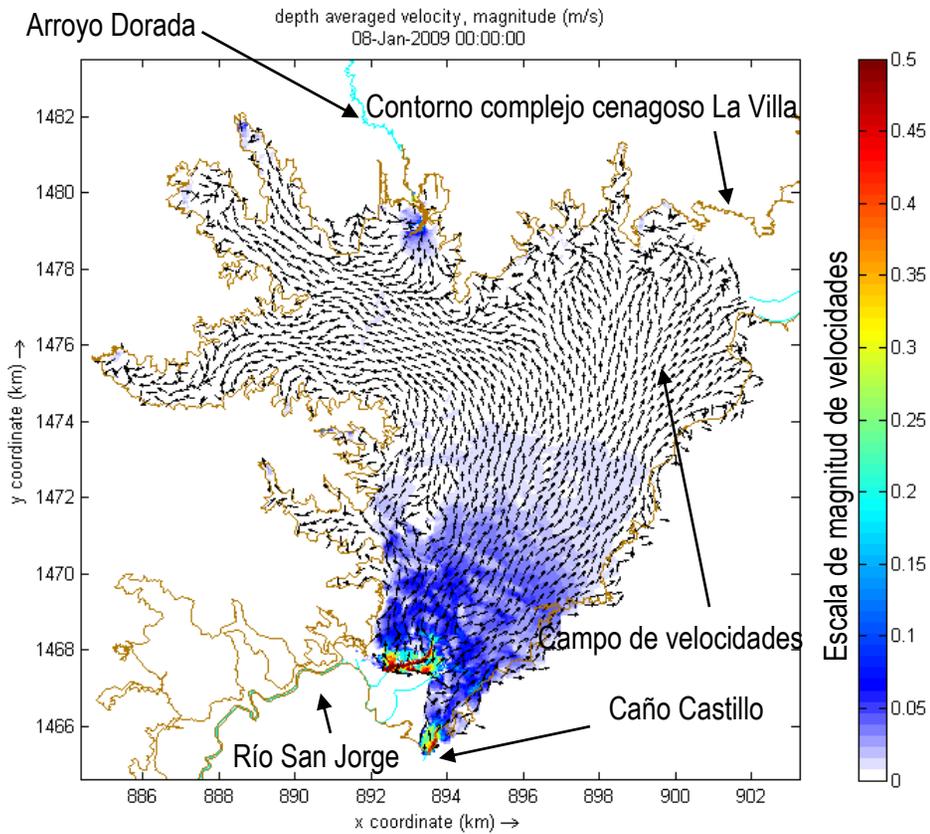


Figura 46. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m³/s, Caño Castillo: 50 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

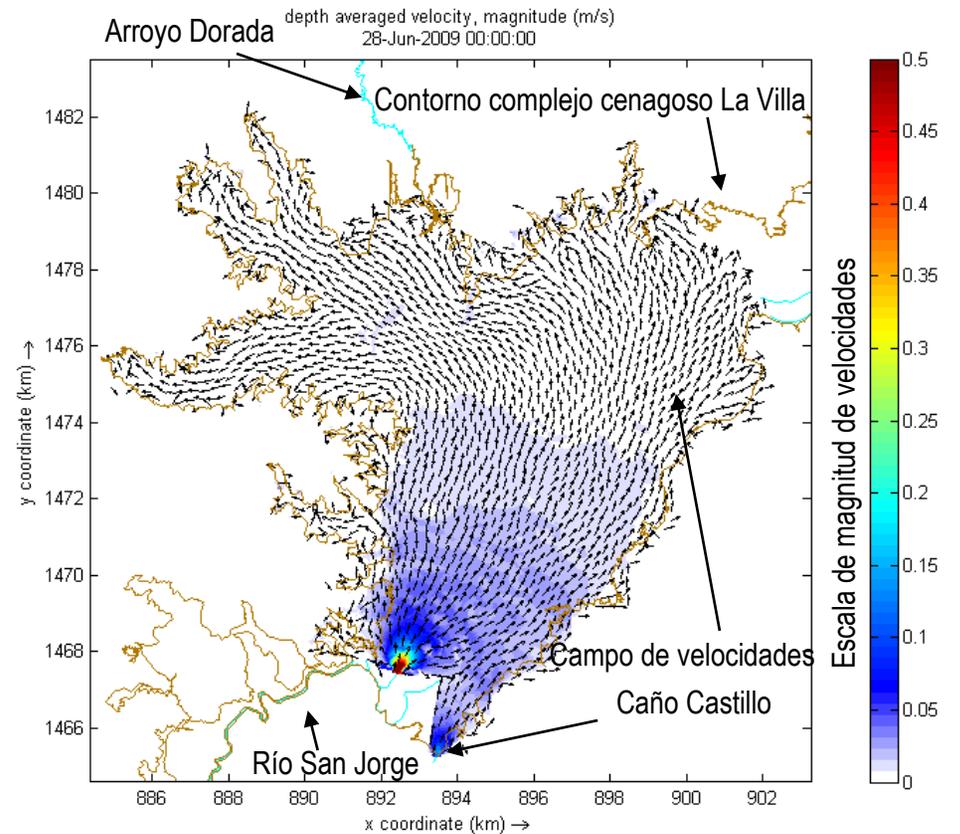


Figura 47. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m³/s, Caño Castillo: 80 m³/s, Arroyo Dorada: 2 m³/s.

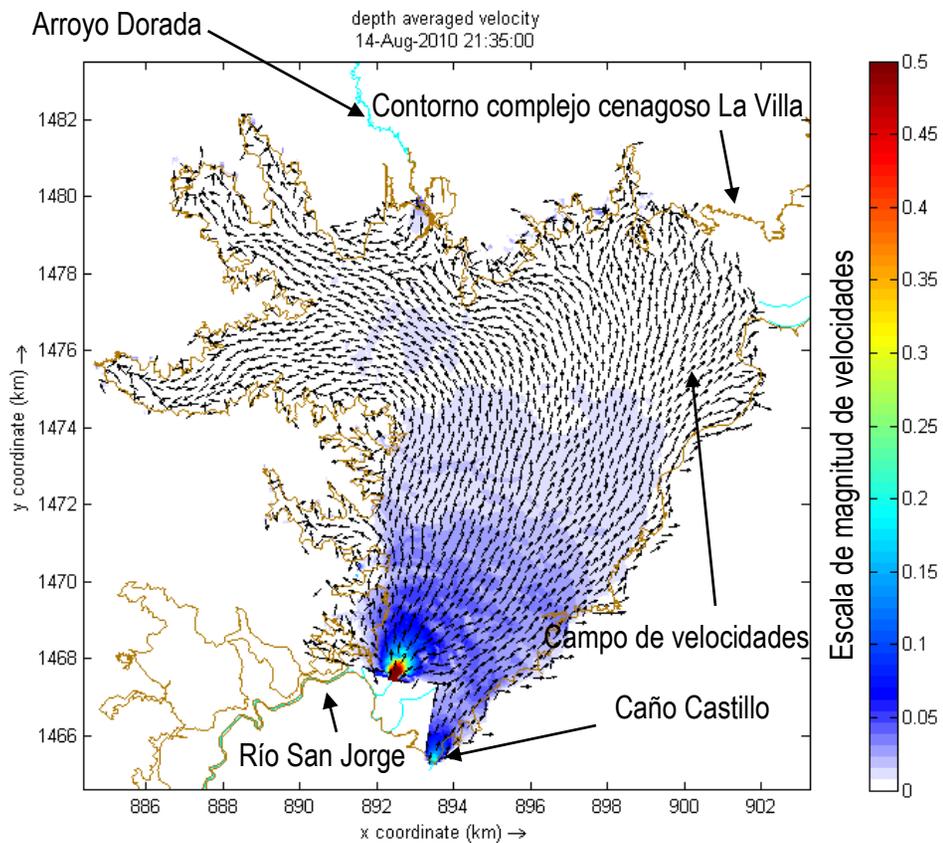


Figura 48. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m³/s, Caño Castillo: 115 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

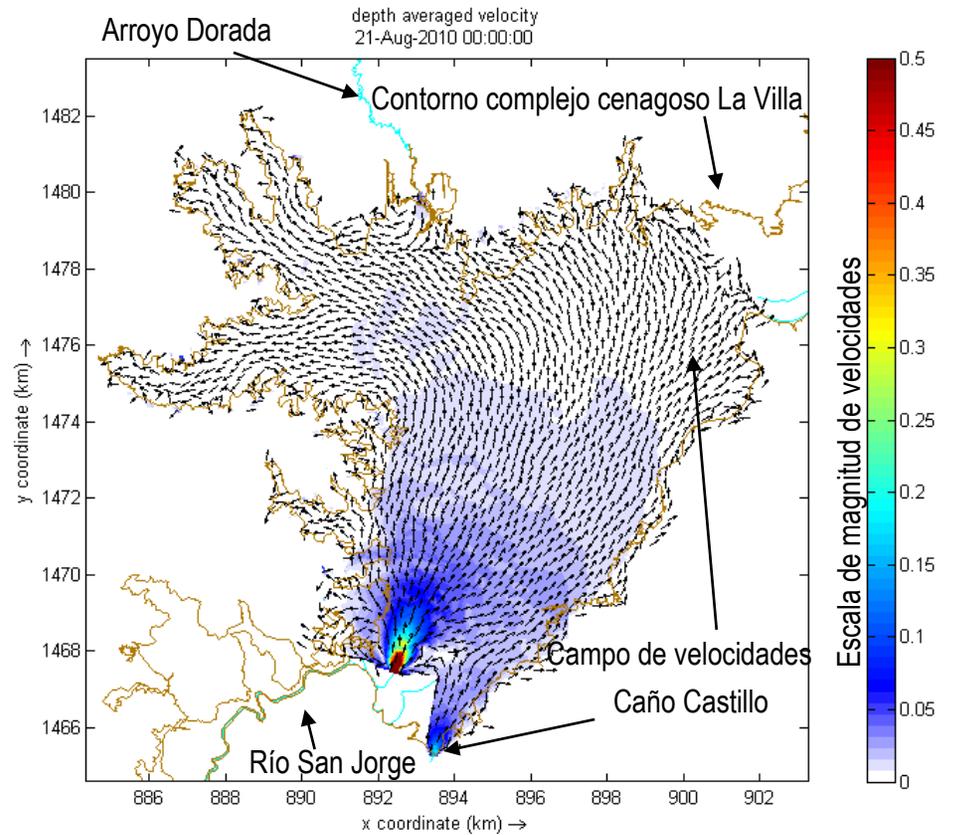


Figura 49. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m³/s, Caño Castillo: 130 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s.

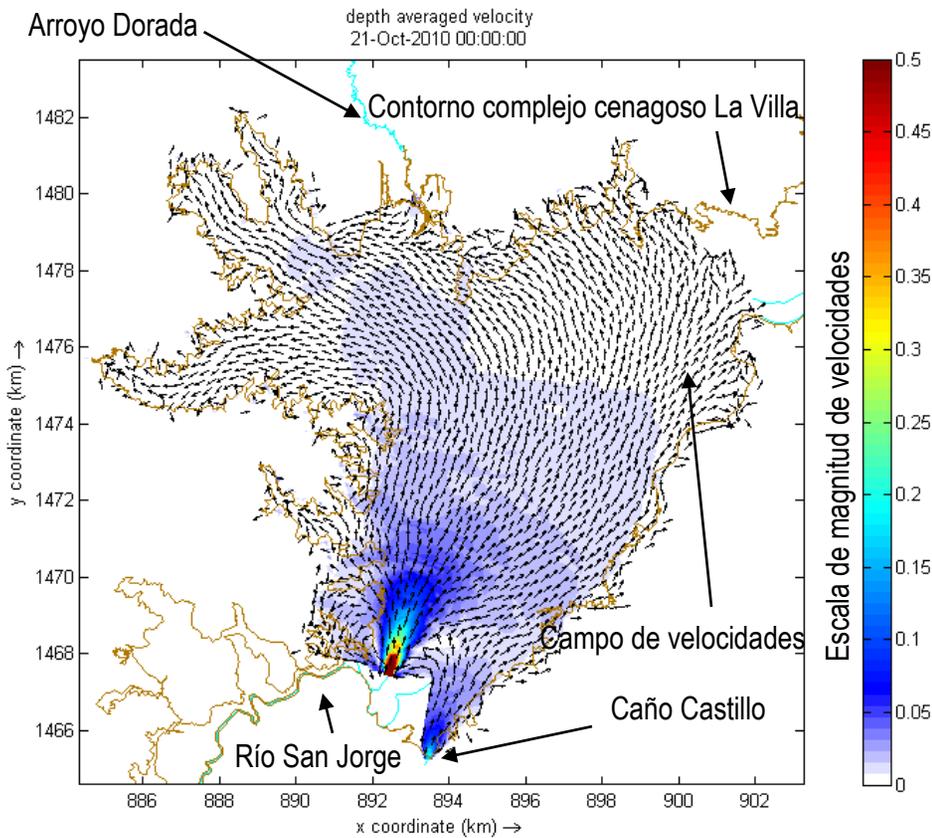


Figura 50. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s.

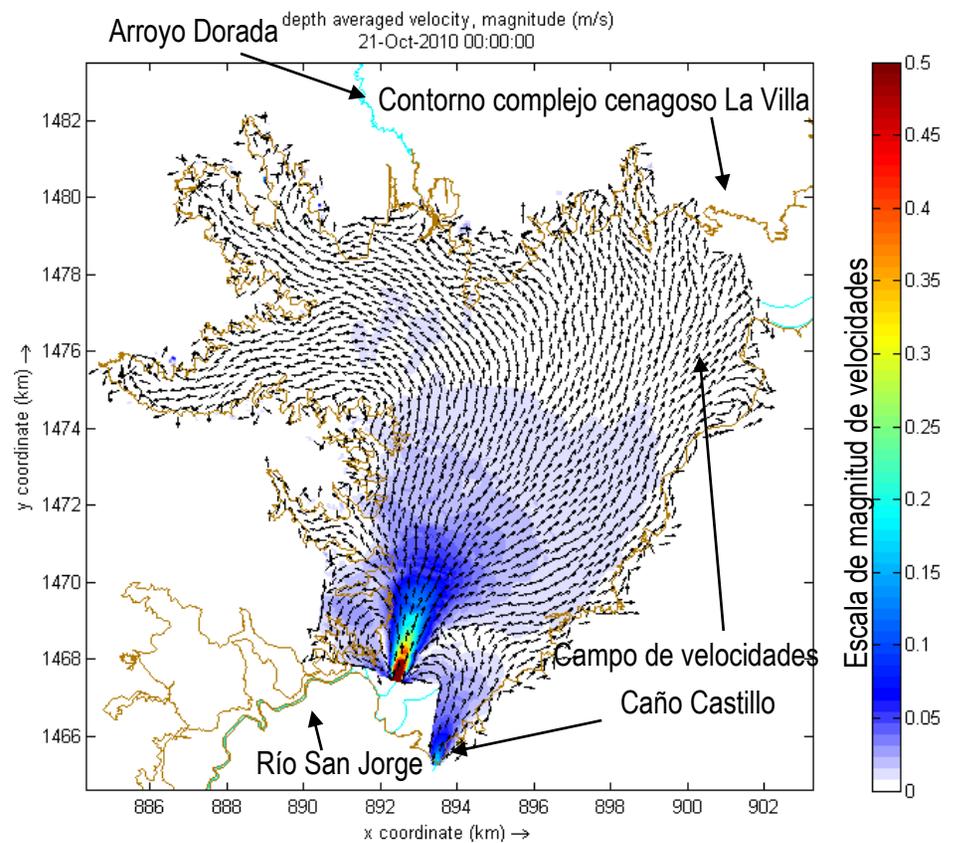


Figura 51. Campos de velocidad en el cuerpo cenagoso de La Villa, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s.

3.2 Análisis de sensibilidad

Del análisis de los componentes de las ecuaciones de gobierno (ver Ecuación 7, 12, 13) se llegó a la conclusión de que el parámetro más conveniente disponible para determinar la sensibilidad paramétrica del modelo era el coeficiente de rugosidad de Manning, por lo tanto, se usaron cinco valores de este, seleccionados a través de revisión bibliográfica.

En este aparte se presentan tres graficas representativas de los comportamientos encontrados a partir de todas las simulaciones realizadas. Los comportamientos típicos encontrados se concentran en el lotico (ríos, caños, arroyos), lenticos (ciénagas) y desembocadura (entrada de ríos en las ciénagas). El punto de observación para describir el comportamiento tipo lotico está ubicado en el río San Jorge alejado de la influencia de la ciénaga, el del comportamiento tipo lenticos está ubicado en el centro de la ciénaga La Villa y el de tipo desembocadura está ubicado preciso en la entrada del río San Jorge en la ciénaga La Villa, como si se tratara de una desembocadura (ver Figura 52). Para ver la información completa usada en el análisis de sensibilidad se puede remitir al Anexo 1.

Cada grafica está dividida en cuatro partes, la primera para los niveles de agua, la segunda para la componente m de la velocidad promedio en profundidad, la tercera para la componente n de la velocidad promedio en profundidad y la cuarta para la velocidad promedio en profundidad. En cada una de estas partes se presentan las condiciones encontradas para cada uno de los coeficientes de rugosidad de Manning usados en las simulaciones.

En la Figura 53 se presenta el comportamiento tipo lotico. En ésta se aprecia que existe cierta afectación del modelo por el coeficiente de rugosidad de Manning. Para el caso de los niveles de agua existen diferencias entre cada uno de ellos de alrededor de los 0.05 m y para las velocidades están alrededor de 0.05 m/s.

En la Figura 54 se presenta el comportamiento tipo lenticos. En ésta claramente se aprecia en los niveles de agua y las velocidades, que las condiciones para cada coeficiente de rugosidad de Manning se superponen, es decir que la afectación de éste en el comportamiento hidrodinámico de cuerpos lenticos es prácticamente indiferente.

Figura 55 se presenta el comportamiento, que en esta investigación se ha denominado de tipo desembocadura. Este se expresa como una combinación de los tipos anteriormente descritos, es decir, loticos y lenticos. La determinación del tipo predominante del comportamiento está definido por los niveles de agua presente en el momento. Como se puede apreciar en esta figura, en las partes correspondientes a las velocidades, se muestra que en los primeros días (14 jun – 16 Jun, mientras el cuerpo cenagoso se está llenando sin que este afecta los niveles del río), su comportamiento es como si fuera un cuerpo de agua lotico, es decir con velocidades altas y manteniendo los niveles de agua estable. En el momento que comienzan a subir los niveles, como se muestra en la parte correspondiente de la figura (ver niveles de agua desde el 18 jun en adelante) las velocidades inmediatamente disminuyen a los rangos de los cuerpos lenticos, mientras los niveles de agua

aumentan. Esto muestra claramente que la influencia del coeficiente de rugosidad de Manning está relacionada con las velocidades, es decir, afecta las ecuaciones de momentum con un predominio en los cuerpos loticos. En las partes de velocidades, donde el comportamiento aun es lotico, se aprecia que existen diferencias en las magnitudes de velocidades con relación a cada coeficiente de rugosidad de Manning usado, mientras que en el sector donde es lentico todas las velocidades tiende al mismo valor, el cual es muy cercano a cero, es decir que su influencia es bastante limitada para estos tipos de cuerpos.

Todo este análisis también nos lleva a definir que la ecuación de continuidad, describe con mayor influencia los niveles de agua en el comportamiento hidrodinámico, mientras que las ecuaciones de conservación de momentum describen con mayor influencia los campos de velocidad.

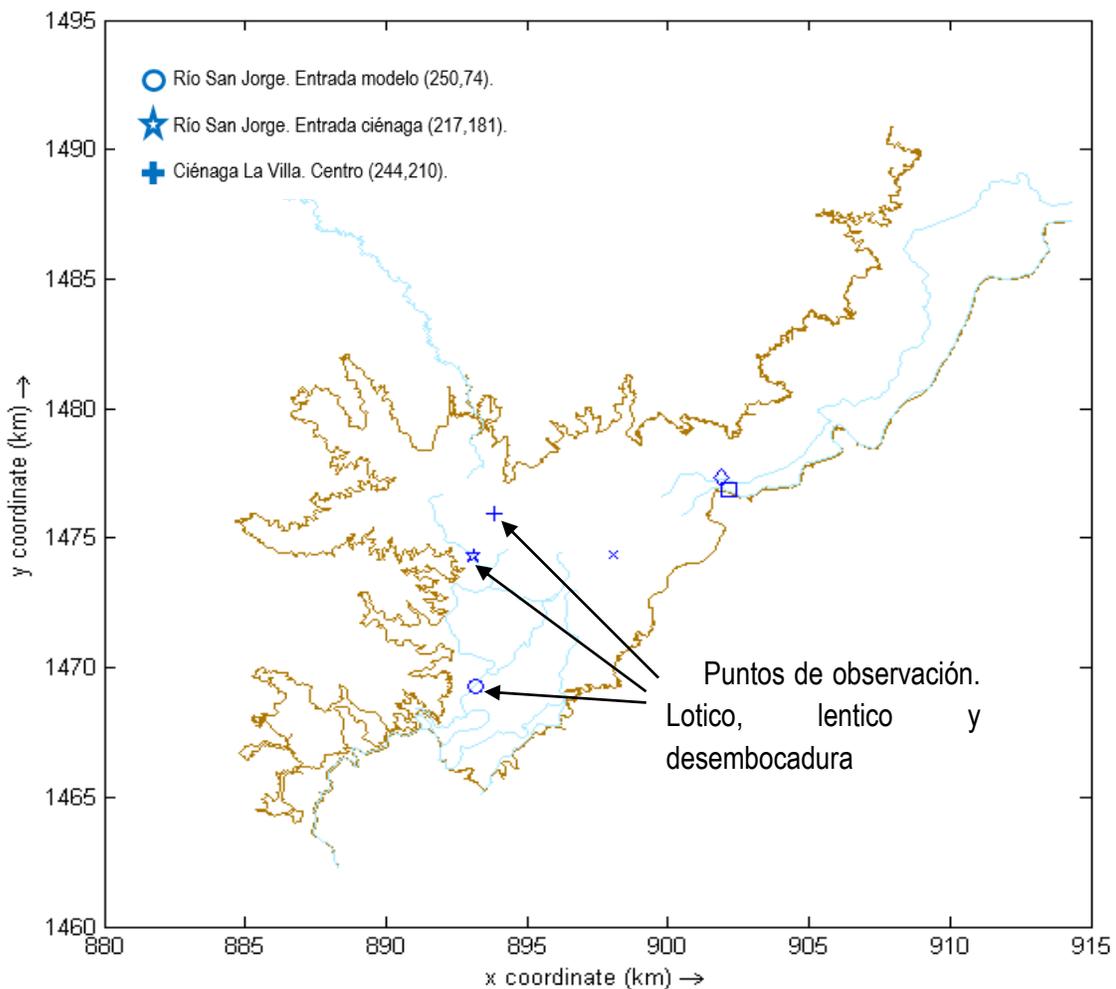


Figura 52. Localización de puntos de observación representativos para cuerpos de agua tipo lotico, lentic y desembocadura.

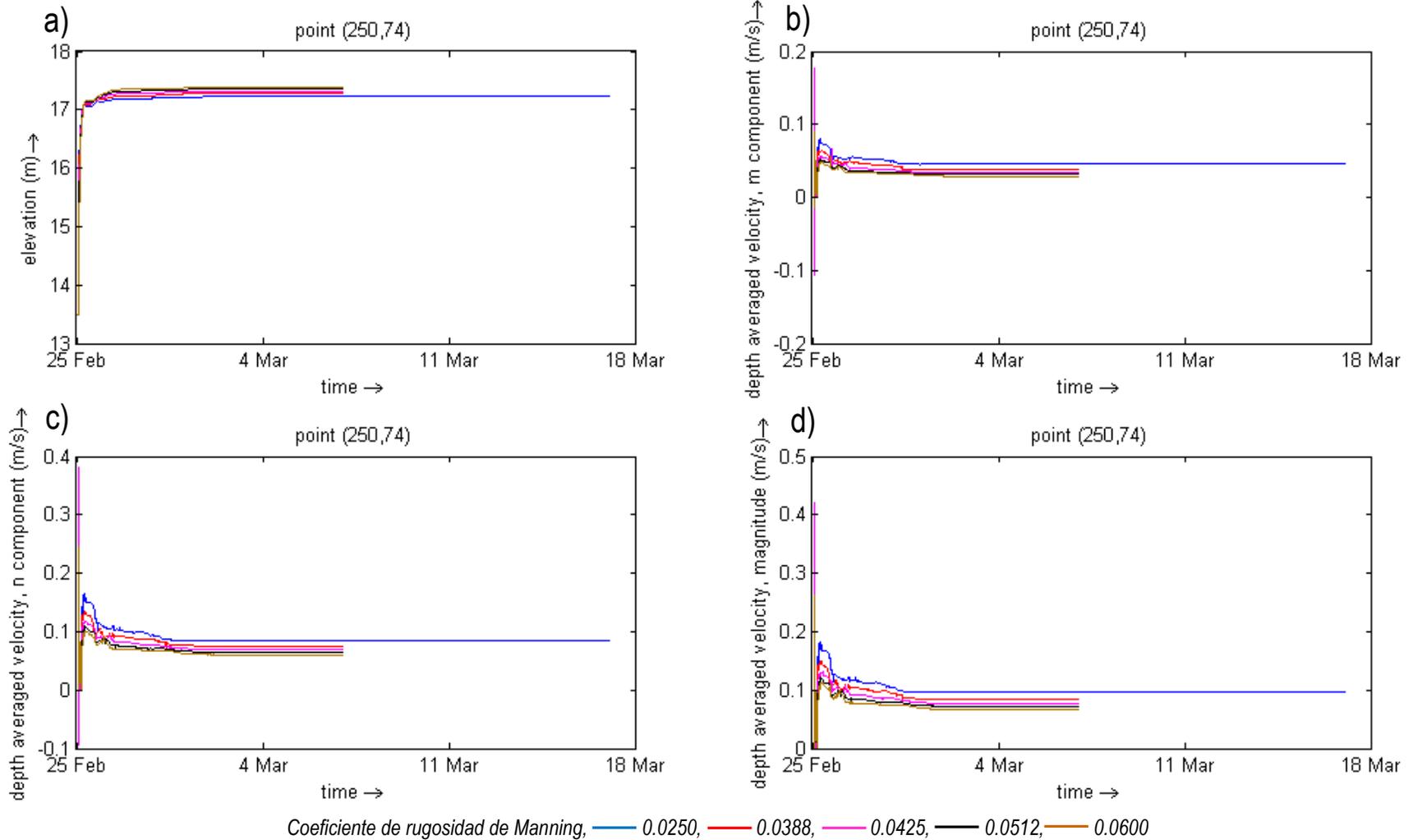


Figura 53. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74) Cuerpo de agua tipo lotico. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.

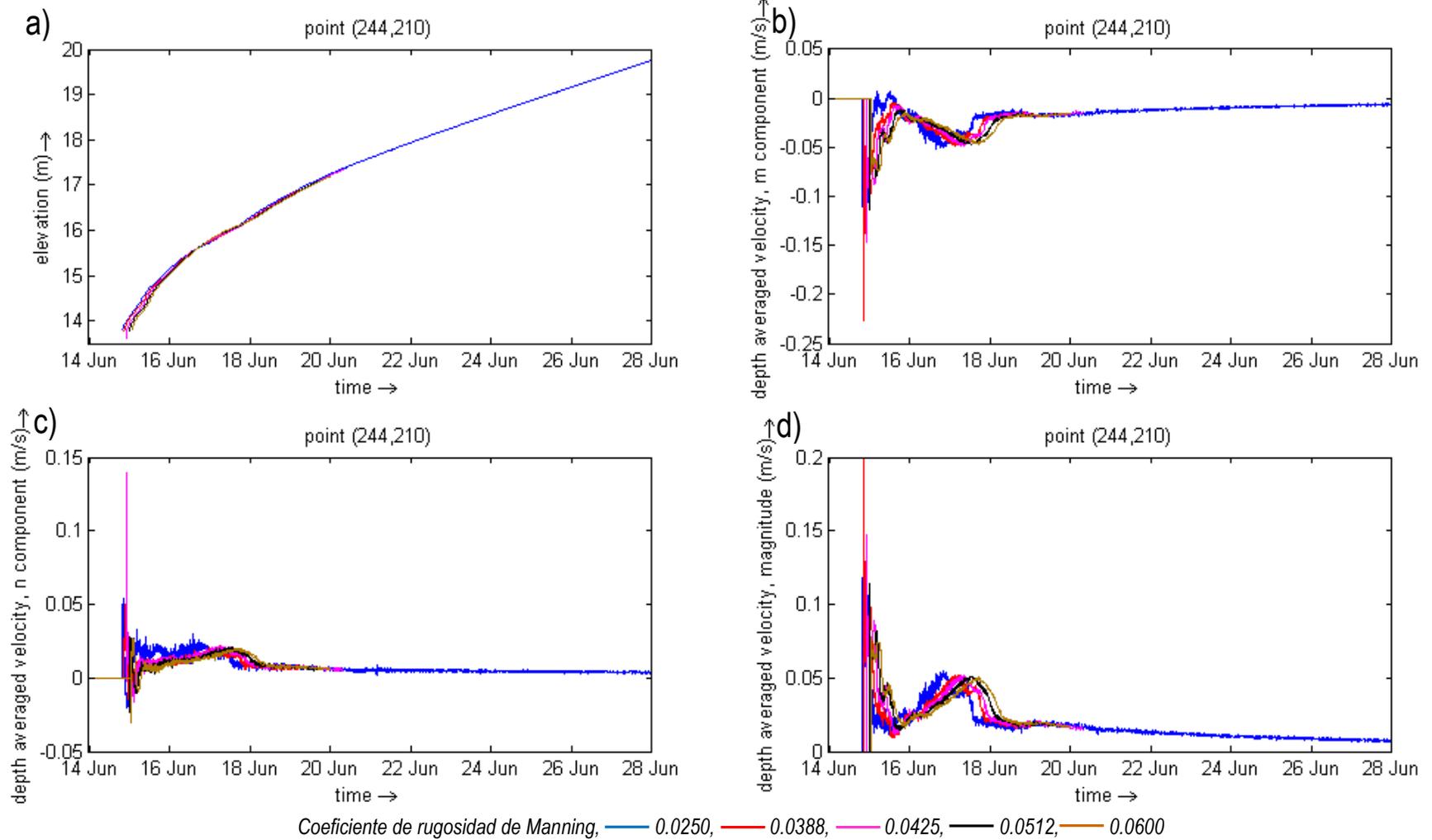
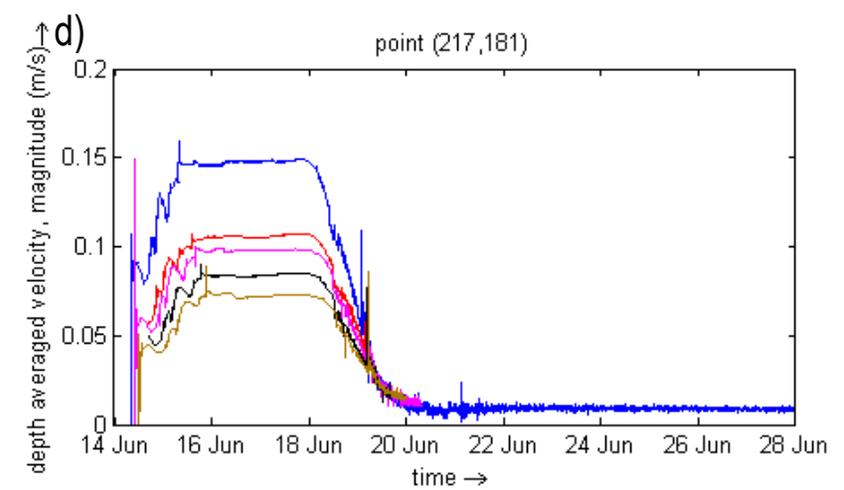
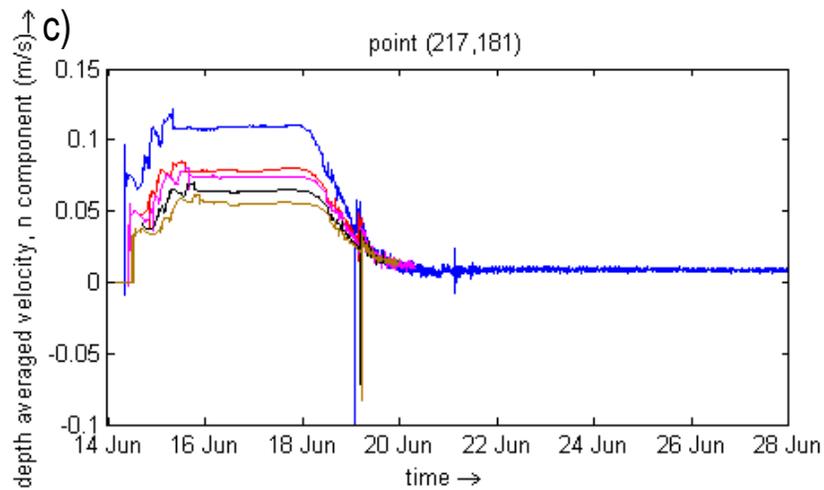
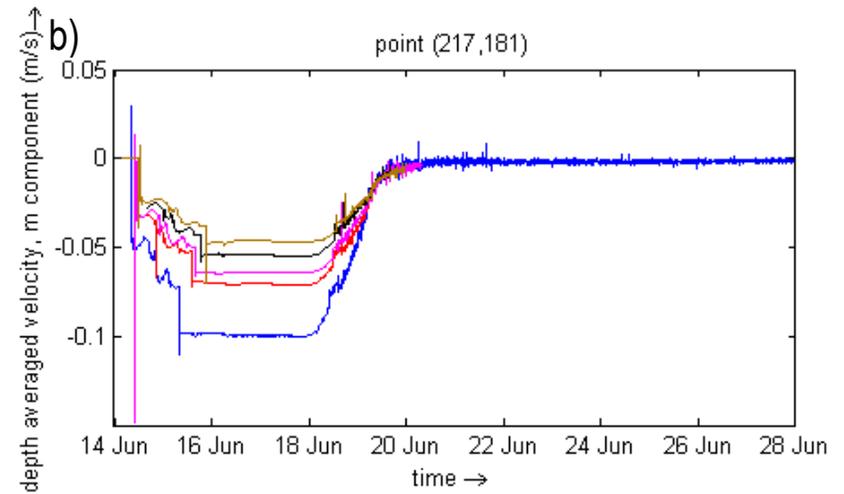
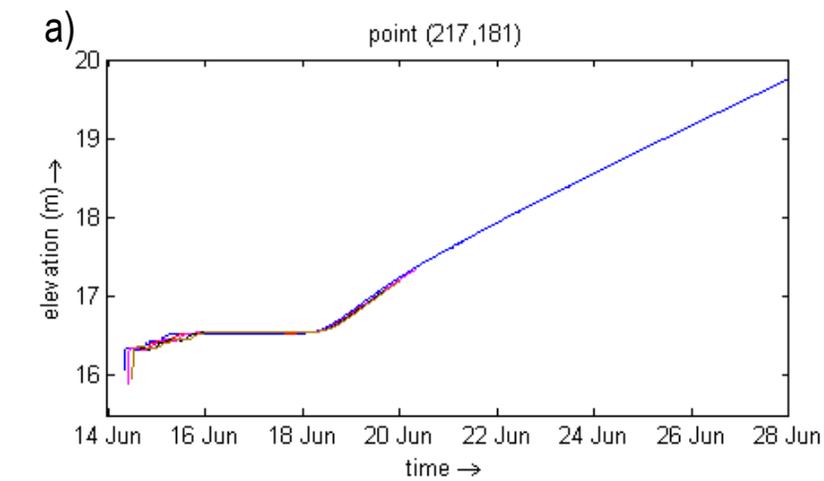


Figura 54. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210). Cuerpo de agua tipo lenticó. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Figura 55. Análisis de Sensibilidad para el Escenario 3: Caudales Máximos 2009. Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181). Cuerpo de agua tipo desembocadura. a) Niveles de agua, b) Velocidad promedio en profundidad en la componente m, c) Velocidad promedio en profundidad en la componente n, d) Velocidad promedio en profundidad.

3.3 Calibración

En la Figura 56 y la Figura 57 se plasma el resumen del proceso de calibración del modelo. Este consistió en verificar que los niveles de los estados estacionarios para cada escenario representaran el comportamiento hidrodinámico del complejo cenagoso. La verificación se hizo comparando los niveles modelados, según se describió anteriormente, con las series de tiempo del modelo calibrado 1D desarrollado por el Fondo Adaptación en el código computacional Sobek para toda la ecorregión de La Mojana.

En estas gráficas (Figura 56, Figura 57) se muestra la ubicación de los puntos donde se realizó la calibración del modelo. Así mismo, para cada punto de análisis se presentan las series de tiempo del modelo 1D del Fondo Adaptación con los resultados del modelo de la ciénaga La Villa para cada escenario de forma comparativa. En la Figura 56 a), se comparan el punto Ciénaga La Villa, en la Figura 56 b) el punto Río San Jorge Entrada, en la Figura 57 a) el punto Arroyo Dorada y en la Figura 57 b) el punto Caño Castillo (Ver Tabla 5).

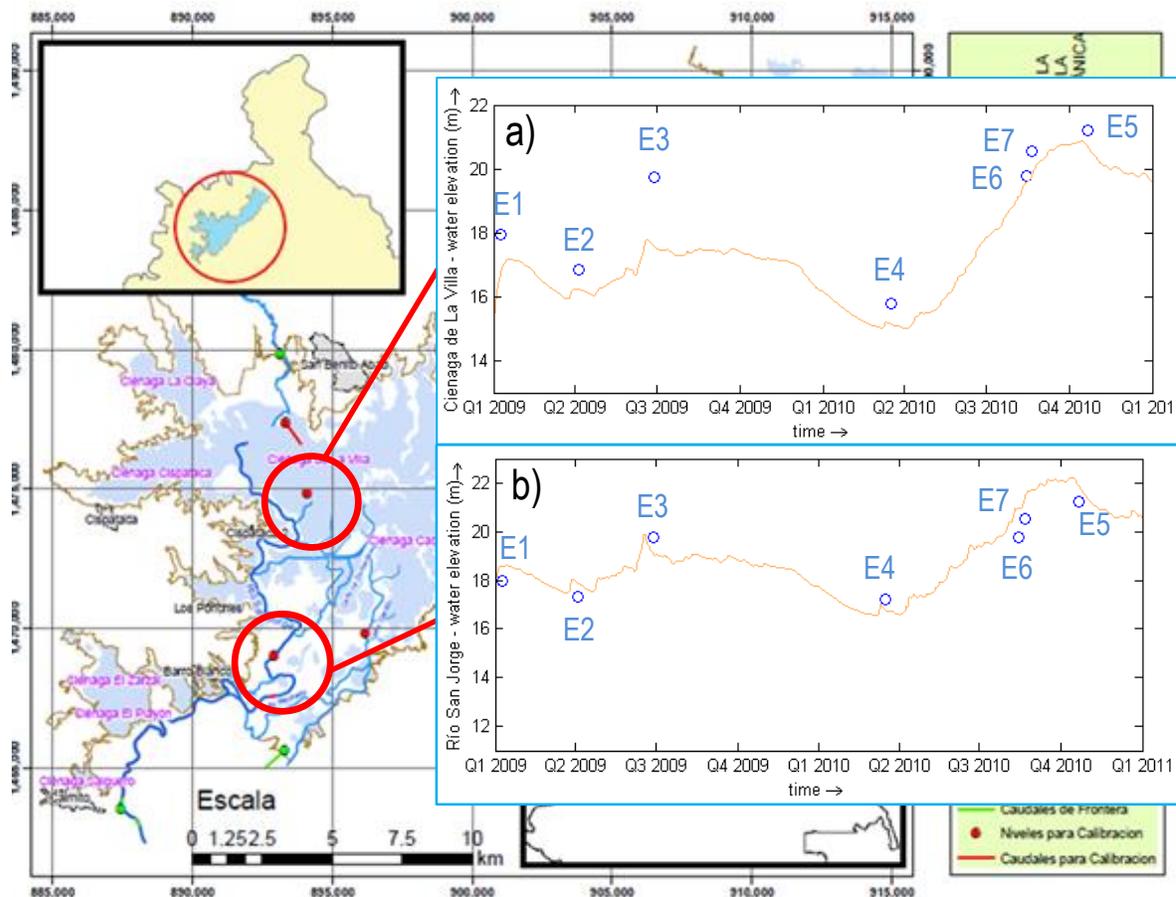


Figura 56. Comparación puntos de escenarios en estado estacionario modelados contra series de tiempo del modelo Sobek 1D del FONDO ADAPTACIÓN

En la Figura 56 y la Figura 57 se evidencia que los resultados obtenidos en estado permanente o estacionario, es decir los puntos, en su mayoría se ubican muy cerca de la serie de tiempo en cada uno de los escenarios establecidos (caudales al inicio del 2009, mínimos y máximos en el 2009 y mínimos y máximos en el 2010). En todos los escenarios los puntos están sobre o cerca de la línea de la serie de tiempo, a excepción del escenario 3 (caudales mínimos en el año 2010) y el punto del Arroyo Dorada, donde se registraron los puntos más lejanos de la serie de tiempo. Sin embargo, por todos los demás resultados en los escenarios de modelación, se considera que la calibración respecto a las estaciones virtuales del modelo Sobek 1D es una buena aproximación inicial, para encontrar resultados reales, debido a que se complementaron dos modelos hidrodinámicos en diferentes condiciones, y se obtuvieron aproximaciones entre los resultados de las modelaciones con un error menor al 10%. Solo se presentan los puntos para el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025, debido a que como se evidenció en los resultados de análisis de sensibilidad la diferencia entre todos los coeficientes analizados es mínima para niveles (Ver Figura 53, Figura 54, Figura 55 y Anexo 1).

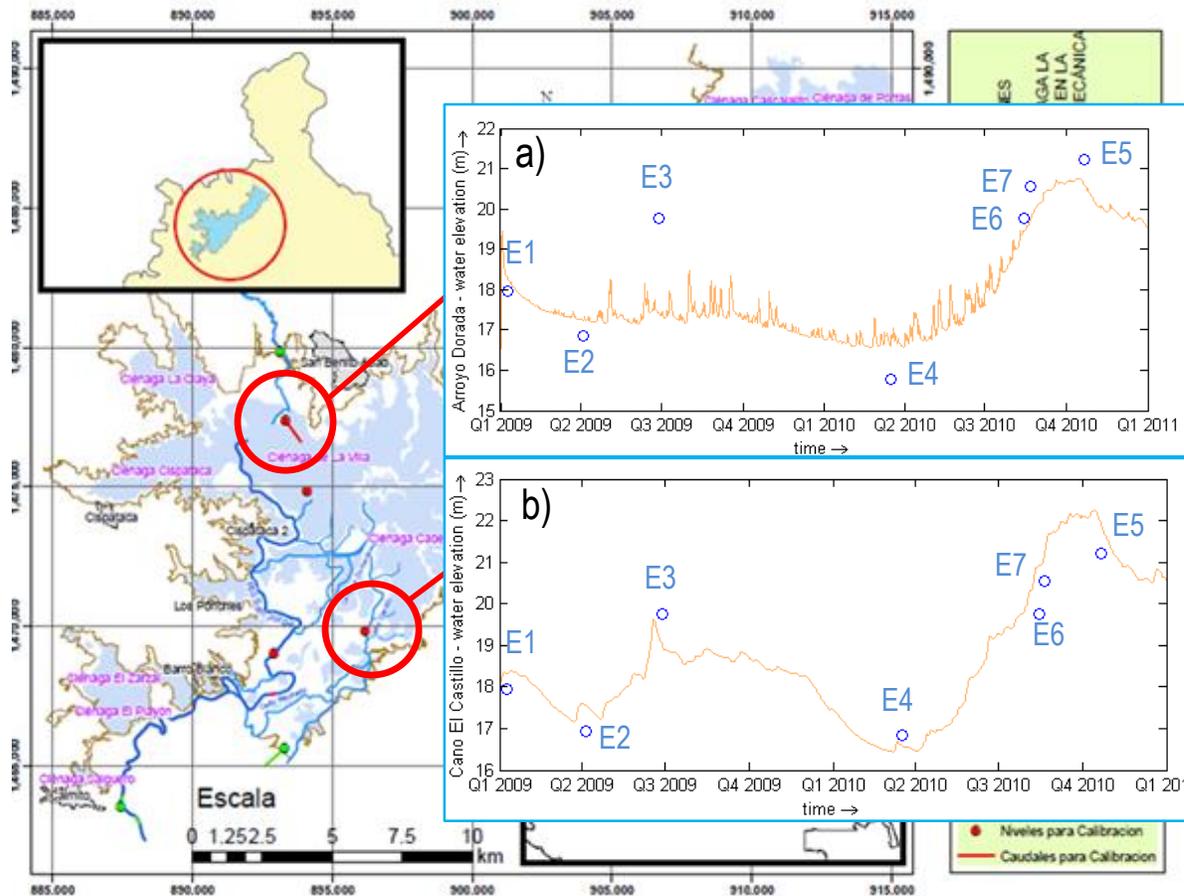


Figura 57. Comparación puntos de escenarios en estado estacionario modelados contra series de tiempo del modelo Sobek 1D del FONDO ADAPTACIÓN

3.4 Escenarios críticos

Definimos como escenarios críticos en esta investigación, a las condiciones en las cuales se presentan inundaciones de centros poblados, sin tener en cuenta conceptos como vulnerabilidad o llegar a definir algún tipo de riesgo, es decir, con este concepto solo se alcanzó a definir el nivel de amenaza por inundación en centros poblados referenciadas mediante la hidrodinámica de la zona.

Este análisis se realizó en las poblaciones de San Benito Abad – Cabecera municipal y en el corregimiento denominado La Jegua. A continuación, se presentan los detalles para cada una de ellas.

3.4.1 *San Benito Abad*

La cabecera municipal de San Benito Abad está ubicada al norte de la ciénaga de La Villa y está a la orilla de ésta (Ver y Figura 58 y Figura 59). El municipio cuenta con una población de 22.579 habitantes a 2005, de los cuales 5.474 habitantes están ubicados en la cabecera municipal (DANE, 2016).

En la Figura 58 se muestra la ubicación de la cabecera municipal en el modelo conceptual y se hace una aproximación mediante una ortofoto tomada por el Fondo Adaptación en el año 2013 en la Figura 59, esto con el fin de identificar de una manera detallada la orilla de la población con la ciénaga de La Villa, definir la espacialidad a analizar del modelo hidrodinámico y determinar los escenarios críticos para esta población.

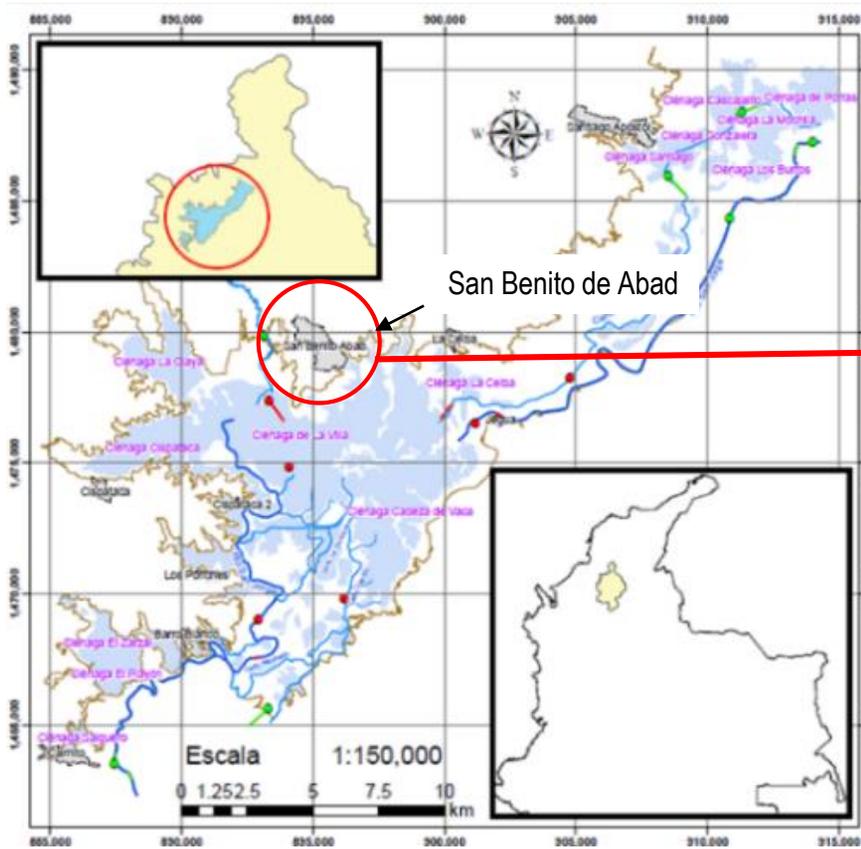


Figura 58. Modelo Conceptual del Sistema. Ubicación de la población de San Benito de Abad

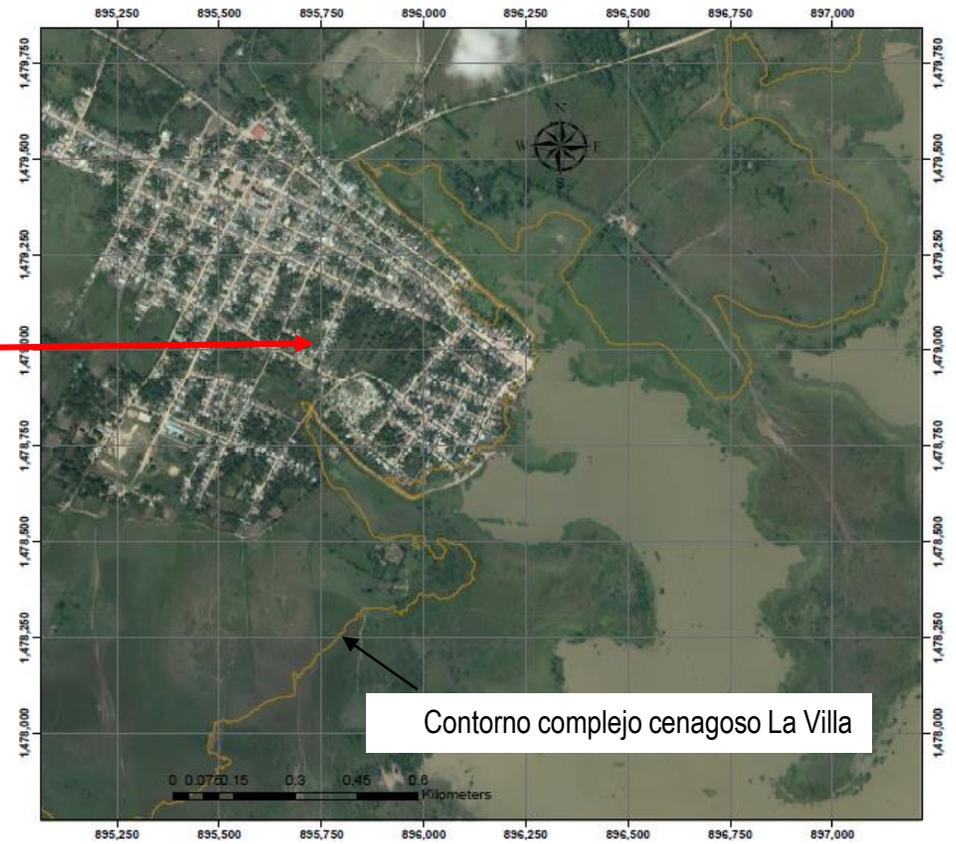


Figura 59. San Benito de Abad (Cabecera municipal). Ortofoto tomada en el año 2013 por el Fondo Adaptación

De la Figura 60 a la Figura 67 se muestra cómo afectan los niveles de agua, es decir, la inundación a la cabecera municipal de San Benito Abad para cada escenario simulado. Estos están organizados siguiendo los mismos criterios expuestos en la sección 3.1.1 Niveles de agua. Para este análisis no se tuvo en cuenta los campos de velocidad, porque solo se buscaba determinar la amenaza por inundación y se dejó de lado cualquier análisis de otro tipo (erosión, socavación de estructuras, etc.).

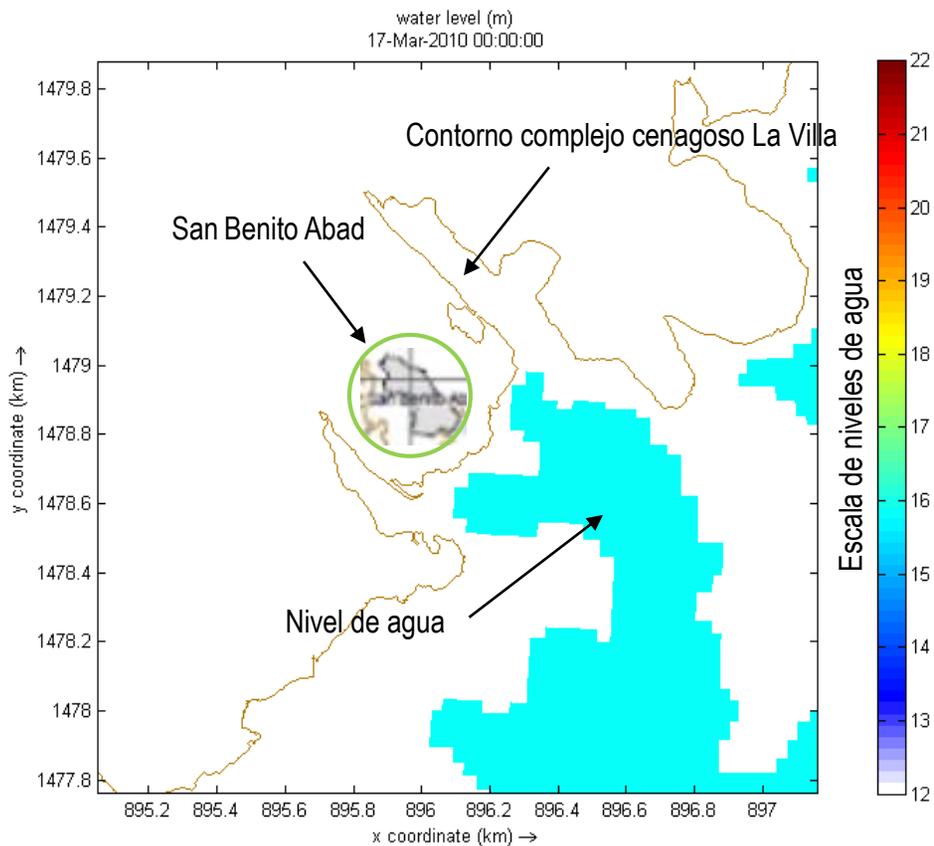


Figura 60. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m³/s. Caño Castillo: 7 m³/s. Arroyo Dorada: 1 m³/s. San Benito de Abad.

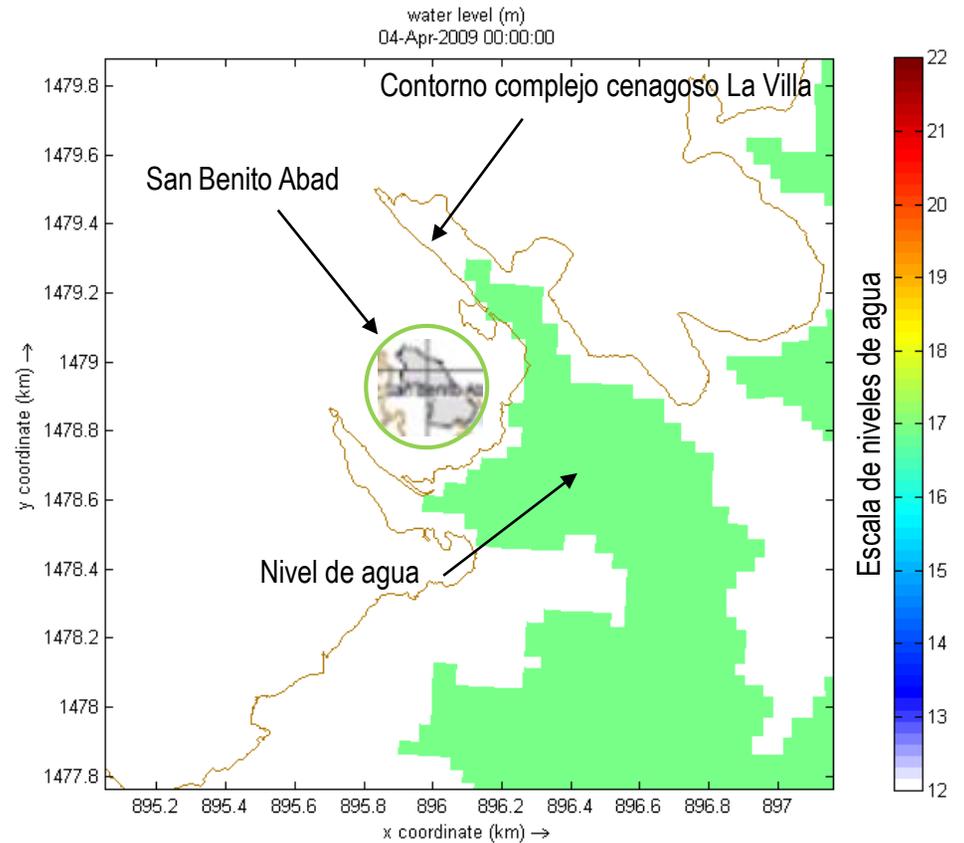


Figura 61. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m³/s. Caño Castillo: 13 m³/s. Arroyo Dorada: 2 m³/s. San Benito de Abad.

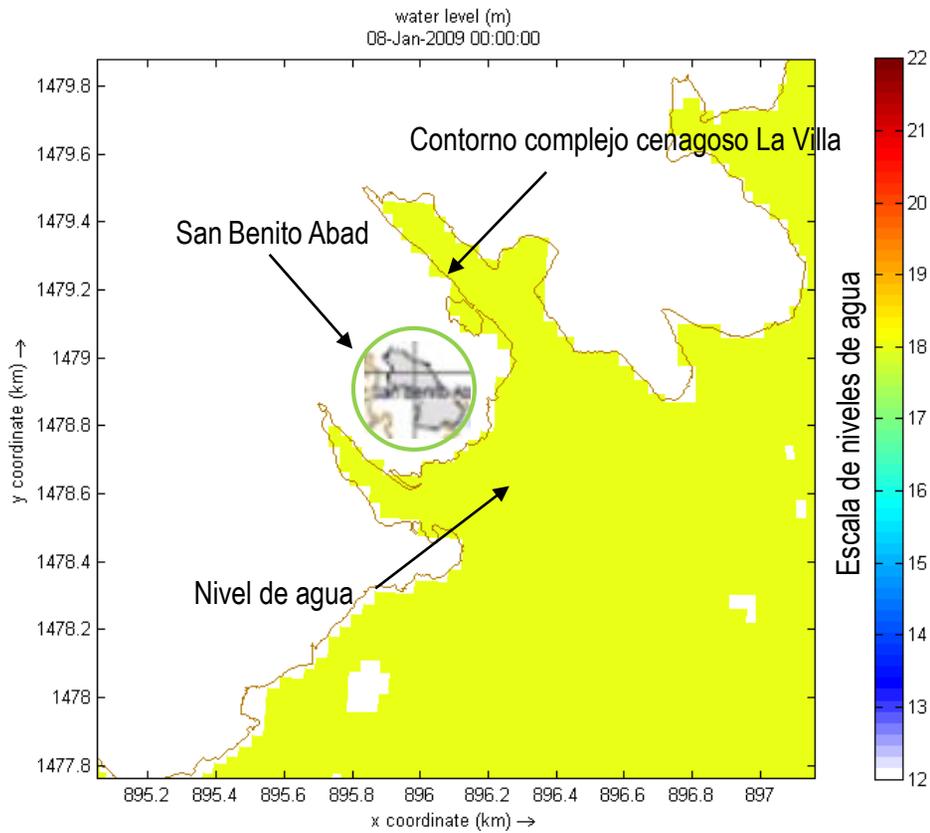


Figura 62. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m³/s, Caño Castillo: 50 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. San Benito de Abad.

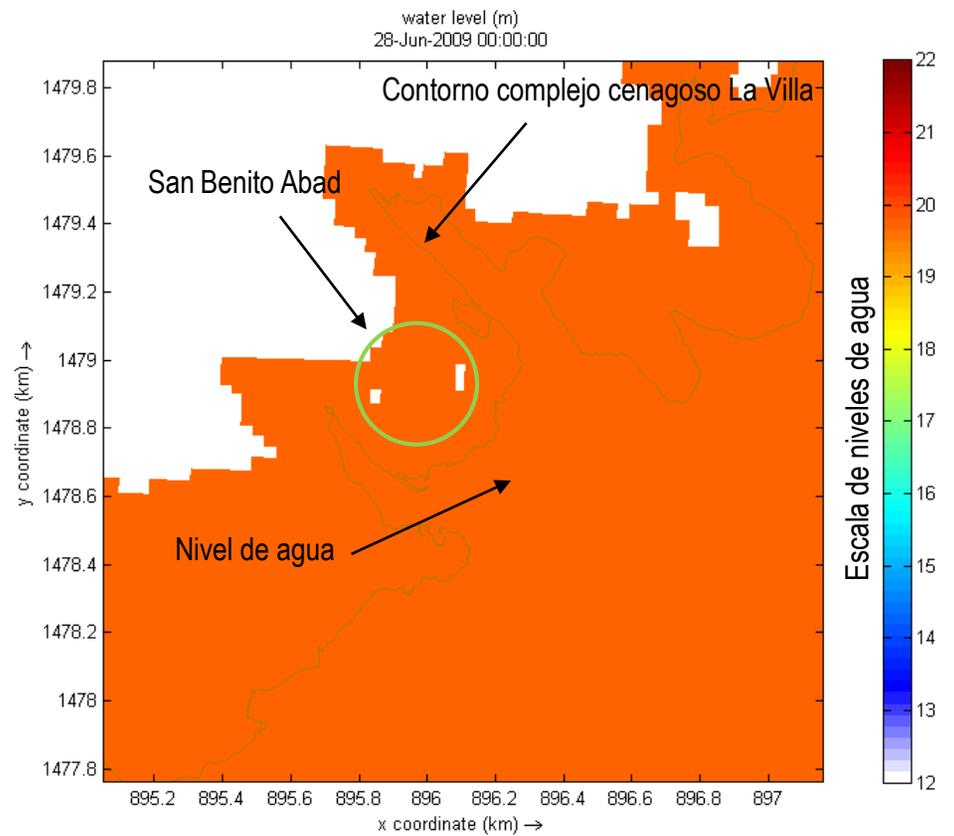


Figura 63. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m³/s, Caño Castillo: 80 m³/s, Arroyo Dorada: 2 m³/s. San Benito de Abad.

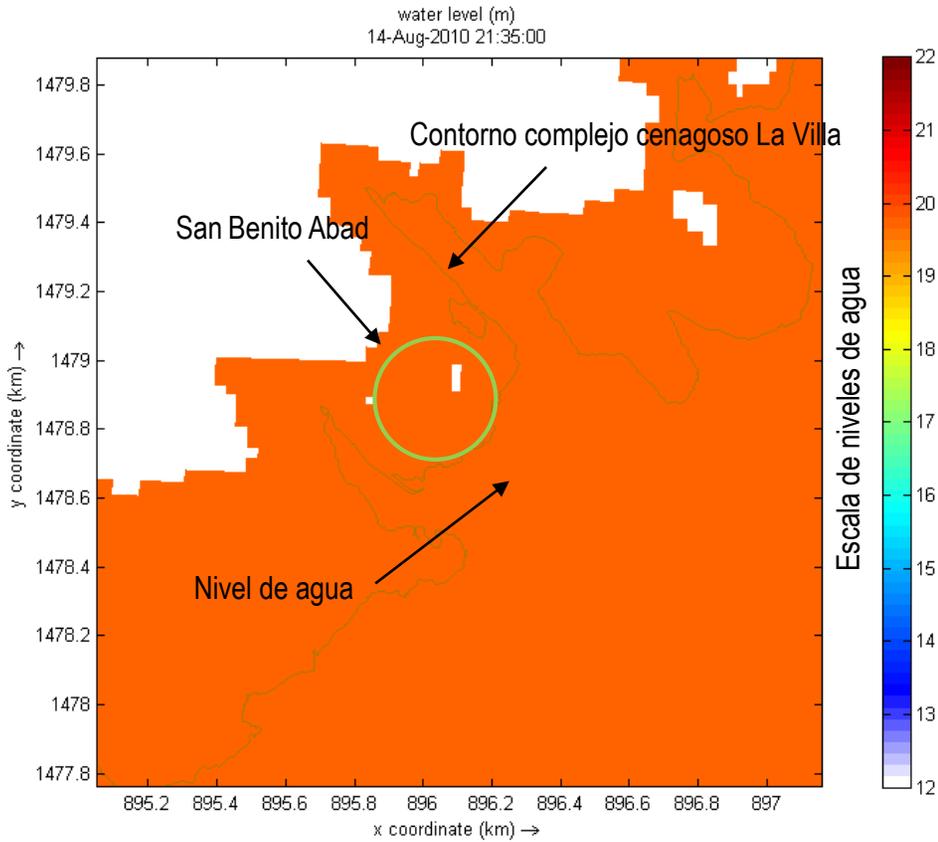


Figura 64. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m³/s, Caño Castillo: 115 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. San Benito de Abad.

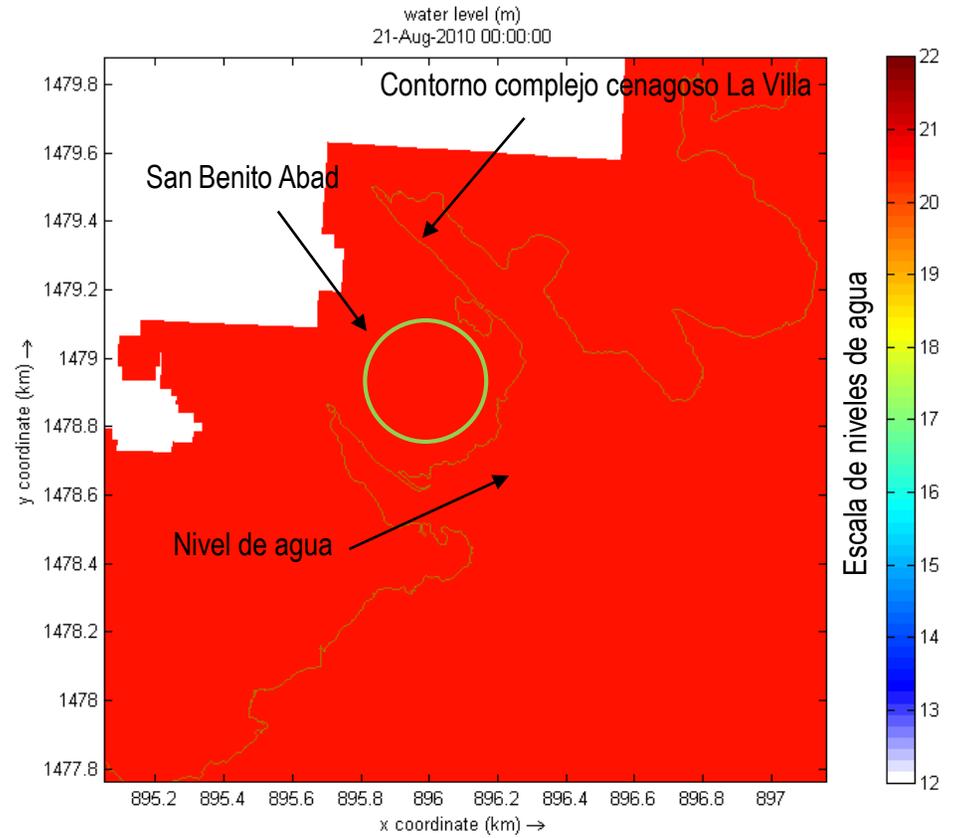


Figura 65. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m³/s, Caño Castillo: 130 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. San Benito de Abad.

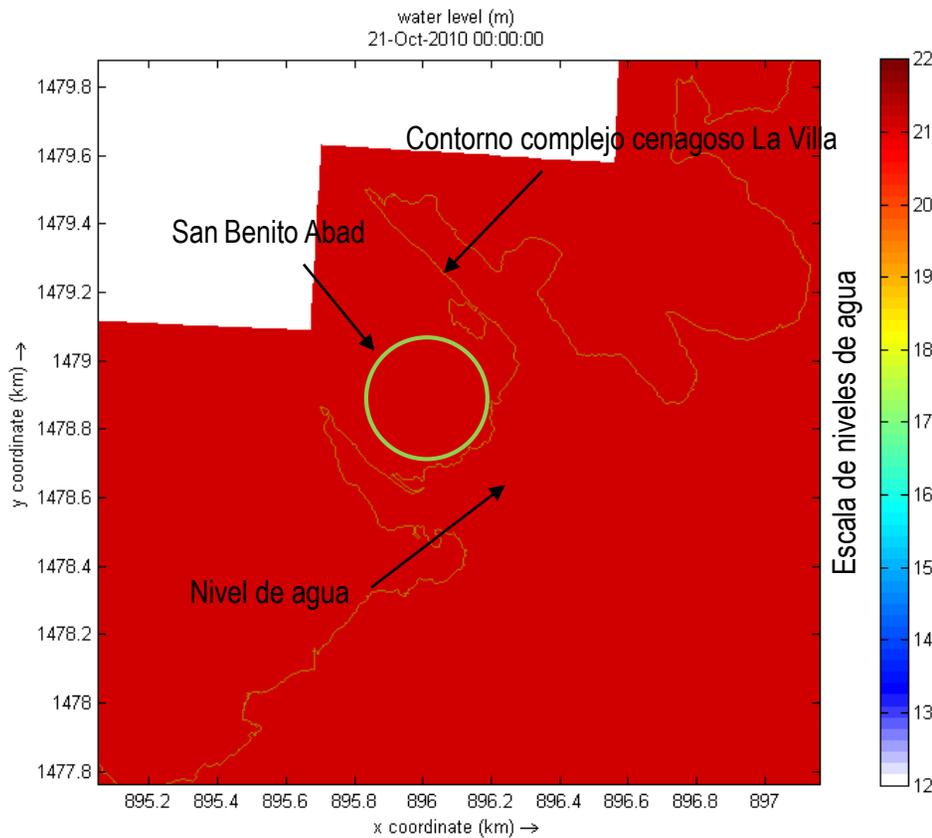


Figura 66. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s. San Benito de Abad.

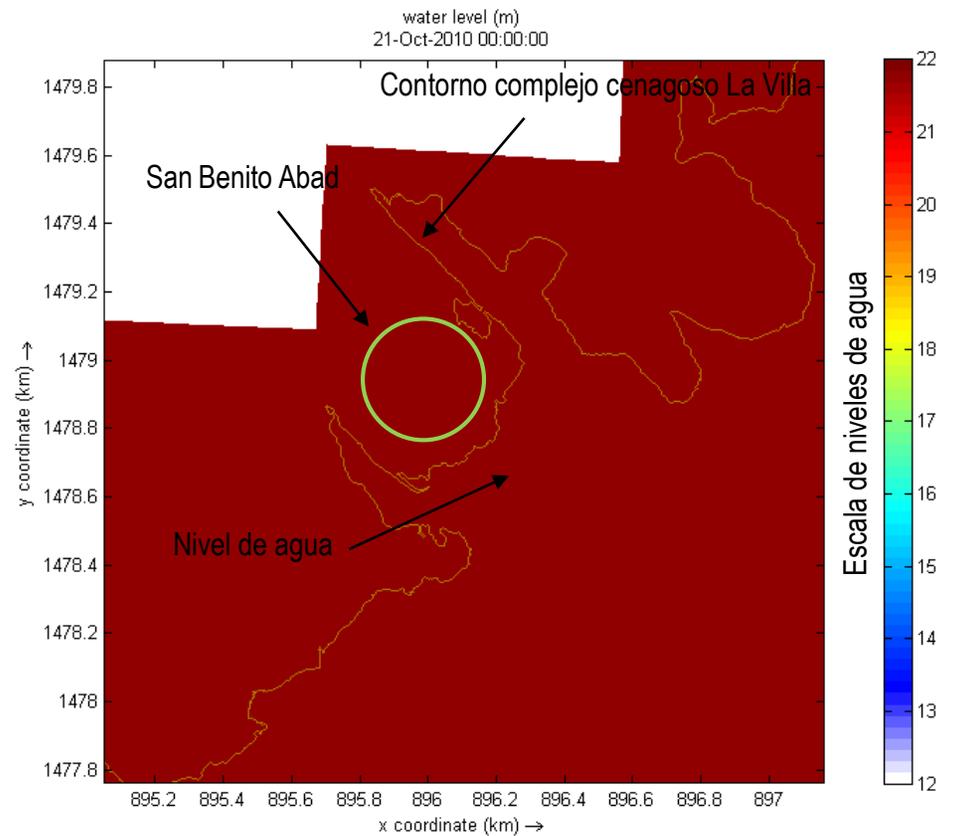
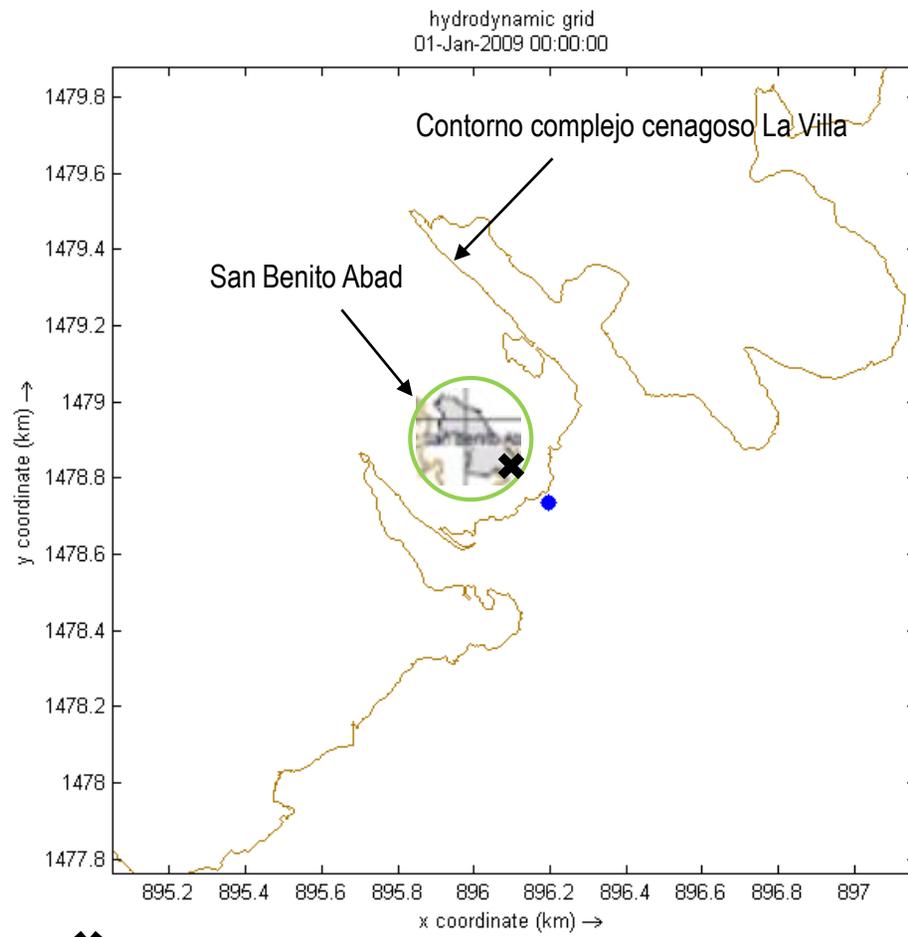


Figura 67. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s. San Benito de Abad.

En la Figura 60, Figura 61 y Figura 62, se muestra que para los Escenarios 4, 2 y 1 (Caudales Mínimos de 2010, Caudales Mínimos 2009 y Caudales de Inicios de 2009) la población no se encuentra amenazada por inundación, es decir, para escenarios en los cuales el caudal del río San Jorge sea inferior a 195 m³/s la población de la cabecera municipal de San Benito Abad se encuentra en un estado de normalidad.

Para escenarios como el 3, 6, 7, 5 y 8 (ver Figura 63 a Figura 67), donde el río San Jorge presenta caudales superiores a 195 m³/s, la población de la cabecera municipal de San Benito Abad es susceptible de inundación, es decir que cuando se presenten caudales superiores a 195 m³/s en el río San Jorge o el nivel de agua a la altura del caserío Barro Blanco sea de 18 m.s.n.m. (ver Anexo 1, Grafica de niveles en el Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)), la población de San Benito Abad está expuesta a una amenaza latente por inundación.

En la Figura 68, se muestra la ubicación del punto de observación del modelo y la del punto donde se midió la huella de inundación; en la Figura 69 se evidencia la marca que dejaron las inundaciones del 2010-2011 en la pared de una casa, en la Figura 70 y la Figura 71 se ve hasta donde llega la inundación, y finalmente en la Figura 72 se muestra la comparación entre el nivel del terreno del punto de observación, hasta donde llegó la inundación para el periodo de la niña 2010-2011 (datos tomados por (IDEAM, 2014b)) y los niveles de agua modelado para diferentes escenarios en la cabecera municipal de San Benito Abad.



- ✕ Ubicación de la medición de la huella de inundación evento La Niña 2010-2011
- Ubicación del punto de observación del modelo

Figura 68. Ubicación del punto de observación modelado y del punto de la medición de la huella de inundación.



La flecha indica el nivel de la huella de inundación

Figura 69. Huella de Inundación 2010-2011
Fuente: (IDEAM, 2014b)



Figura 70. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012 (Vergara, 2016).



Figura 71. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012 (Vergara, 2016).

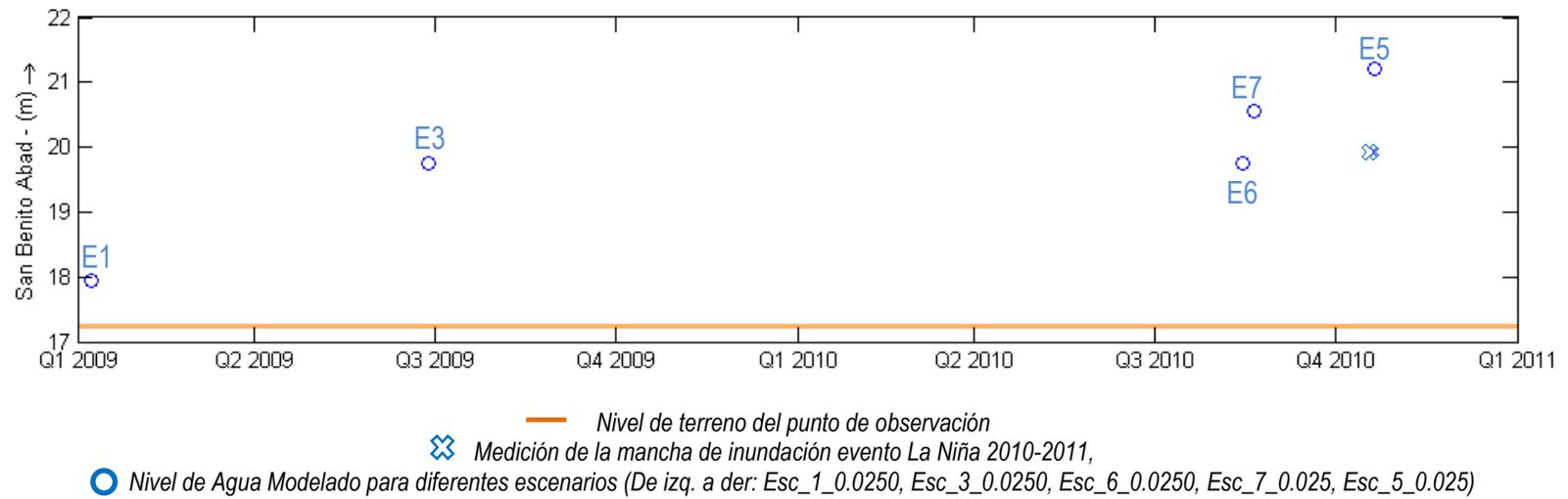


Figura 72. Comparación nivel de terreno - Nivel de agua modelado - Nivel de huella de inundación en la población de San Benito de Abad.

Con la Figura 72, se trata de verificar la exactitud del modelo hidrodinámico desarrollado para el cuerpo cenagoso La Villa. Las marcas directas a comparar son las correspondientes a la huella de inundación y el nivel de agua para el Escenario 5 que corresponde a los caudales máximos de 2010. Se puede observar que existe una discrepancia entre lo modelado (21.21 m.s.n.m.) y lo medido (19.93 m.s.n.m.) de una distancia de 1.28 m. Esta discrepancia se puede explicar por el fenómeno de estancamiento virtual (ver sección 3.1.1 Niveles de agua) debido a la limitación de las fronteras computacionales impuesta en la frontera oriental que no permite el desbordamiento natural hacia ese sector en niveles de agua altos, error que se introduce de manera consiente pero que sin esta conformidad no se podría desarrollar el modelo con los recursos computacionales y de tiempo disponibles para la presente investigación, ya que para poder corregir este error se tendría que modelar toda la ecorregión de La Mojana.

Al comparar la huella de inundación con los resultados para los otros escenarios encontramos que para el Escenario 6 la discrepancia es de 0.17 m y en el Escenario 7 es de 0.62 m. Es decir que si quisiéramos saber de forma más exacta los niveles de inundación para los caudales máximos presentados durante el año 2010 podríamos consultar los resultados del Escenario 6 como una forma de corregir el error por el estancamiento virtual para las condiciones de caudales más altos.

3.4.2 La Jega

La Jega es un corregimiento del municipio de San Benito Abad, ubicado al nor-orienté de la ciénaga de La Villa y está a la orilla al río San Jorge, justo, casi donde este río se conecta con el complejo cenagoso (ver Figura 73 y Figura 74).

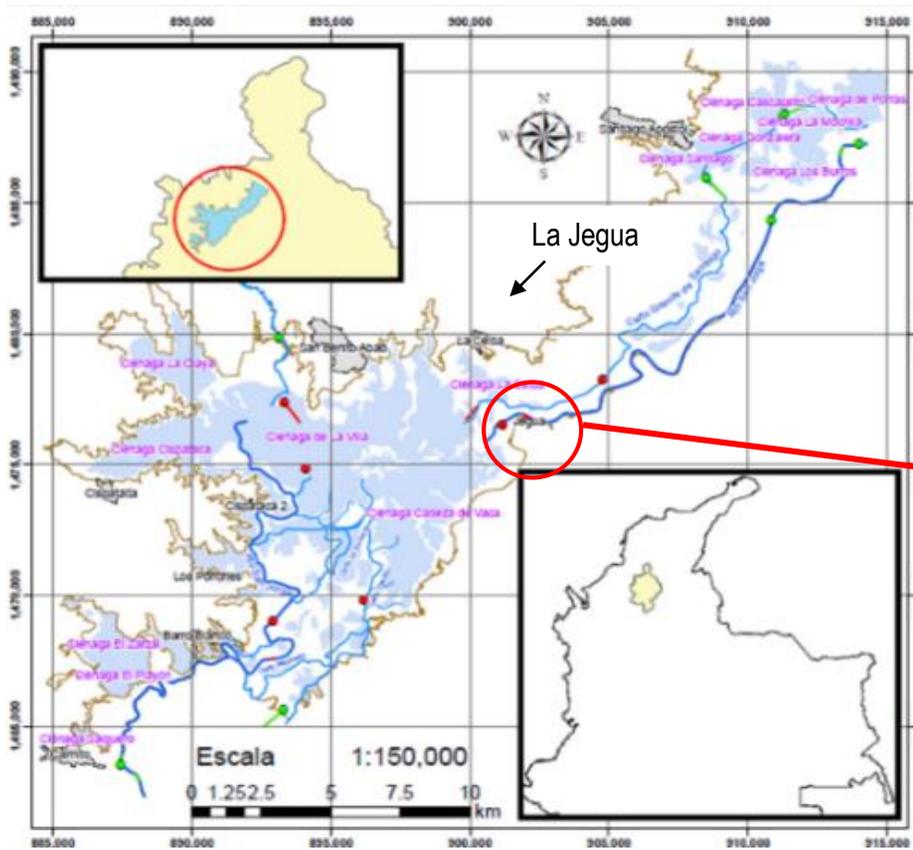


Figura 73. Modelo Conceptual del Sistema. Ubicación de la población de La Jega

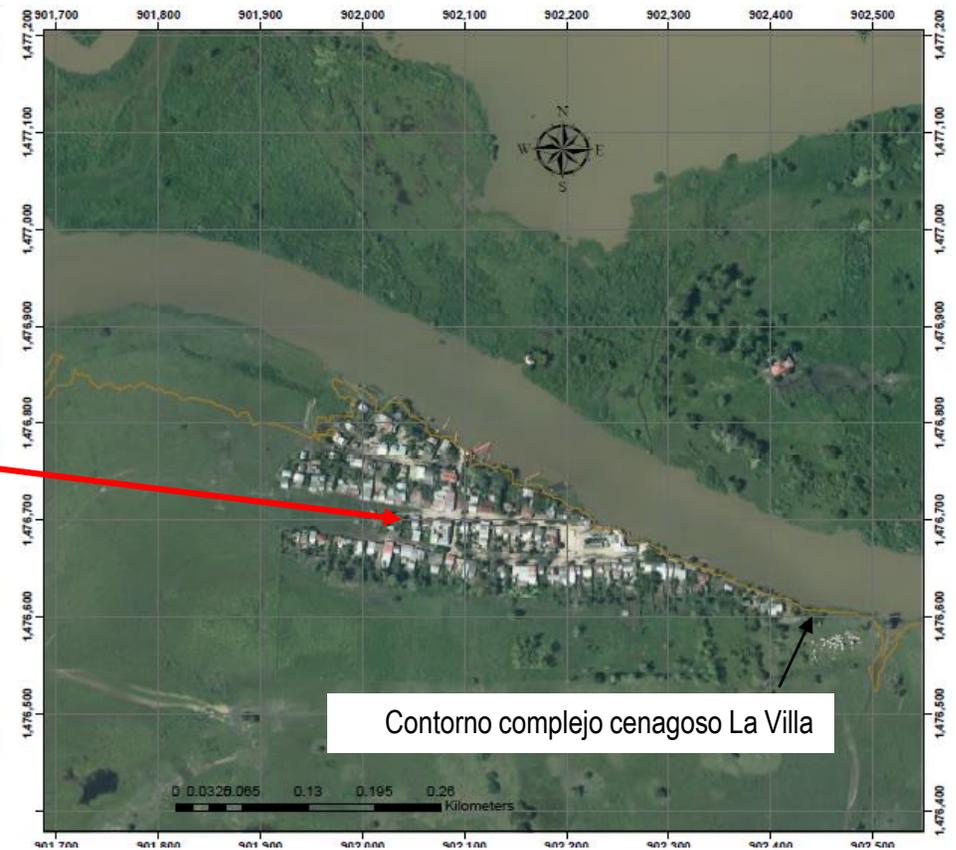


Figura 74. La Jega. Ortofoto tomada en el año 2013 por el Fondo Adaptación

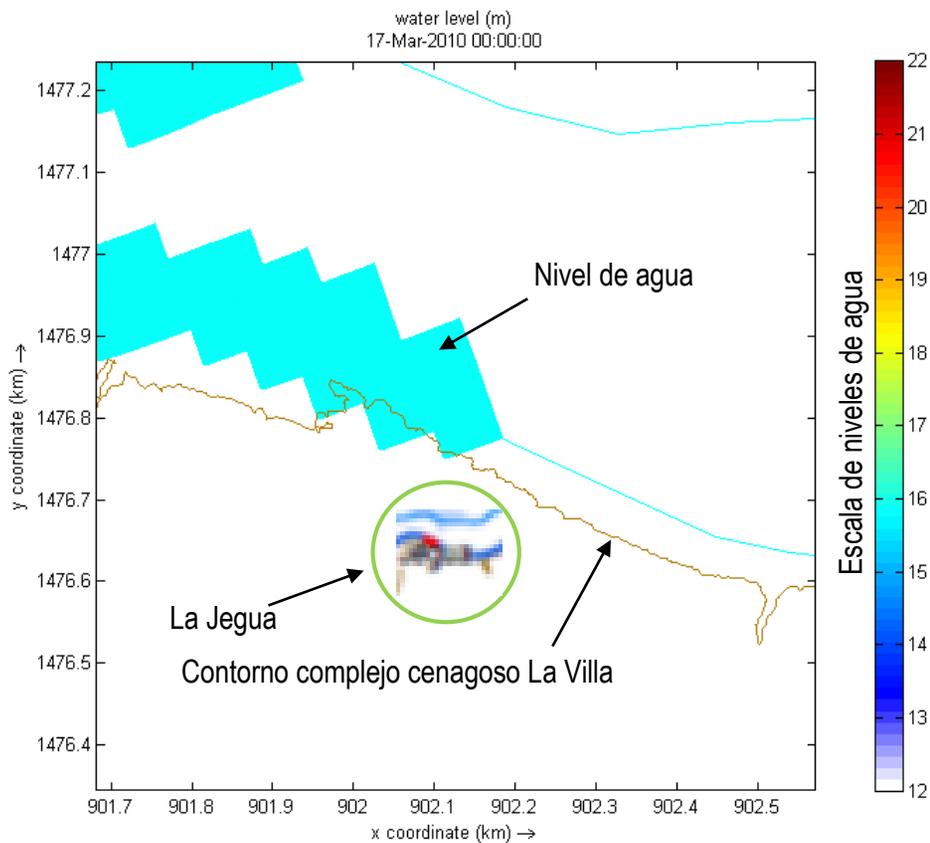


Figura 75. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 4: Caudales Mínimos 2010: Río San Jorge: 60 m³/s. Caño Castillo: 7 m³/s. Arroyo Dorada: 1 m³/s. La Jega.

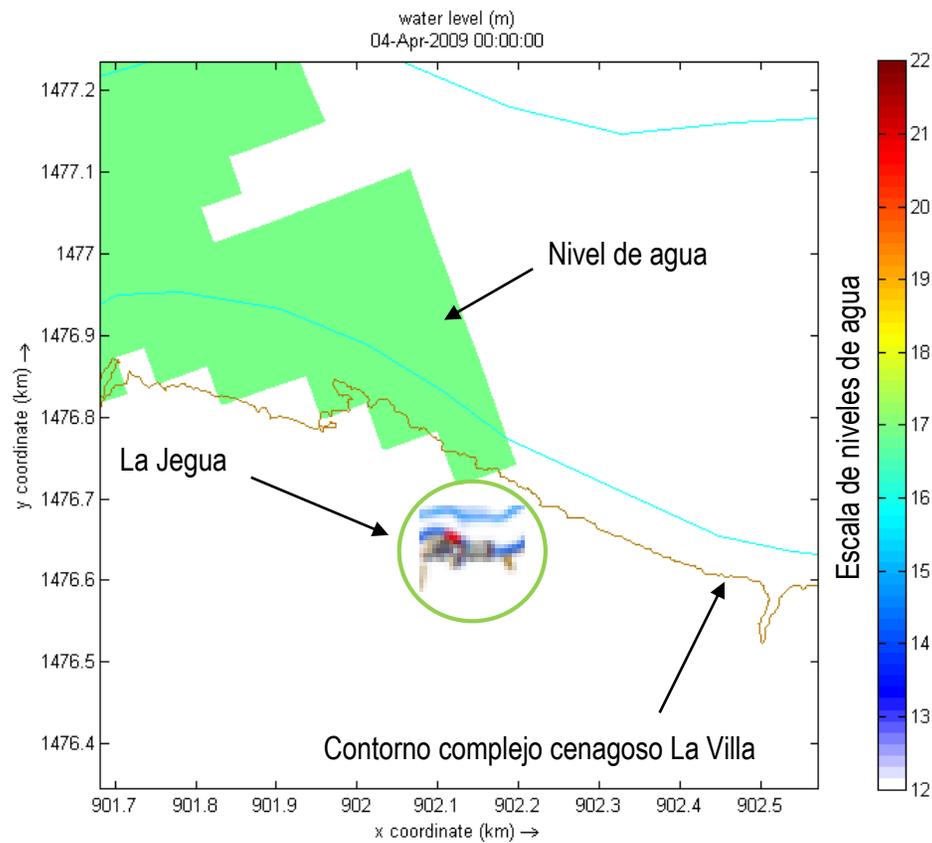


Figura 76. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 2: Caudales Mínimos 2009: Río San Jorge: 100 m³/s. Caño Castillo: 13 m³/s. Arroyo Dorada: 2 m³/s. La Jega..

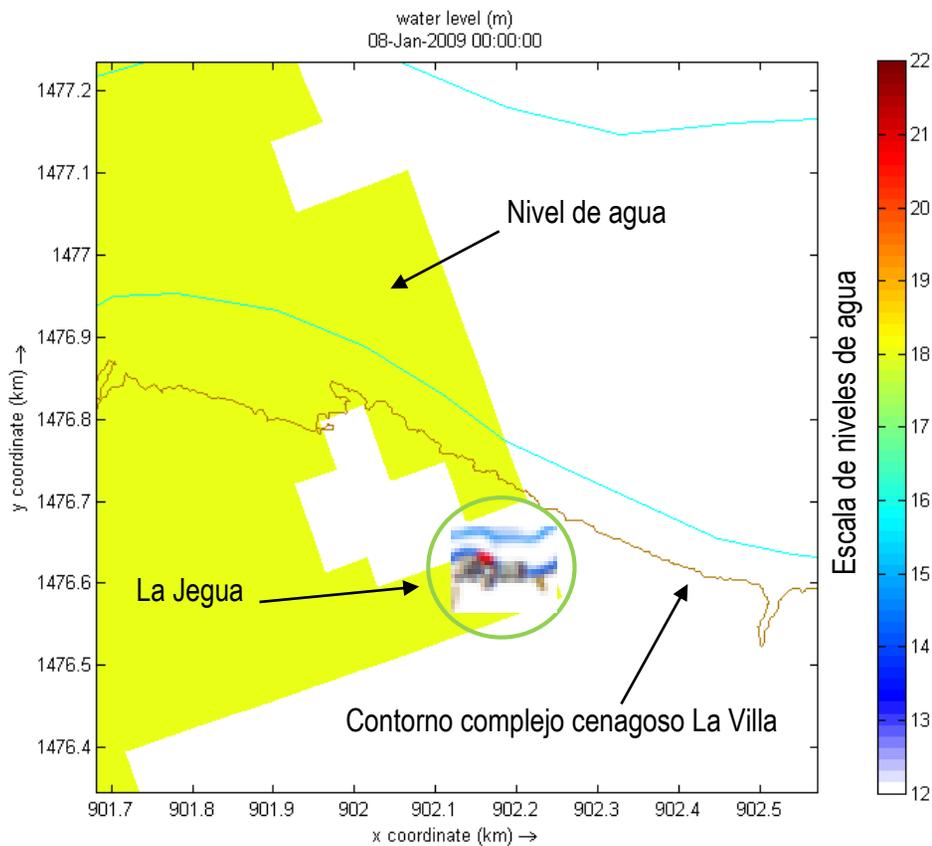


Figura 77. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 1: Caudales Inicio 2009: Río San Jorge: 195 m³/s, Caño Castillo: 50 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. La Jega.

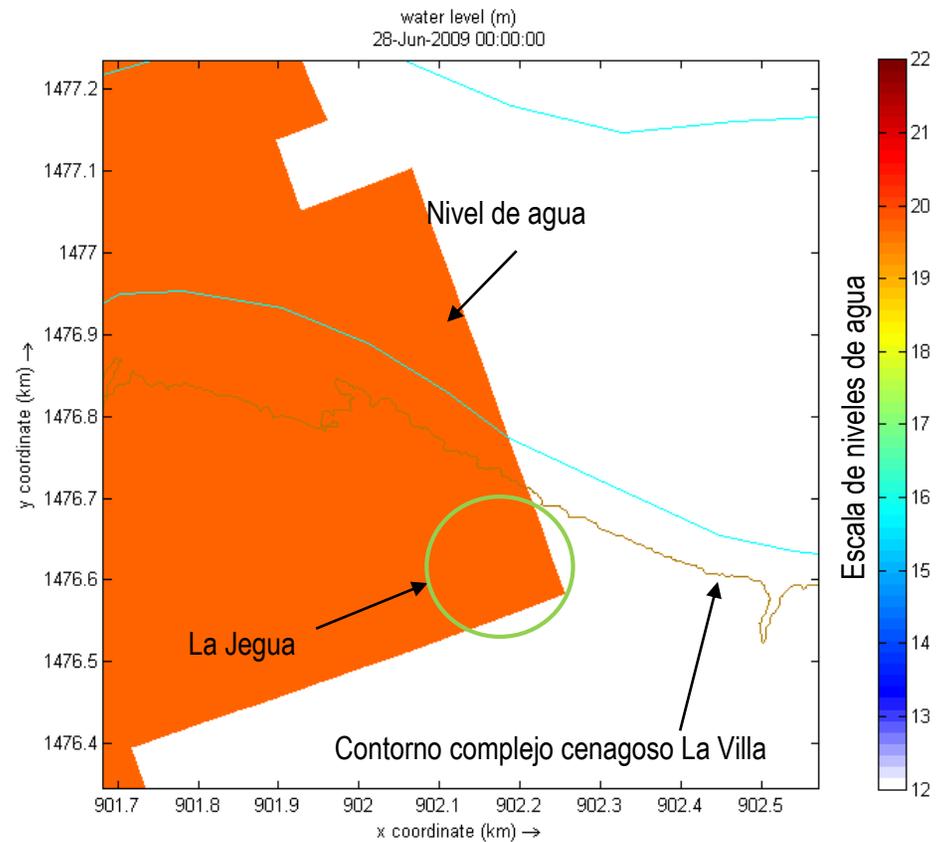


Figura 78. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 3: Caudales Máximos 2009: Río San Jorge: 380 m³/s, Caño Castillo: 80 m³/s, Arroyo Dorada: 2 m³/s. La Jega.

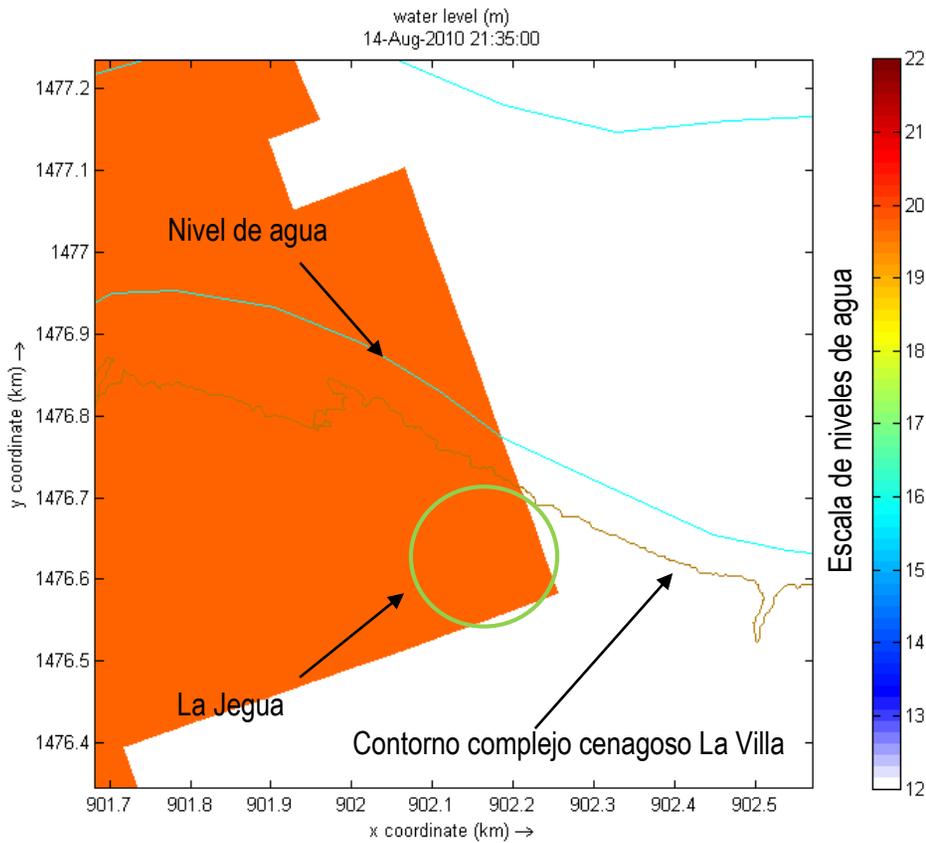


Figura 79. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 6: Caudales Intermedios 2010_1: Río San Jorge: 460 m³/s, Caño Castillo: 115 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. La Jega.

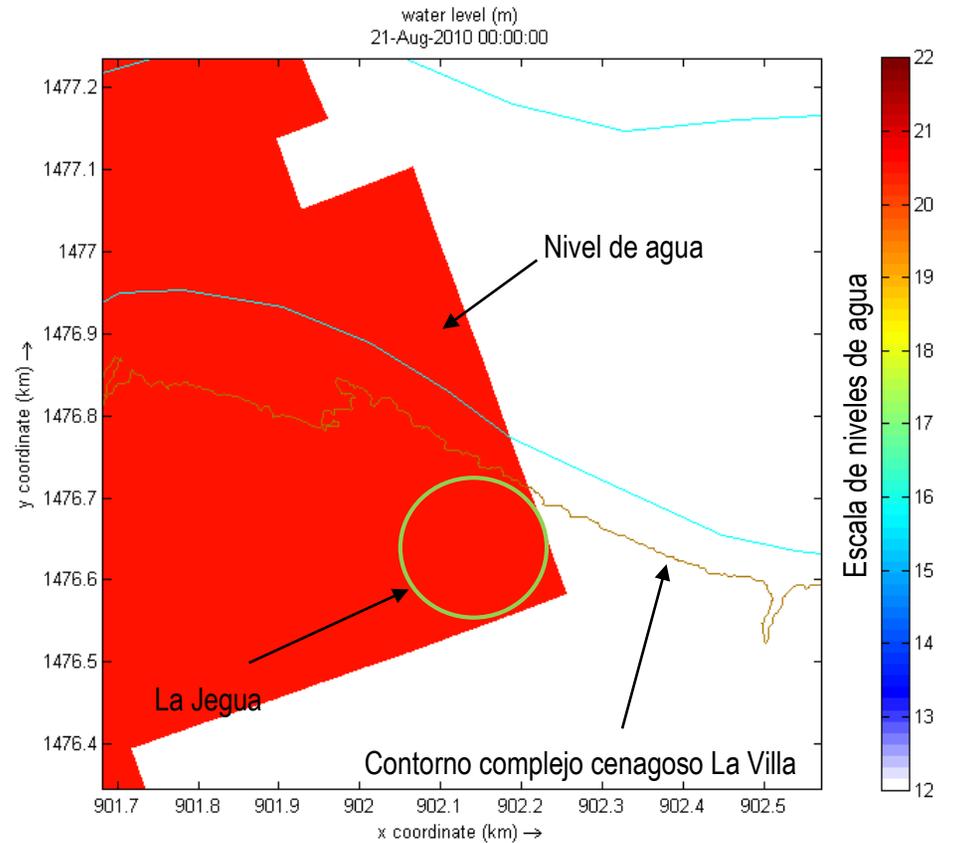


Figura 80. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 7: Caudales Intermedios 2010_2: Río San Jorge: 555 m³/s, Caño Castillo: 130 m³/s, Arroyo Dorada: 20 m³/s. La Jega.

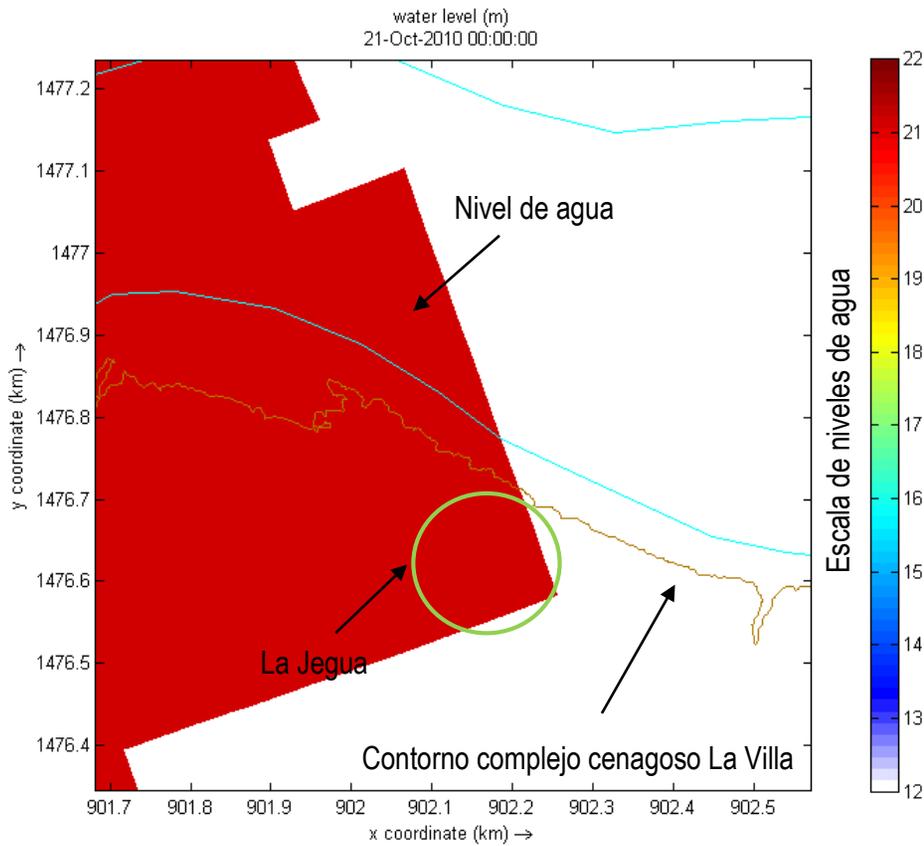


Figura 81. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 5: Caudales Máximos 2010: Río San Jorge: 620 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s. La Jega..

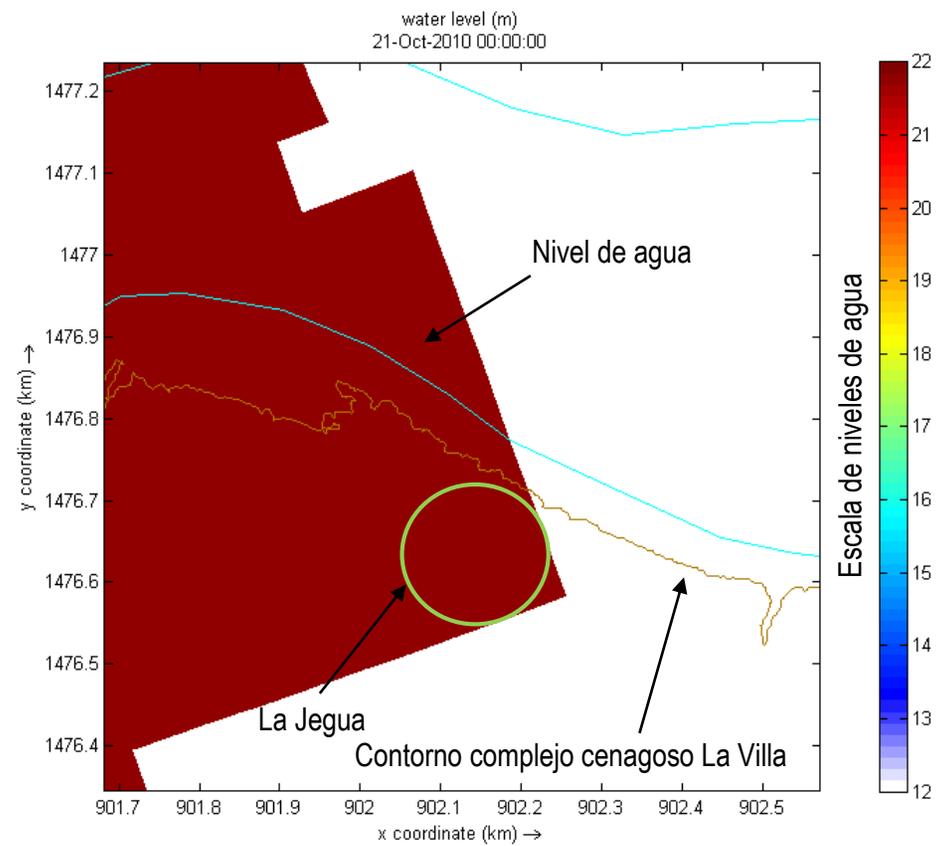


Figura 82. Análisis escenarios críticos, con coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025. Escenario 8: Caudales Extrapolados de 2010 a hipotéticos mayores: Río San Jorge: 710 m³/s, Caño Castillo: 165 m³/s, Arroyo Dorada: 19 m³/s. La Jega.

De la Figura 75 a Figura 82 se muestran todos los escenarios desarrollados para el modelo hidrodinámico de la ciénaga de La Villa y sus interconexiones en forma detallada para la población de La Jegua. Aquí se aprecia que para los Escenarios 4, 2 y 1 (ver Figura 75, Figura 76 y Figura 77), la población no alcanza a inundarse, pero para el caso de los Escenarios 3, 6, 7, 5 y 8 (ver Figura 78 a Figura 82) la población está bajo la amenaza de la inundación. Es decir que los escenarios críticos para La Jegua suceden cuando el caudal por el río San Jorge es superior a los 195 m³/s. Se podría afirmar que esta población está sometida a la misma amenaza por inundación de la cabecera municipal de San Benito Abad.

En la Figura 83 se muestra la ubicación del punto de observación del modelo y la del punto donde se midió la huella de inundación, en la Figura 84 se muestra una fotografía donde se indica visualmente hasta donde llegó la inundación, en Figura 85 se muestra una fotografía del río San Jorge cuando está en niveles bajos y que puede ser correlacionada con la fotografía de la Figura 84, y en la Figura 86 se muestra la comparación entre el nivel del terreno del punto de observación, hasta donde llegó la inundación para el periodo de la niña 2010-2011 (IDEAM, 2014b) y los niveles de agua modelado para diferentes escenarios en la población de La Jegua.

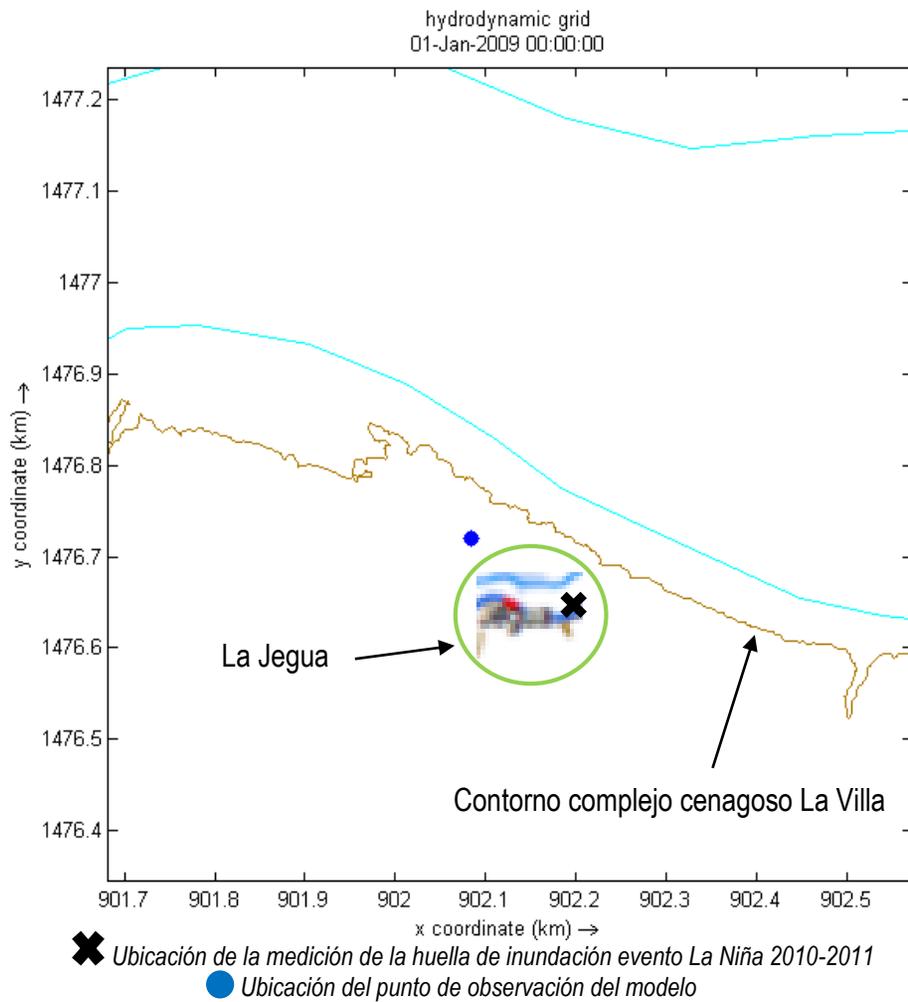


Figura 83. Ubicación del punto de observación modelado y del punto de la medición de la huella de inundación.



La flecha indica el nivel de la huella de inundación

Figura 84. Huella de Inundación 2010-2011
Fuente: (IDEAM, 2014b)



Figura 85. Fotografía tomada por pobladores en época de inundaciones, fecha de entrada al blog electrónico Octubre de 2012. Imagen del río San Jorge y la Iglesia de La Jegua en épocas de niveles de agua bajos.
Fuente: (Vergara, 2016).

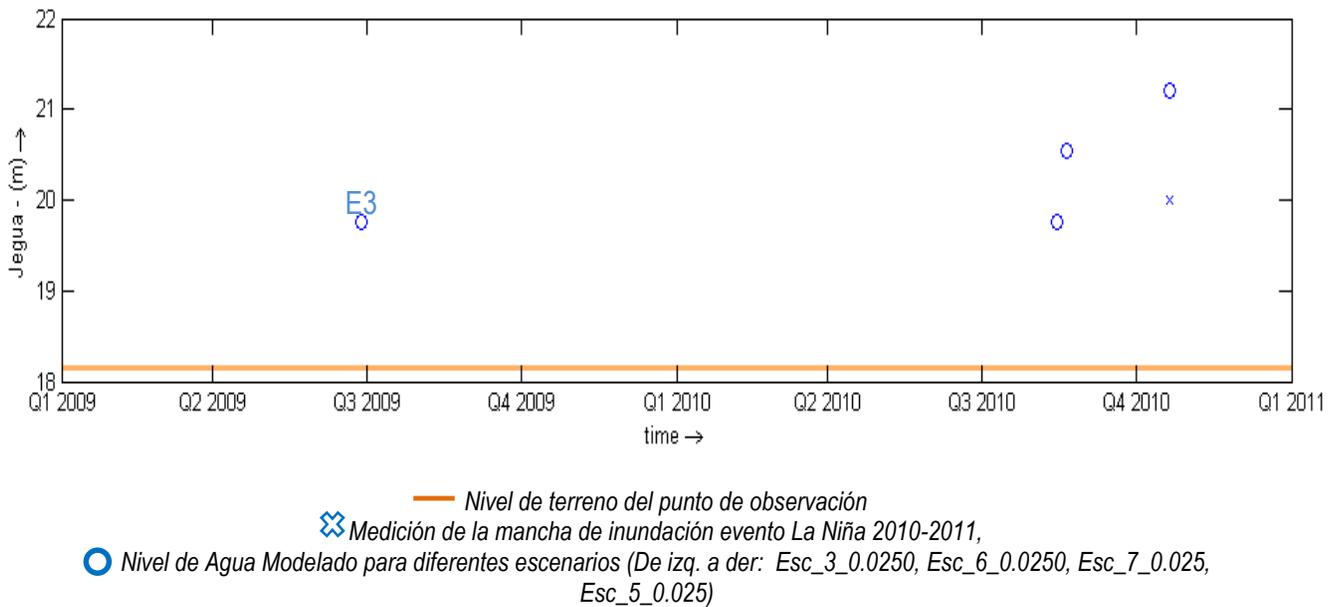


Figura 86. Comparación nivel de terreno - Nivel de agua modelado - Nivel de huella de inundación en la población de La Jegua.

En la Figura 86 se verifica la exactitud del modelo hidrodinámico desarrollado para el cuerpo cenagoso La Villa. Las marcas directas a comparar como en el caso de la cabecera municipal de San Benito Abad son las correspondientes a la huella de inundación y el nivel de agua para el Escenario 5 que desarrolla la modelación para los caudales máximos de 2010. Se puede observar que existe una discrepancia entre lo modelado (21.21 m.s.n.m.) y lo medido (20.01 m.s.n.m.) de una distancia de 1.20 m. Esta discrepancia se considera que también se da debido al fenómeno de estancamiento virtual definido en la sección ver sección 3.1.1 Niveles de agua.

Al comparar la huella de inundación con los resultados para los otros escenarios encontramos que para el Escenario 6 la discrepancia es de 0.25 m, con el Escenario 7 es de 0.54 m. Es decir que si quisiéramos saber de forma más exacta los niveles de inundación para los caudales máximos presentados durante el año 2010 podríamos consultar los resultados del Escenario 6 como una forma de corregir el error por el estancamiento virtual para las condiciones de caudales más altos.

4. DISCUSIÓN

A partir de la presente investigación, surgieron temas de discusión alrededor de las escalas de la modelación hidrodinámica, la necesidad de limitar la zona de estudio y sus consecuencias, debido a los costos computacionales, la eficiencia de los tipos de mallas, las condiciones de frontera, las condiciones iniciales, la validez de la calibración respecto a un modelo calibrado y a mediciones de las huellas del agua en eventos extremos, la eficiencia de utilizar la modelación hidrodinámica como herramienta de toma de decisiones y respecto a otro tipo de modelaciones y la calibración de cuerpos lenticos con un parámetro diferente al coeficiente de rugosidad de Manning.

Se considera que para realizar estudios hidrodinámicos, se debe utilizar una escala de modelación hidrodinámica. La escala de modelación hidrodinámica se definió como una escala intermedia entre la local y la regional, que permite detallar los campos de velocidad y niveles de inundación en extensiones, entre 20 y 100 km en cuerpos loticos y entre 5.000 y 20.000 ha en cuerpos lenticos. La definición de esta escala se dio, debido a que se encontró indispensable definir una escala adecuada para estudios de modelación hidrodinámica, teniendo en cuenta que cuando se intentan realizar modelaciones en extensiones muy grandes, es casi imposible hacerlo en el nivel de detalle requerido, por los tiempos computacionales que se necesitan. Por lo anterior, generalmente, se decide utilizar una malla menos refinada, lo cual indica que la escala de detalle se vuelve cada vez mayor y se pierde el sentido de la modelación hidrodinámica.

Se limitó la zona de estudio, ya que si no se hacía esto, se debía modelar toda La Mojana, lo que requeriría un costo computacional demasiado alto y no se podría llegar a analizar con el mismo detalle en que se hizo en La Villa. Este límite genera ciertos inconvenientes, debido a que se convierte en una barrera impermeable, que hace que el agua no continúe. Por tanto, se debe tener en cuenta que cuando los niveles superan los niveles de desbordamiento natural, la modelación se limita, ya que se estaría generando un efecto de estancamiento virtual, en donde los niveles suben sin límite. De acuerdo a los resultados de la modelación, comparados con los datos medidos por el IDEAM en el 2010 (ver Figura 72 y Figura 86), se evidencia que para el Escenario 6 (caudales intermedios 2010), los niveles modelados son muy cercanos a los niveles medidos, por tanto se considera que hasta el escenario 6 el efecto de estancamiento no afecta la modelación, ya que en los escenarios de mayor caudal se evidencia una diferencia significativa entre los niveles modelados y medidos (ver numeral 3.4). Teniendo en cuenta lo anterior, la separación del cuerpo cenagoso La villa del resto de La Mojana, genera ciertos límites, que sólo se pueden sobrepasar si se modelara toda la ecorregión, sin embargo, para realizar este análisis se debe considerar utilizar un modelo computacional que resuelva mallas irregulares, ya que éstas requieren de un menor costo computacional y contar con herramientas computacionales de última generación, o considerar la posibilidad de utilizar otro tipo de modelación que defina manchas de inundación con un costo computacional menor y con resultados satisfactorios dependiendo de la finalidad de la investigación; ya que, por ejemplo, si en el presente estudio solo se hubiera tomado una malla con mayor resolución a la que se utilizó, el tiempo de computo hubiera sido

de 30 días para 5 días de simulación, en computadores con procesadores i7 de tercera generación, memoria Ram de 6 GB, algo demasiado costoso computacionalmente para un proyecto de éste tipo.

En las mallas regulares no se pueden refinar lugares puntuales de interés adecuadamente, debido a que, por ejemplo cuando se requirió refinar la entrada del río San Jorge, también se refinaba la ciénaga en la parte central (lugar que no lo requería), por tanto cada vez que se refinaba en algún lugar específico, también se refinaba la malla en otro lugar en el cual no se requería; este problema generó en algunos casos que se aumentara la relación de aspecto, sin embargo esta relación se mantuvo en un rango tolerable que el código establece. Otro inconveniente que se tiene cuando no se puede refinar puntualmente una malla, es que, como se refinan lugares que no se necesitan, el costo computacional se incrementa innecesariamente, por esto se recomienda utilizar códigos computacionales que resuelvan mallas irregulares (volúmenes finitos), las cuales se pueden refinar puntualmente sin afectar zonas que no se necesite refinamiento.

La definición de la condición de frontera de salida, en el código computacional Delft 3D, tiene la limitante, que todas las opciones que se pueden utilizar, generan una restricción, debido a que se tiene que establecer un nivel a la salida (siempre debe tener un valor); no se cuenta con una condición de salida libre, es decir, que solo dependa de las condiciones iniciales y del tránsito del flujo en el cuerpo de agua. Esta situación se manejó utilizando la curva Q-H, debido a que, con este tipo de condición, no se forzaba el modelo a cumplir un nivel específico a la salida y los niveles que se generaban se encontraban dentro de un rango de niveles establecidos por la estación virtual utilizada del modelo de Sobek 1D calibrado.

Otra de las limitantes encontradas, fue al establecer la condición inicial, debido a que, para que el código reconozca el ingreso de la masa de agua, el nivel inicial debe ser menor al nivel de fondo de las fronteras de entrada, por tanto, se tuvo que recurrir a realizar un ajuste manual, disminuyendo el nivel de fondo de las fronteras de entrada. Con este ajuste se pudieron realizar las simulaciones e identificar el comportamiento de llenado de la ciénaga. Cabe aclarar que el ajuste no generó afectaciones en la hidrodinámica general de la ciénaga, ya que, tan sólo se forzó el primer instante de la corrida, es decir en un nivel inicial o mínimo. Si no se hubiera realizado éste ajuste, no se hubiera podido llegar a percibir la forma de llenado del cuerpo cenagoso, y por tanto no se hubiera podido encontrar uno de los resultados más dicientes, como es lo que ocurre cuando en la entrada del río San Jorge al cuerpo cenagoso pasa de comportarse de un cuerpo lotico a lentic, es decir el comportamiento tipo desembocadura (ver 3.2 Análisis de sensibilidad)

Como anteriormente se aclaró, la presente modelación se calibró con un modelo hidrodinámico calibrado en una dimensión de La Mojana. Este modelo de Sobek 1D, se calibró con información medida en estaciones hidroclimatológicas, por tanto, se podría considerar que la calibración del modelo de La Villa con el modelo de La Mojana, podría ser una buena aproximación a la realidad. Sin embargo, no es un secreto que en muchas ocasiones la información de las estaciones es alterada, lo cual indica que se debe considerar un margen de error por estas malas mediciones. Para complementar la investigación y tener una herramienta más de calibración, se verificaron los niveles

medidos de las huellas del agua en las poblaciones San Benito de Abad y La Jegua, con los niveles modelados, encontrando una buena aproximación. Por tanto, se considera que los resultados obtenidos son una buena herramienta para análisis de alertas tempranas, por ahora, para estas dos poblaciones.

Para obtener un modelo hidrodinámico eficiente, se deben tener en cuenta principalmente la escala de modelación hidrodinámica, debido a que, si se sale de ésta, los modelos se vuelven inmanejables computacionalmente y posiblemente los resultados no van a ser muy diferentes a modelaciones con menor costo computacional, debido a que se pierde el detalle de la modelación hidrodinámica.

Para la comparación de modelos hidrodinámicos con otro tipo de modelos, se debe tratar bajo una investigación de comparación, para así definir los campos de acción de cada uno y evitar costos muy altos.

Del análisis de sensibilidad se deriva la conclusión, que el coeficiente de rugosidad de Manning no influye significativamente en las condiciones hidrodinámicas de los cuerpos lenticos, y del análisis de las ecuaciones de gobierno se tiene que este es el parámetro más conveniente para realizar la calibración de estos modelos, entonces surge la interrogante ¿Cómo se llegaría a calibrar modelos hidrodinámicos de cuerpos lenticos, cuando el coeficiente de rugosidad de Manning no es adecuado para hacerlo y que los cuerpos como las ciénagas por lo regular presentan mezclas homogéneas?

5. CONCLUSIONES

A continuación, se presentarán conclusiones generales, recomendaciones y trabajo futuro que dejó la presente investigación.

5.1 Conclusiones Generales

- El modelo desarrollado permite representar las condiciones hidrodinámicas de la ciénaga de La Villa y sus interconexiones principales para escenarios donde el caudal de entrada del río San Jorge sea hasta de $195 \text{ m}^3/\text{s}$ con un buen ajuste a las condiciones imperantes en la realidad.
- Para caudales mayores de $195 \text{ m}^3/\text{s}$ el modelo permite representar las condiciones hidrodinámicas de la ciénaga de La Villa y sus interconexiones principales con un grado de error tolerable para la toma de decisiones. Este error se debe a que los niveles de agua modelados alcanzan a tocar el dominio computacional en la frontera oriental, vecina a la ciénaga de Los Patos y Los Palos. Para poder corregir este error se haría necesario ampliar el dominio computacional a toda la ecorregión de La Mojana.
- El análisis de sensibilidad del modelo desarrollado indica que el sistema es poco susceptible al coeficiente de rugosidad de Manning. Lo que se aprecia es que la hidrodinámica del complejo cenagoso está principalmente influenciada por las condiciones de frontera, es decir por los caudales que aporta el río San Jorge principalmente. Para continuar con las modelaciones de este cuerpo cenagoso los autores recomiendan usar un coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025 distribuido en el espacio de forma uniforme.
- El análisis de los escenarios de inundación muestran que la condición crítica para la cabecera municipal de San Benito Abad y el corregimiento La Jegua, se presenta cuando se llega al estado estacionario con un caudal de $195 \text{ m}^3/\text{s}$ del río San Jorge. Es decir que para escenarios donde el río San Jorge presente un caudal superior a $195 \text{ m}^3/\text{s}$ estas poblaciones se encuentra con amenaza latente de inundación.
- Escoger la malla adecuada, tuvo un análisis específico, debido a que se tenía que definir una malla con la que se pudiera modelar el cuerpo cenagoso con costos computacionales manejables y que se obtuvieran resultados coherentes. Se inició con una malla irregular, en la cual se podían definir separadamente los ríos de las ciénagas, y luego unir las mallas para obtener una gran malla con detalles puntuales; sin embargo este tipo de malla no lo pudo solucionar el código computacional, debido a que el código resuelve el método de diferencia

finitas y las malla irregulares se solucionan con el método de volúmenes finitos. Por lo anterior se recurrió a realizar una malla regular. Se realizaron diferentes mallas, iniciando con mallas bastante gruesas, la cuales se iban refinando hasta que se encontró una malla en la cual se pudiera ver en detalle la dinámica del río San Jorge, se obtuvieran resultados coherentes y con tiempos computacionales óptimos. El test de malla es fundamental para lograr buenos resultados en la modelación hidrodinámica, por lo que todo proyecto de este tipo debería contemplarlo.

- Inicialmente, se consideró en involucrar el coeficiente de rugosidad de Manning variable espacialmente en el todo el cuerpo cenagoso, sin embargo cuando se empezaron a revisar los primeros resultados con diferentes coeficientes de rugosidad (0.025, 0.0338, 0.0425, 0.0512 y 0.060) y la diferencia entre las corridas era tan pequeña, se consideró innecesario utilizar el coeficiente de rugosidad variable, teniendo en cuenta que, los tiempos computacionales podrían aumentar y no se iban a encontrar resultados diferentes a los ya obtenidos.
- En los resultados del análisis de sensibilidad, se evidenció que el cambio del coeficiente de rugosidad de Manning entre 0.025 y 0.060, (valores tomados de la recomendación de (Chow, 1985)) no afecta significativamente los niveles y las velocidades del cuerpo cenagoso, debido a que como es un cuerpo de agua muy extenso, el cambio del valor de la resistencia hidráulica entre el mínimo y máximo recomendados por (Chow, 1985) para éste tipo de cuerpos de agua no hace mayor incidencia. Teniendo en cuenta lo anterior, para la calibración solo se utilizaron los escenarios con el coeficiente de rugosidad de Manning de 0.025, considerando que con éste valor se estarían teniendo en cuenta las mayores velocidades.
- Inicialmente, se establecieron cinco escenarios de simulación con base en los caudales de las condiciones de frontera de entrada, sin embargo, revisando los resultados, se estimó conveniente agregar tres escenarios más para rellenar espacios entre los escenarios de caudales máximos del año 2009 (escenario 3) y del año 2010 (escenario 5), y así revisar el comportamiento para diferentes valores de caudales máximos. Para la definición del tipo de condición de frontera de salida, se realizaron revisiones con diferentes tipos de condiciones, entre estos, con niveles, curvas Q-H y Neumann (DELTARES, 2014). A partir de estas revisiones se encontró que el tipo de condición que se comportaba mejor en el presente análisis, era la curva Q-H, debido a que con este tipo de condición no se forzaba el modelo a cumplir un nivel específico a la salida y los niveles que se generan, estarían en el rango de los datos de los niveles de la estación virtual.
- Se definió la escala de modelación hidrodinámica como una escala intermedia entre la local y la regional, que permite detallar los campos de velocidad y niveles de inundación en

extensiones entre 20 y 100 km en cuerpos loticos y entre 5.000 y 20.000 ha en cuerpos lenticos.

5.2 Trabajo futuro

- Para una mejor representación de las condiciones hidrodinámicas del cuerpo cenagoso, es necesario ampliar el dominio computacional mínimo a las fronteras inicialmente planteadas, es decir desde la población de Caimito hasta Santiago Apóstol. Asimismo, generar un modelo en estado transitorio mínimo para el periodo 2009 – 2012 y realizar una prueba de bondad de ajuste, ya que se tendría una serie de datos tanto modelados como medidos. Este modelo debería ser desarrollado y calibrado con mediciones de campos de velocidades, niveles (análisis multitemporal de manchas de inundación) y caudales.
- Sería de amplio interés que el modelo llegase a contemplar mallas muy finas en las poblaciones, para analizar con más detalle escenarios críticos de inundación urbana.

5.3 Recomendaciones

- Para realizar un análisis más eficiente computacionalmente, se recomienda explorar otros códigos computacionales, como por ejemplo software que aborde la solución de las ecuaciones de gobierno a través de la técnica de volúmenes finitos.
- Gestionar recursos computacionales más robustos a los que se utilizaron (Computadores con procesadores i7 de tercera generación, memoria Ram de 6 GB).

6. BIBLIOGRAFÍA

- Arcos Espinosa, G., Jiménez Hernández, S. B., & Zavala Guerrero, L. Á. (2012). Modelación hidráulica y de calidad del agua de la laguna del Carpintero. *Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica*.
- Chapra, S. C., & Canale, R. P. (2007). *Métodos numéricos para ingenieros* (Quinta ed.). México: McGraw-Hill Interamericana.
- Chow, V. T. (1985). *Hidráulica de los canales abiertos* (Tercera ed.). México: Editorial Diana México.
- CONSEJO NACIONAL DE POLÍTICA ECONÓMICA Y SOCIAL, DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2006). *Documento Conpes 3421: Estrategias para la reactivación económica y social de la región de La Mojana*. Bogotá.
- DANE. (14 de 05 de 2016). DANE. Obtenido de <http://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-demografia/censos>
- DELTAIRES. (2014). Delft3D. Flow. En Deltares, *Delft3D. Hydro-Morphodynamics*.
- DELTAIRES. (27 de Abril de 2016). Deltares. Obtenido de Deltares: <https://www.deltares.nl/en/software/sobek/>
- DELTAIRES. (2 de Mayo de 2016). Deltares. Obtenido de Deltares: <https://www.deltares.nl/en/about-us/>
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2012a). *Plan integral de ordenamiento ambiental y desarrollo territorial de la región La Mojana. Documento de caracterización*. Bogotá.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN. (2012b). *Documento síntesis de los avances logrados en el proceso de formulación del Plan integral de ordenamiento ambiental y desarrollo territorial de La Mojana*. Bogotá.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, DIRECCIÓN DE PREVENCIÓN DE DESASTRES, PROGRAMA DE LAS NACIONES UNIDAS PARA EL DESARROLLO . (s.f.). *Plan de acciones regionales prioritarias para el desarrollo sustentable de La Mojana. Articulación de iniciativas regionales para estructurar áreas de desarrollo territorial*.
- Díaz-Granados, M., Camacho, L. A., & Alexander, M. (2001). Modelación de balances hídricos de ciénagas fluviales y costeras colombianas. *Ingeniería - Universidad de los Andes*(13), 12-20.
- Escobar Vargas, J. A., Diamessis, P. J., & Giraldo, F. X. (2012). High-order discontinuous element-based schemes for the inviscid shallow water equations spectral: Multidomain penalty and discontinuous Galerkin methods. *Applied Mathematics and Computation*, 4825-4848.

- Fe Marqués, J. M. (2005). *Tesis Doctoral: Aplicación del método de volúmenes finitos a la resolución numérica de las ecuaciones de aguas someras con incorporación de los esfuerzos debidos a la turbulencia*. Coruña.
- Fernandez Nieto, E. D. (2003). *Tesis doctoral: Aproximación numérica de leyes de conservación hiperbólicas no homogéneas. Aplicación a las ecuaciones de aguas someras*. Sevilla.
- Fierro, A. (15 de Mayo de 2016). *Jegua Sucre* - Youtube. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=pPIOyjnYEQ>
- FONDO ADAPTACIÓN. (2013). *Modelación hidrodinámica de La Mojana. Informe del procesamiento de la información secundaria*. Bogotá.
- FONDO ADAPTACIÓN. (2013a). *Estudios previos: Contratación de los servicios profesionales del especialista en geomática como apoyo técnico experto a la subgerencia de gestión del riesgo*. Bogotá.
- FONDO ADAPTACIÓN. (26 de Abril de 2016). *Fondo Adaptación*. Obtenido de Fondo Adaptación: <http://sitio.fondoadaptacion.gov.co/index.php/el-fondo/quienes-somos>
- González-López, R., & Ramirez León, H. (2011). Modelación numérica de la hidrodinámica, del oxígeno disuelto y la demanda bioquímica de oxígeno en sistemas con vegetación. *Hidrobiológica* 2011, 21 (2), 147-158.
- IDEAM. (2014a). *Informe de aforos liquidos en secciones priorizadas de la región de La Mojana*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (2014b). *Informe de huellas de crecientes en zonas priorizadas en la región de La Mojana*. Bogotá D.C.
- Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2010). *Fluid Mechanics* (Cuarta ed.). Elseiver Inc.
- López López, J., Álvarez-Ramirez, J., & Hernández López, J. L. (2009). Solución numérica del modelo de Saint Venant vía volúmenes finitos. *Revista de Ciencias Básicas UJAT*, 8, 34-53.
- Mataix, C. (1982). *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas* (Segunda ed.). Madrid: Ediciones del Castillo.
- Restrepo, C. (2005). *Tesis de Maestría: Aproximación a la dinámica del transporte del nitrógeno y del fósforo en la ciénaga de Ayapel (b)*. Medellín.
- Restrepo, C., Toro, M., & Aguirre, N. (2006). Aproximación a la dinámica de transporte del nitrógeno y del fósforo en la ciénaga de Ayapel (a). *Avances en recursos hidráulicos*(13), 7-22.

Toro, F. M., & Gómez, E. A. (1997). Simulación numérica del efecto del Caño Clarín en los patrones de circulación de la ciénaga Grande de Santa Marta. *Avances de Recursos Hidráulicos*(4), 73-90.

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA; UNIVERSIDADE DA CORUÑA. (2 de Mayo de 2016). *Iber*. Obtenido de Iber: <http://iberaula.es/modelo-iber/modelo>

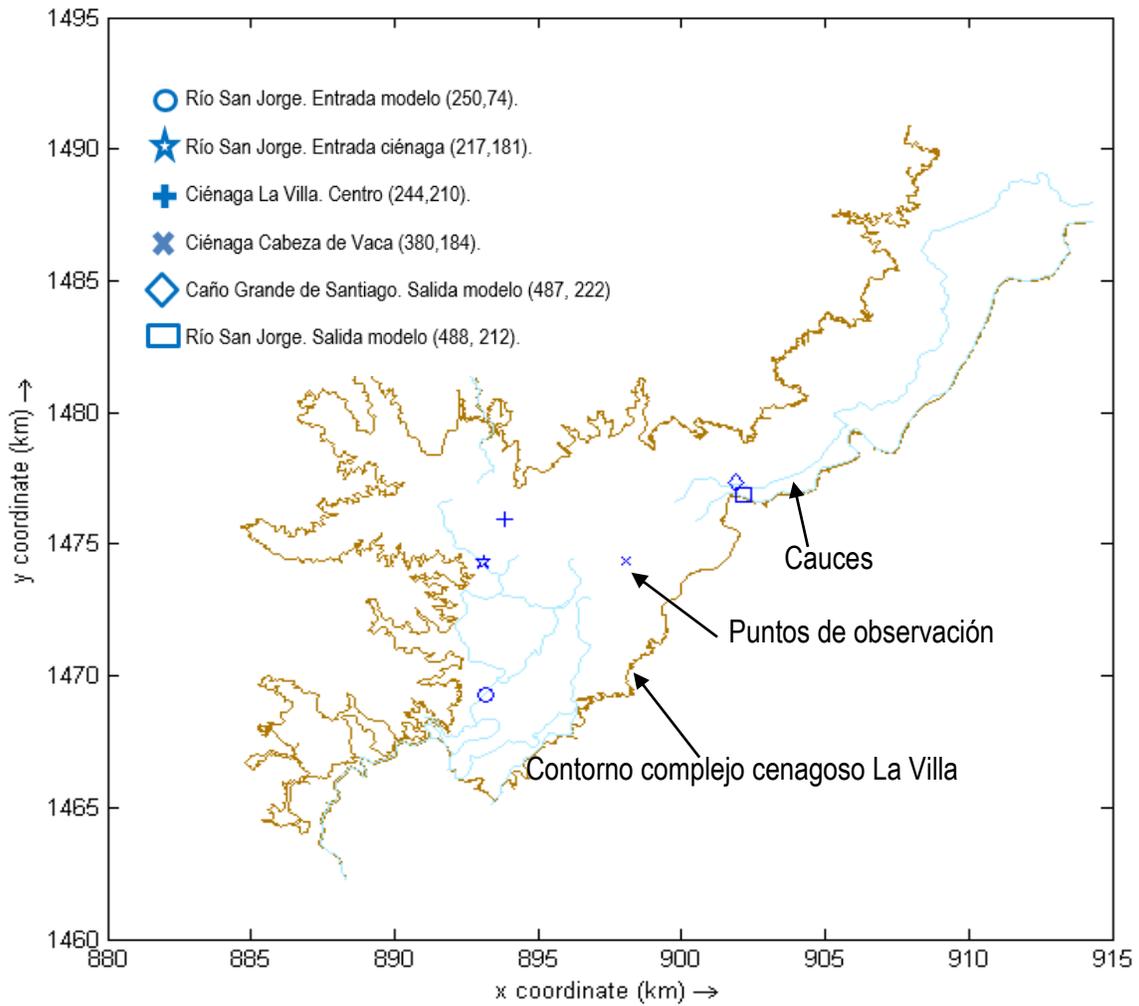
Vergara, E. P. (15 de Mayo de 2016). *San Benito Abad, sus corregimientos y veredas*. Obtenido de http://sanbenitoysuentorno.blogspot.com.co/2012_10_01_archive.html

Zapata, J. (2005). *Tesis de Maestría: Dinámica hidrológica en la ciénaga de Ayapel. Modelación del balance hídrico y simulación hidrodinámica*. Medellín.

ANEXOS

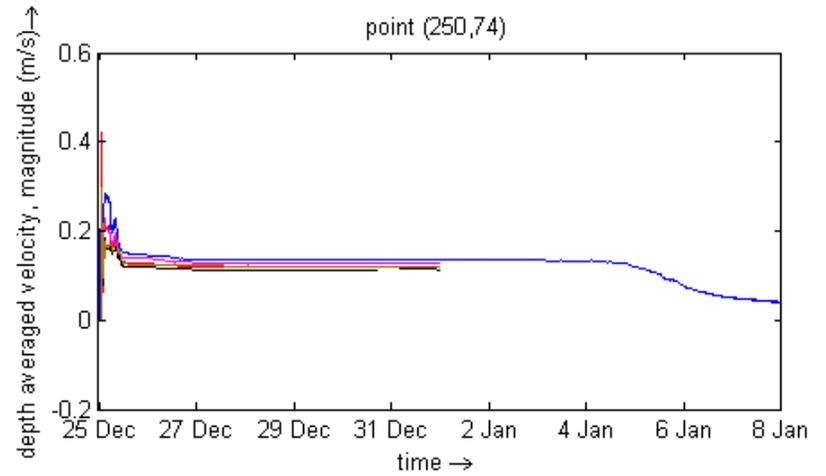
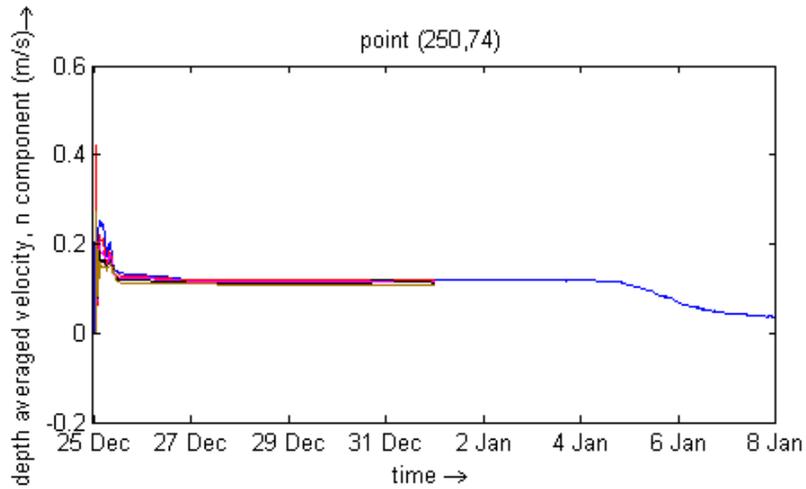
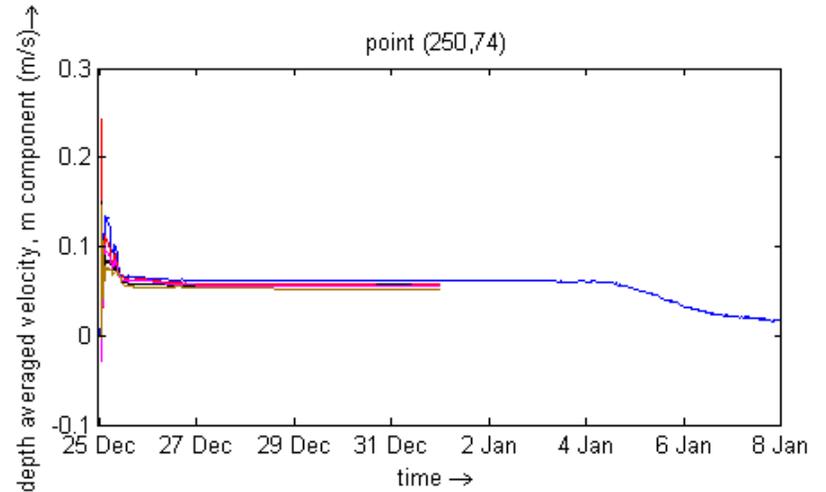
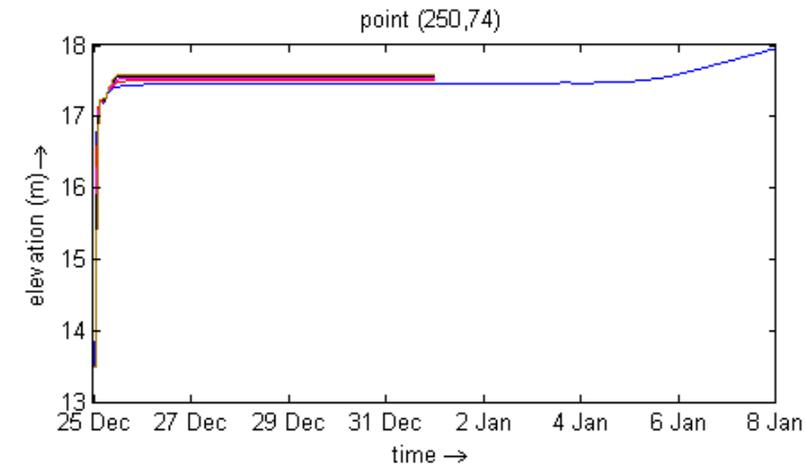
ANEXO 1. ANALISIS DE SENSIBILIDAD DEL MODELO HIDRODINÁMICO DE LA CIÉNAGA LA VILLA Y SUS INTERCONEXIONES

Localización de los puntos de observación para el análisis de sensibilidad



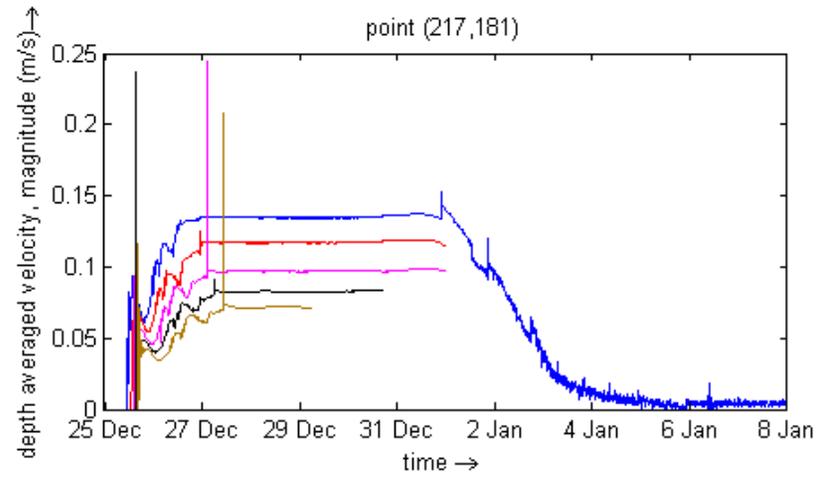
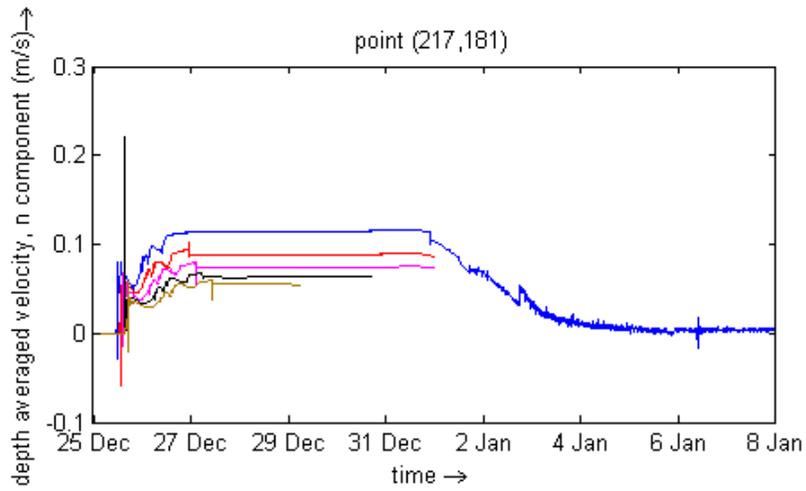
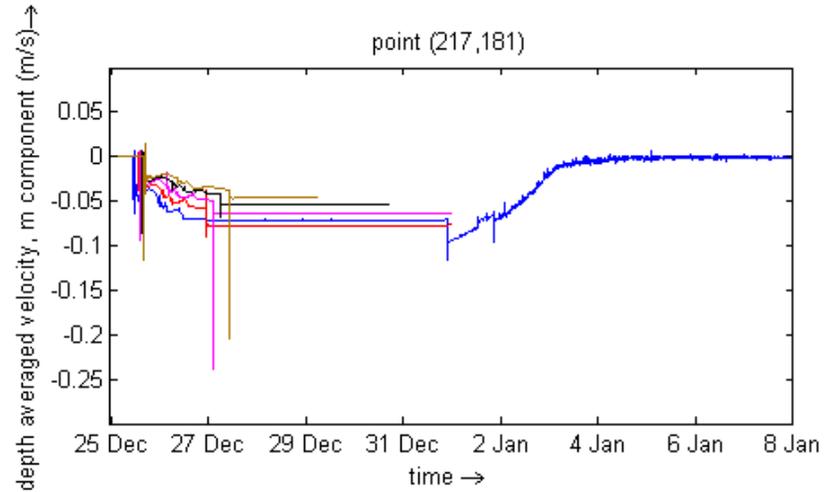
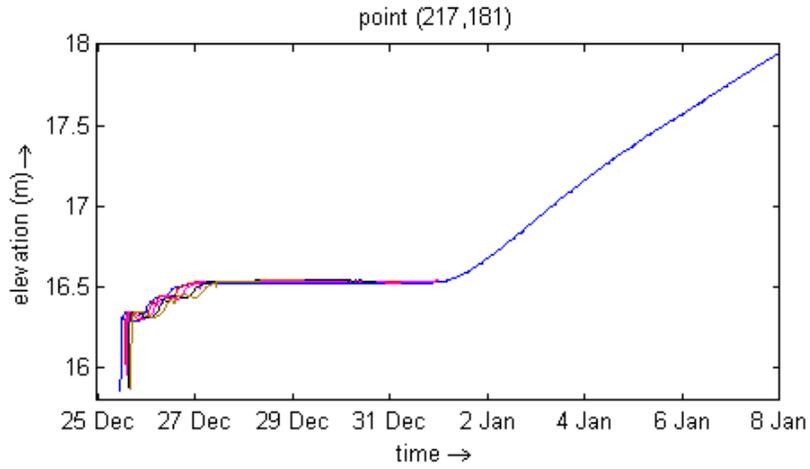
ESCENARIO 1

Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)



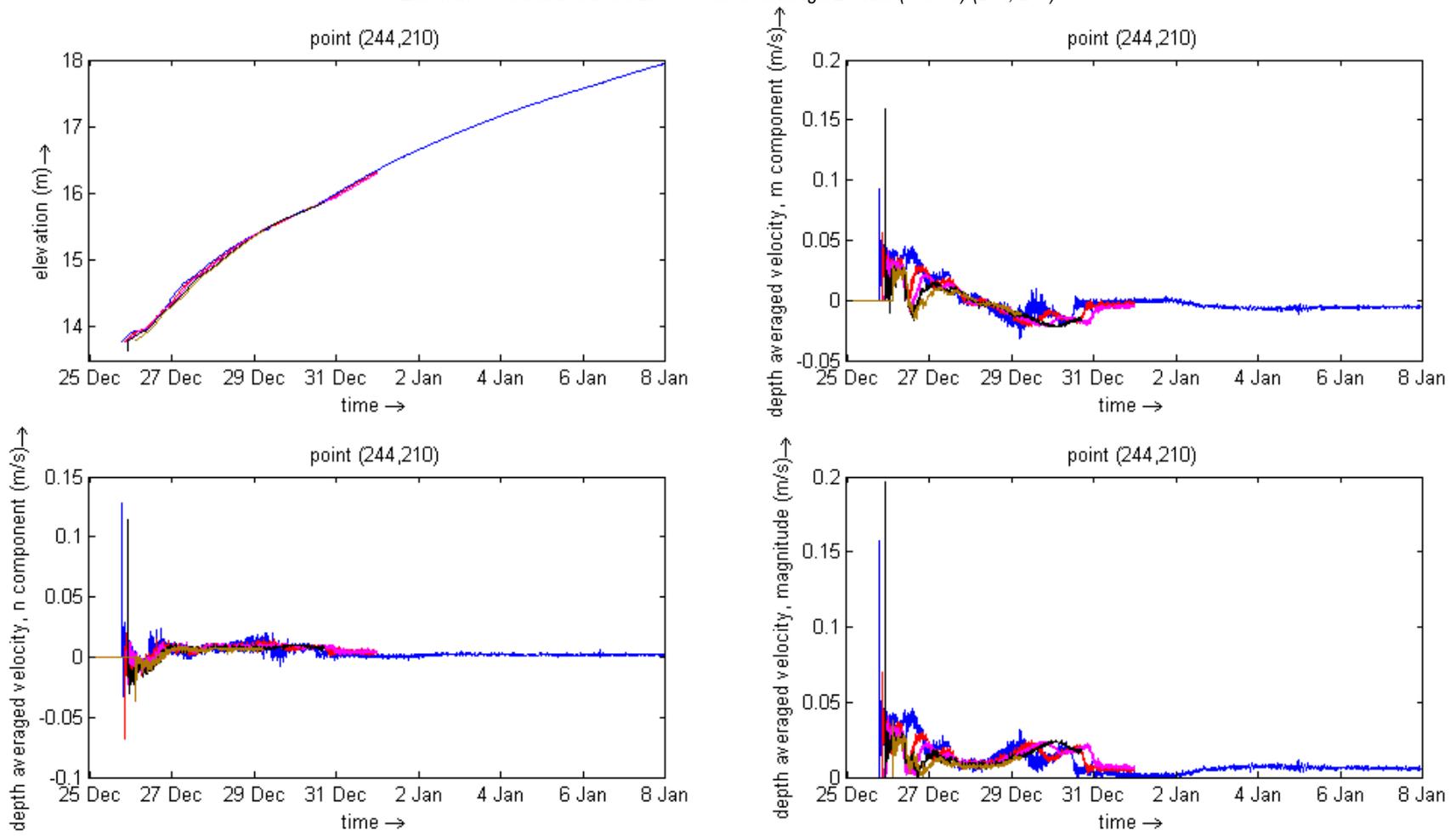
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181)



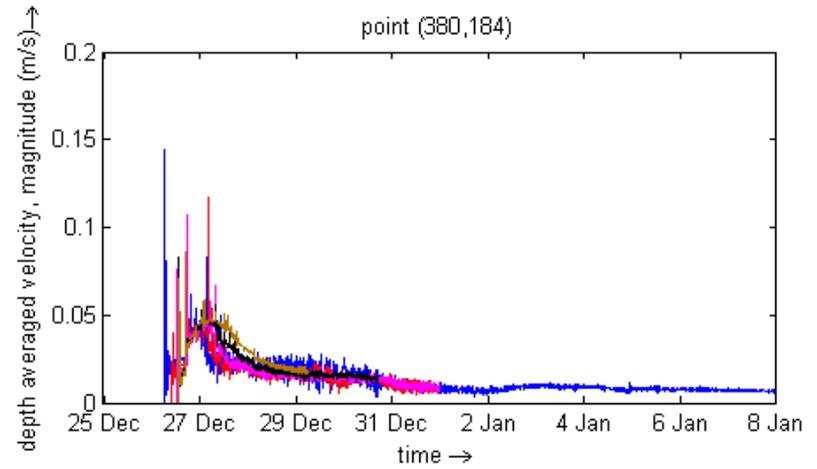
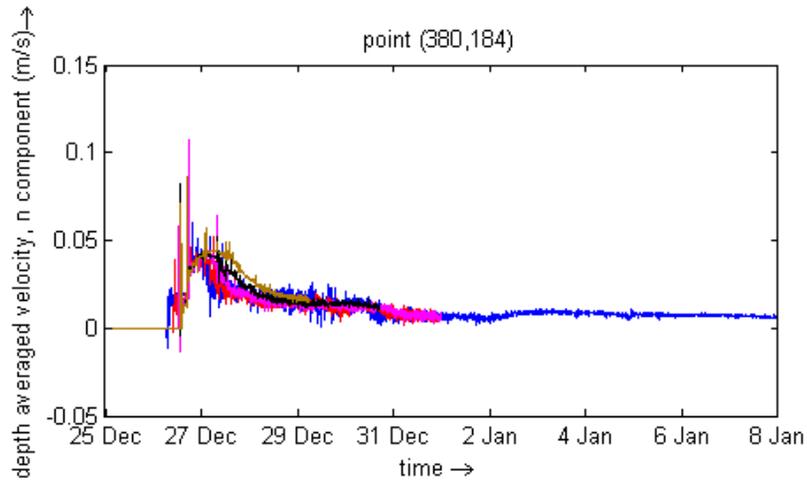
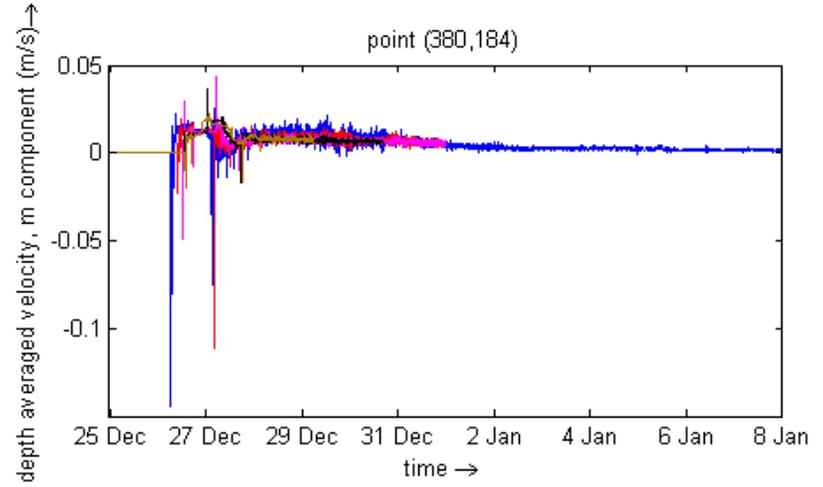
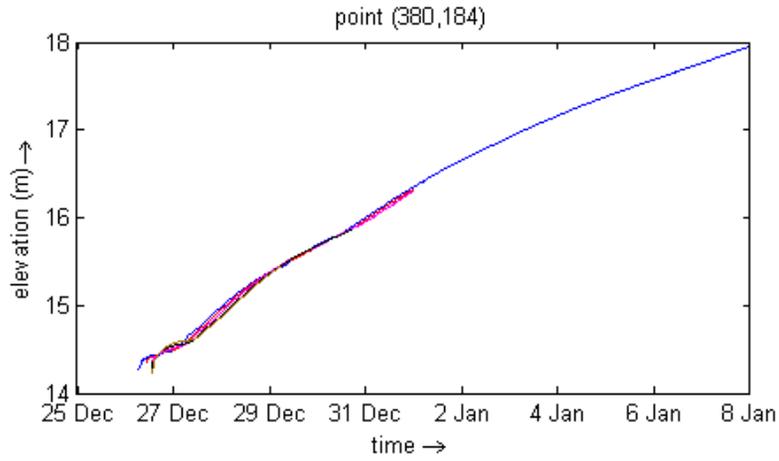
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210)



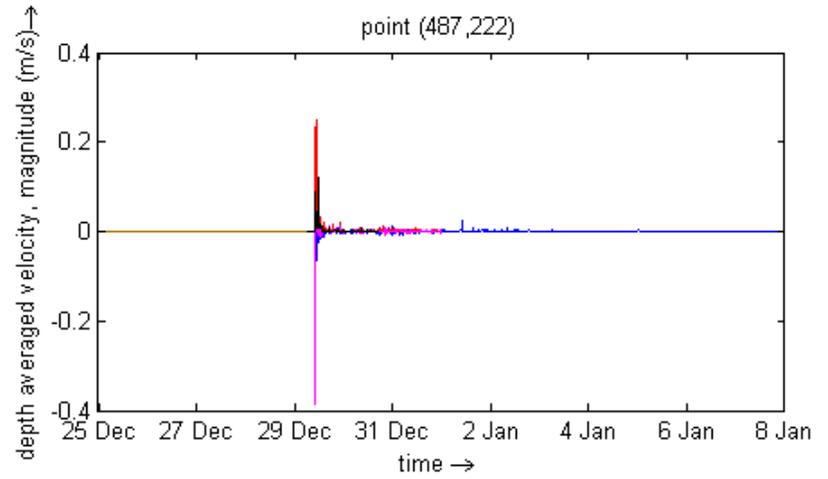
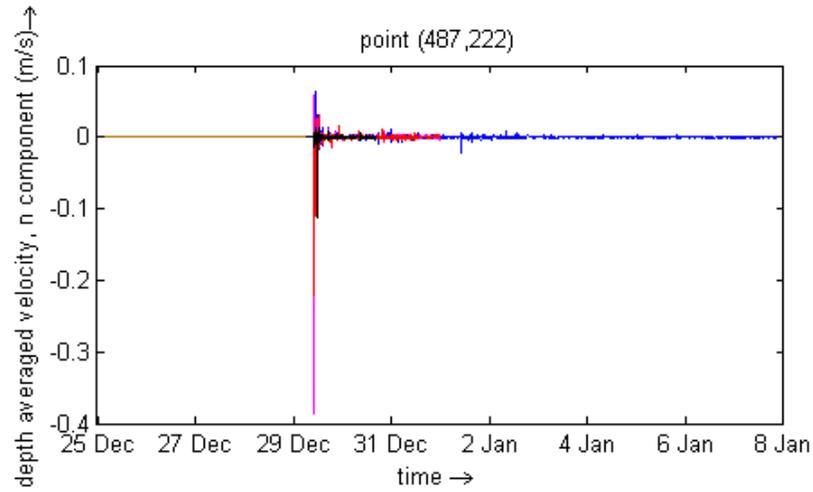
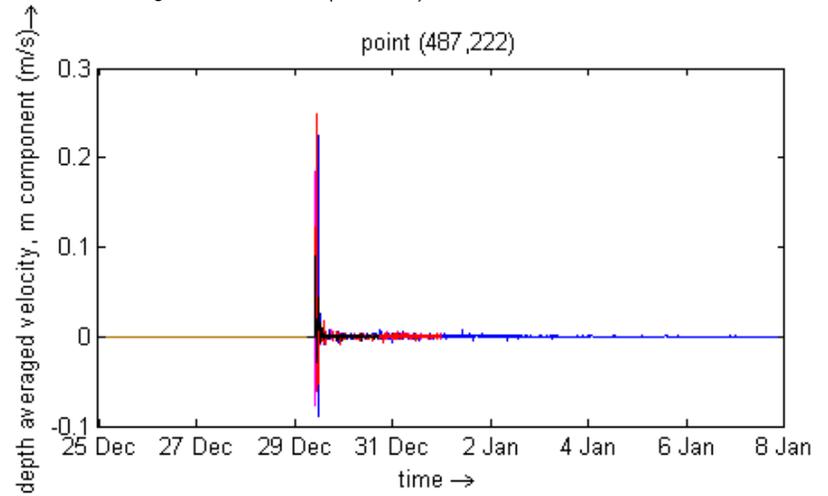
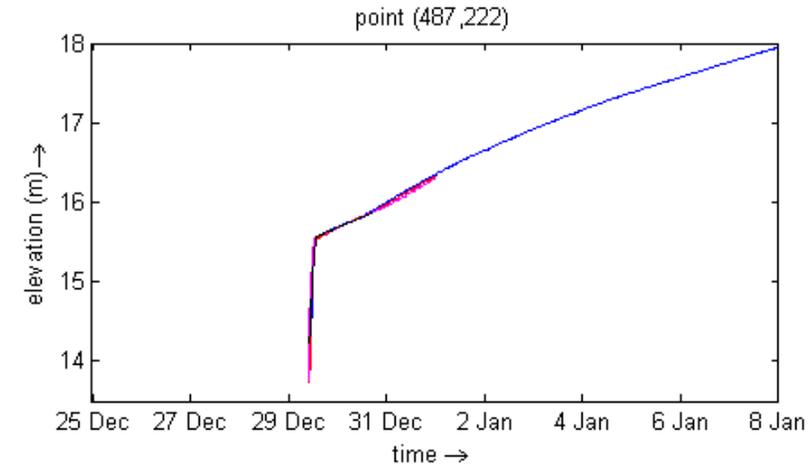
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Ciénaga Cabeza de Vaca (380, 184)



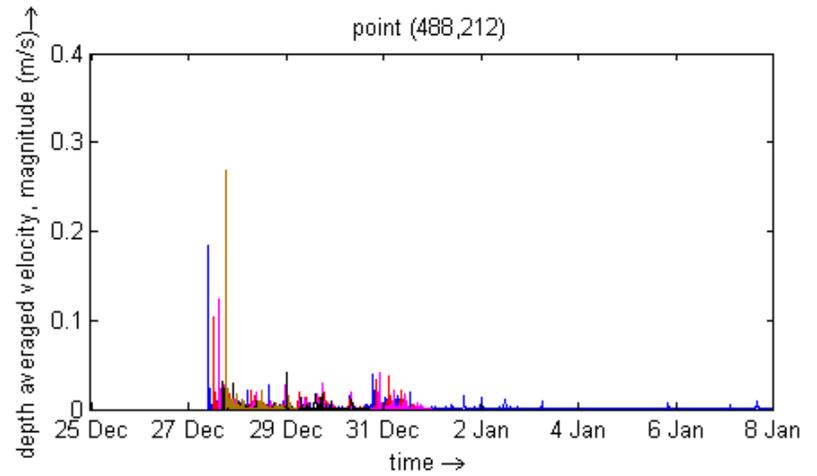
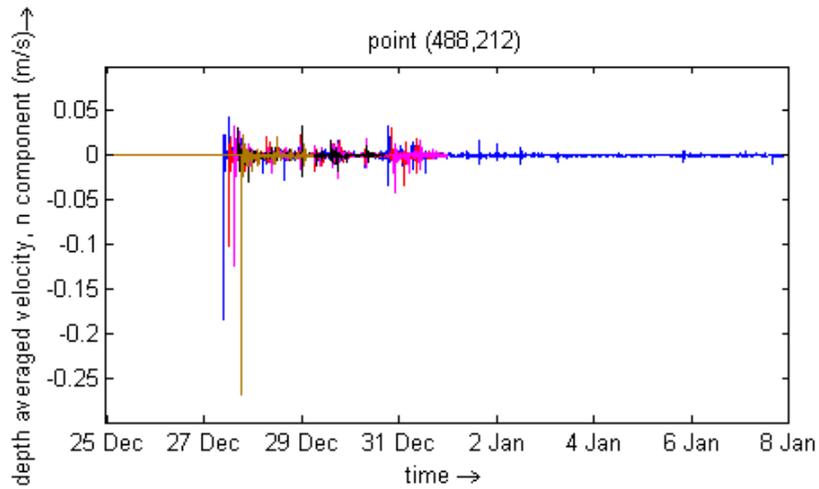
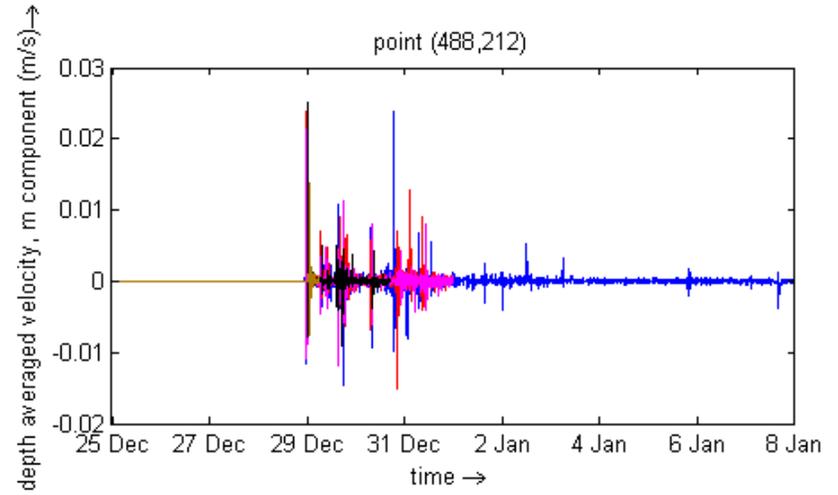
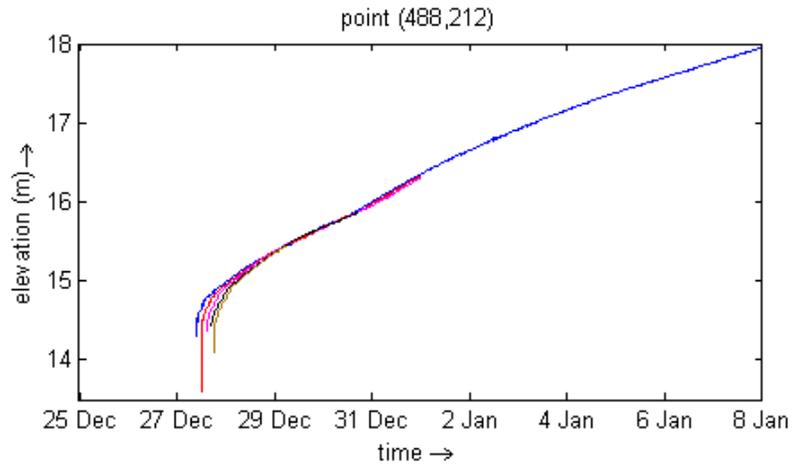
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Caño Grande de Santiago Salida Modelo (487, 222)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

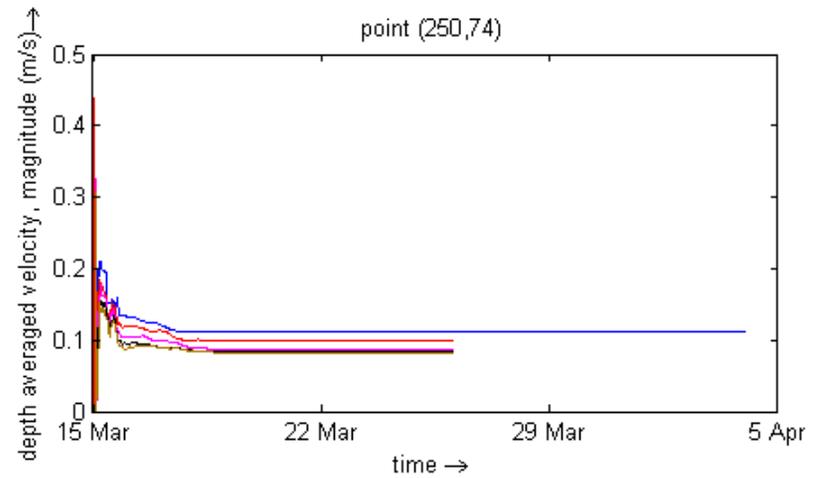
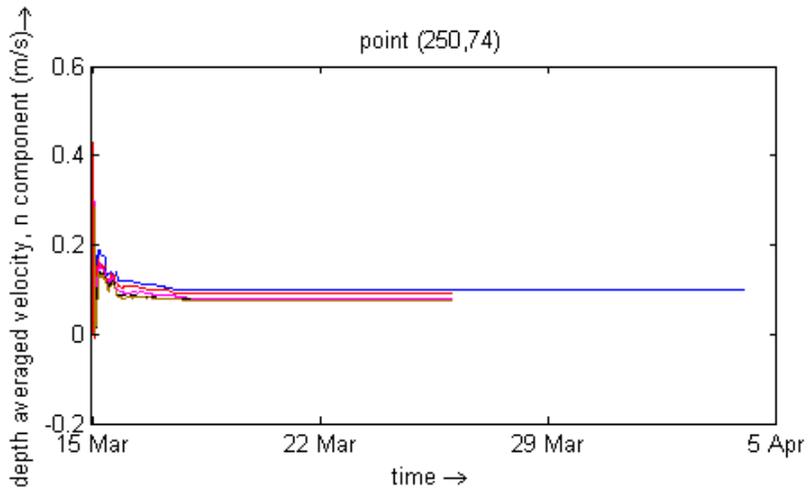
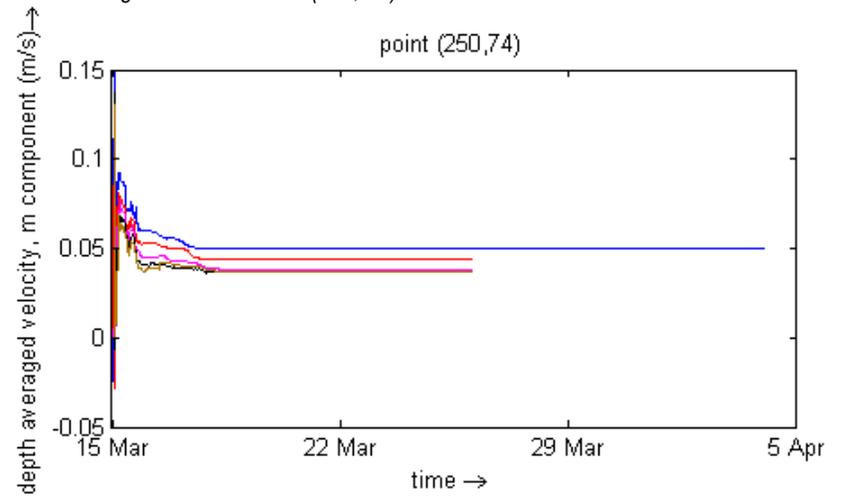
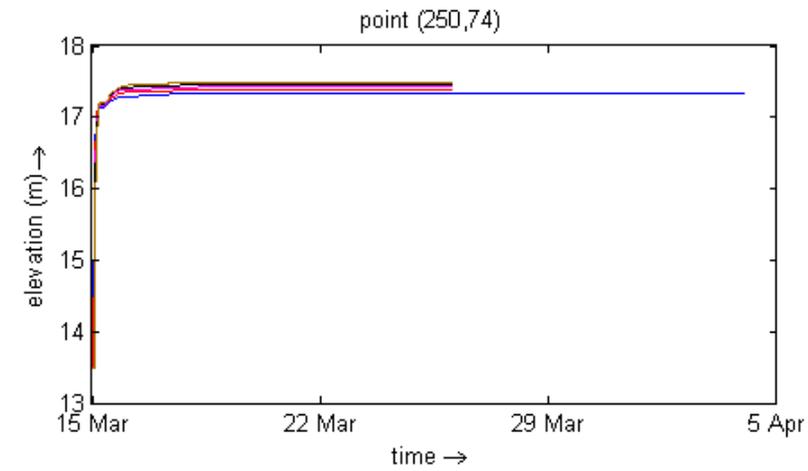
Escenario 1: Caudales Inicio 2009 – Punto: Río San Jorge Salida Modelo (488, 212)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

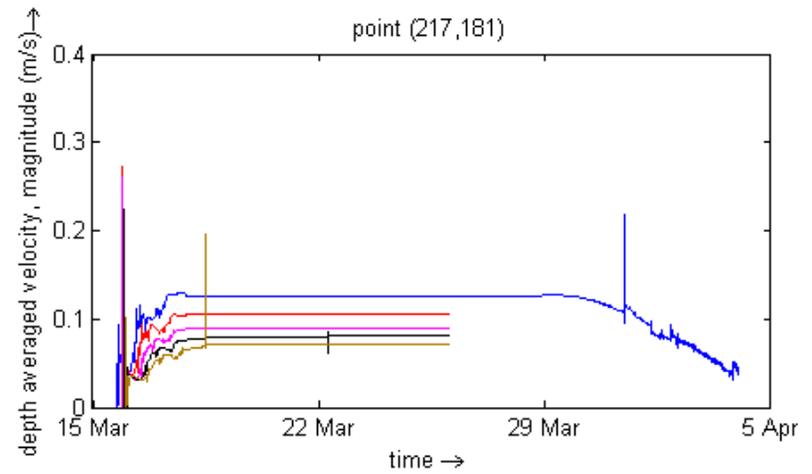
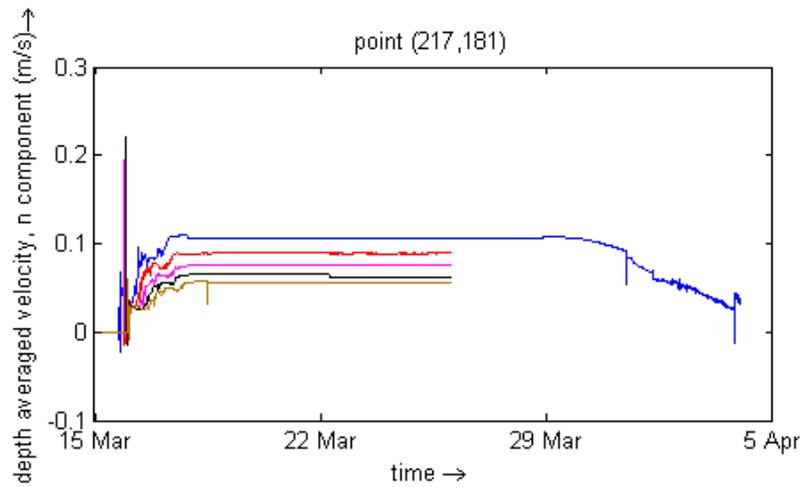
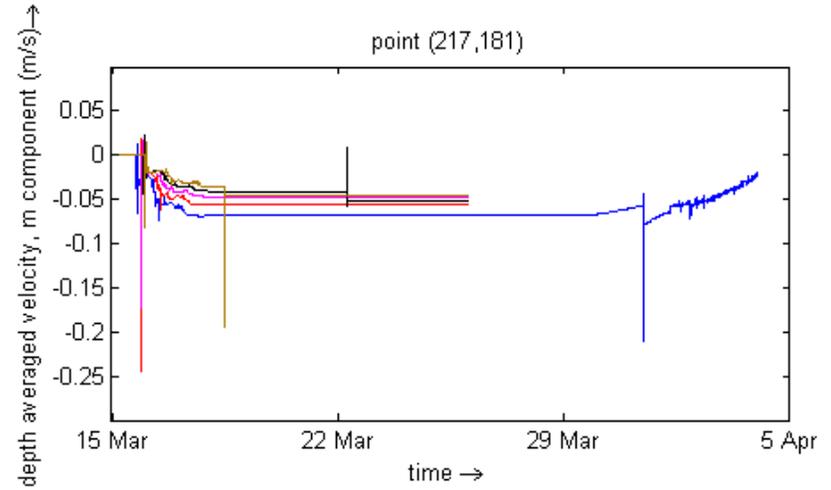
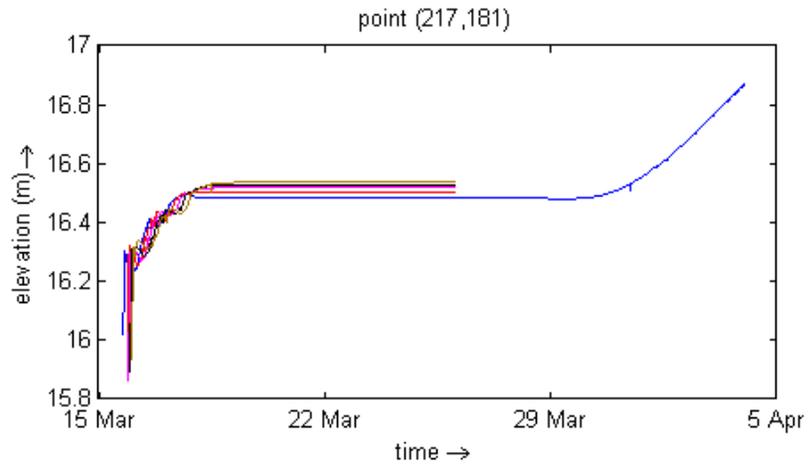
ESCENARIO 2

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)



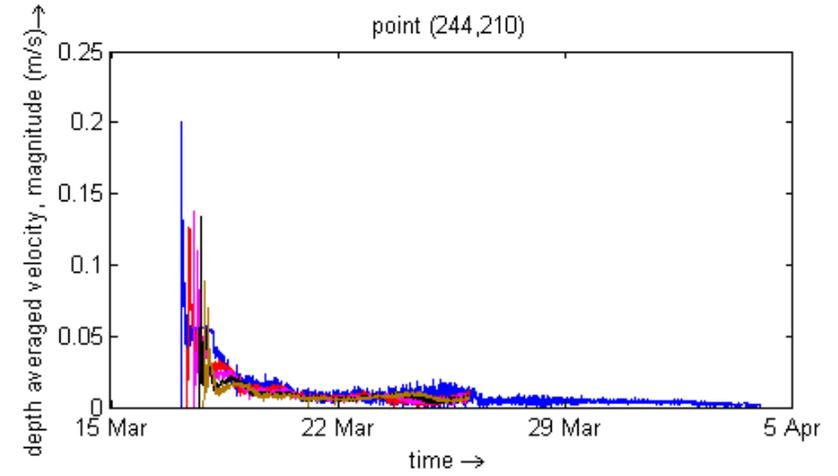
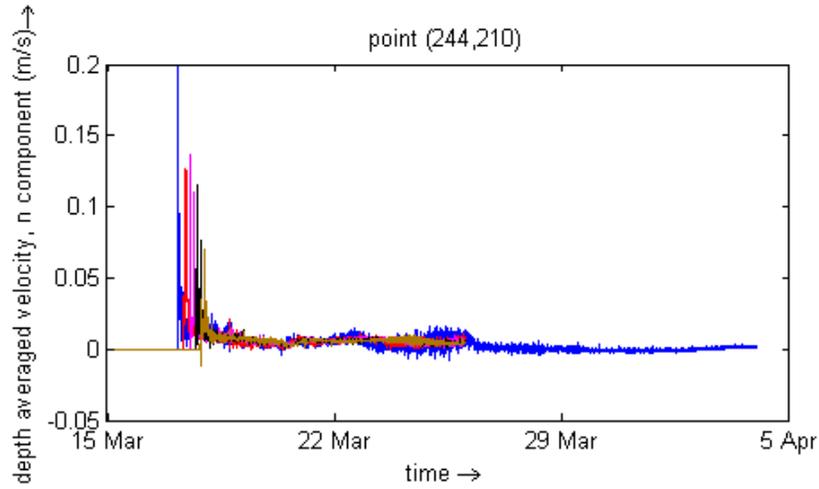
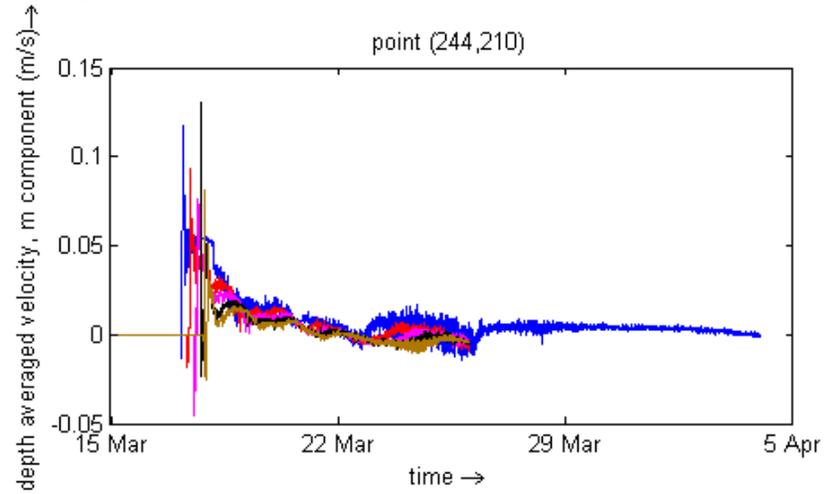
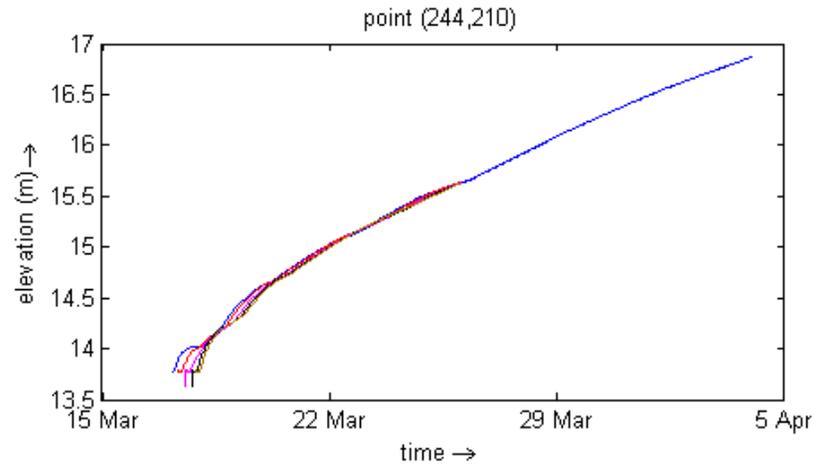
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181)



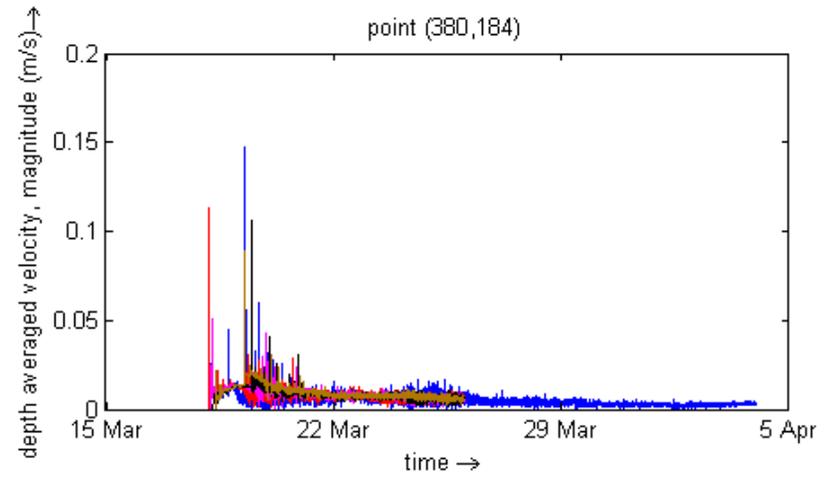
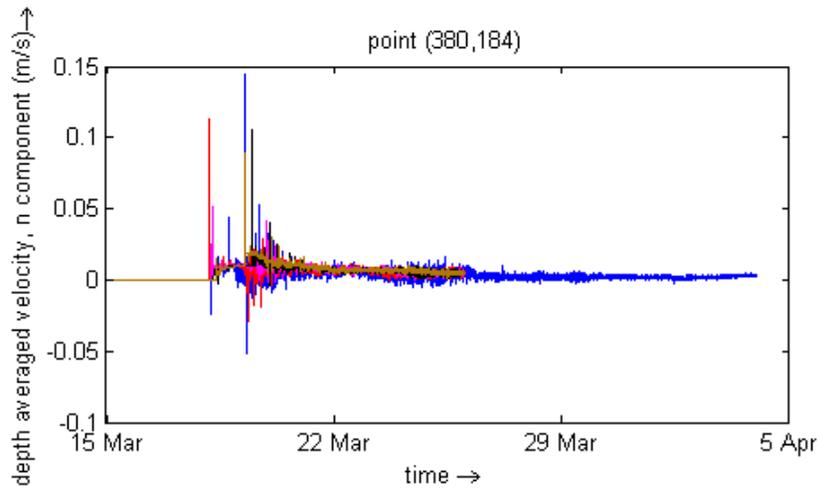
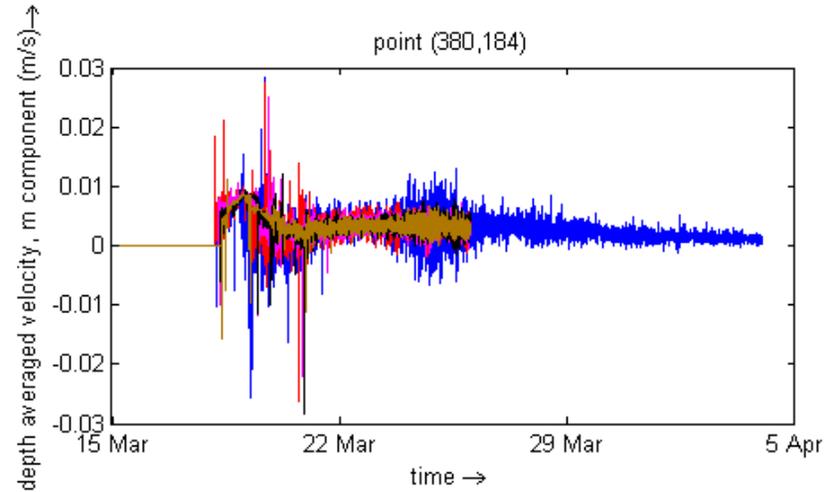
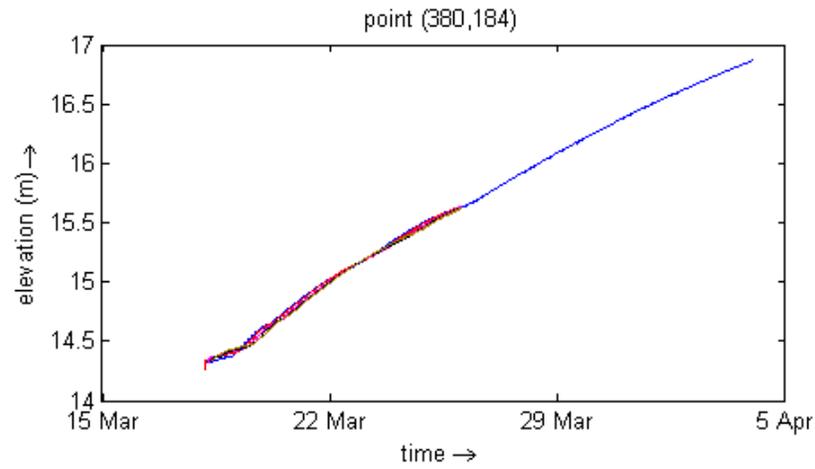
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210)



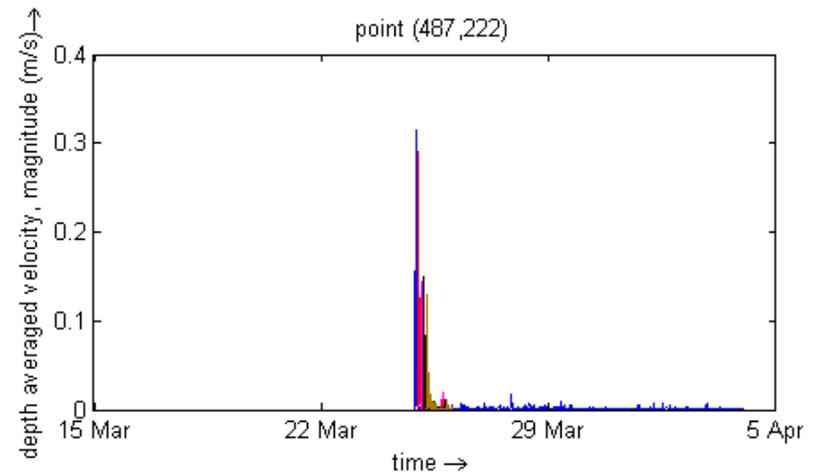
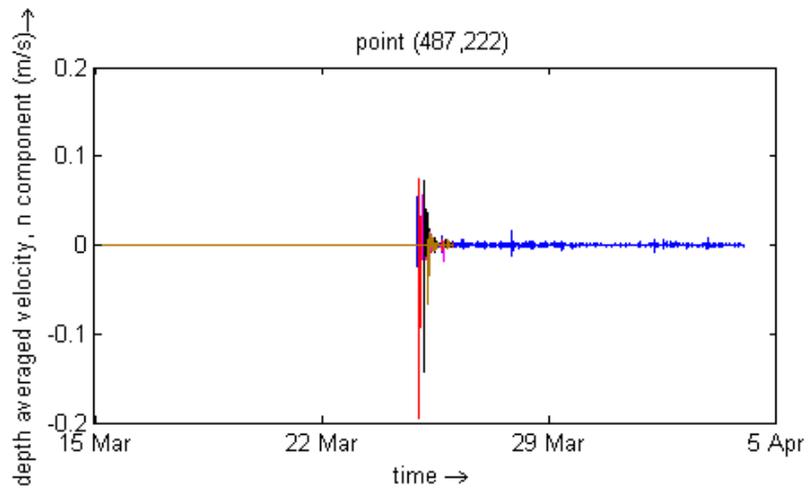
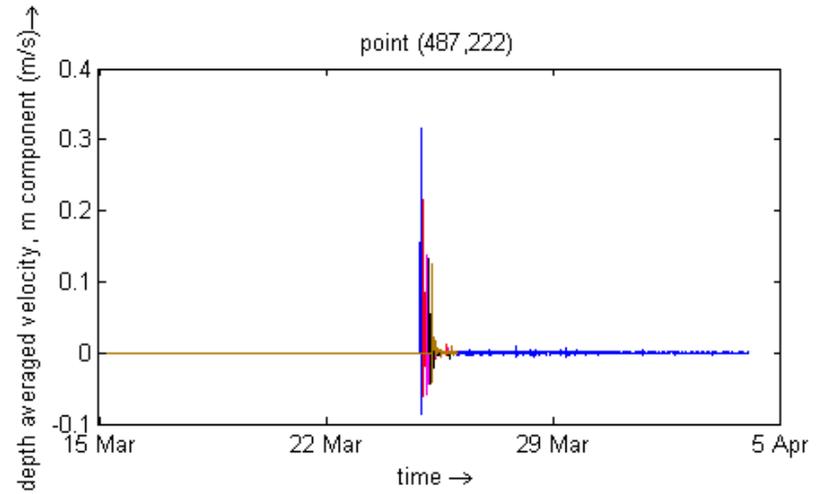
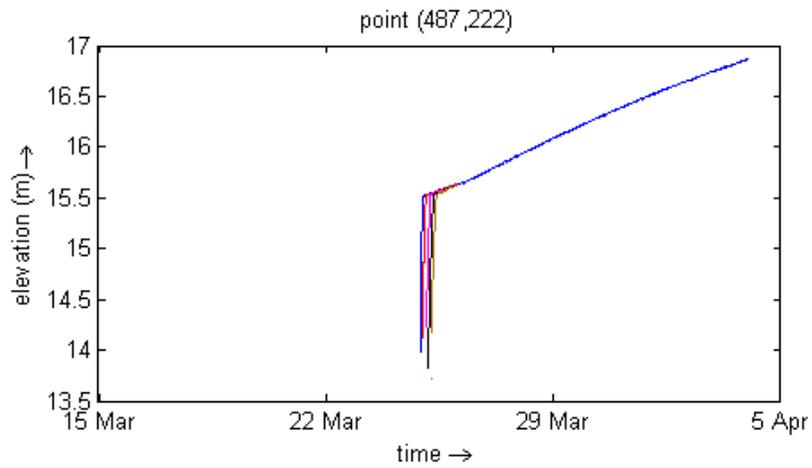
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Ciénaga Cabeza de Vaca (380, 184)



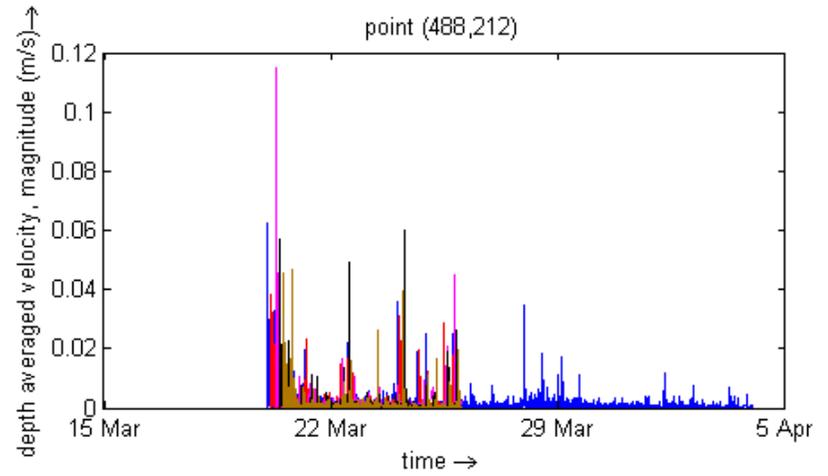
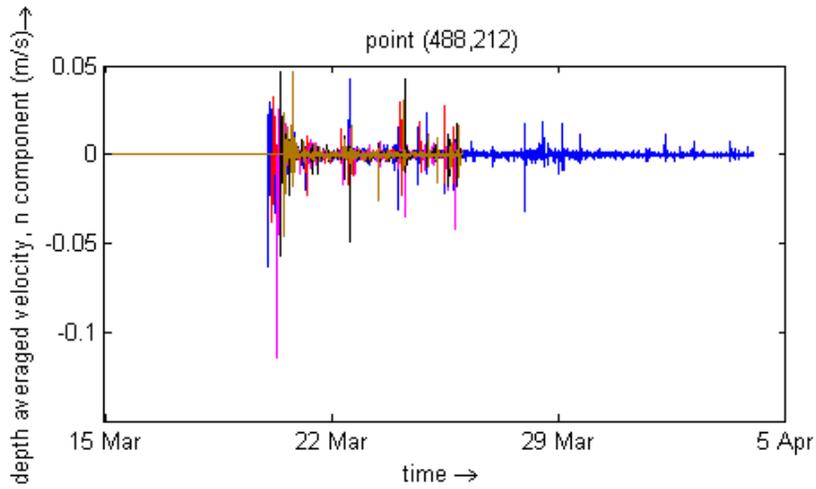
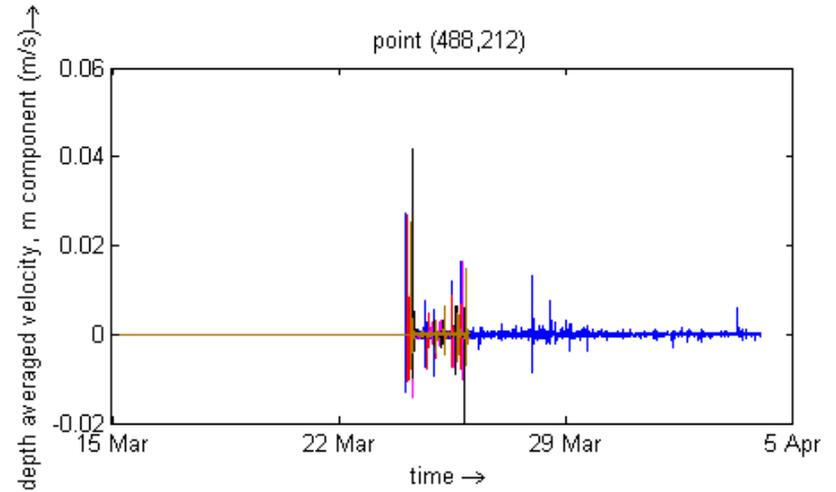
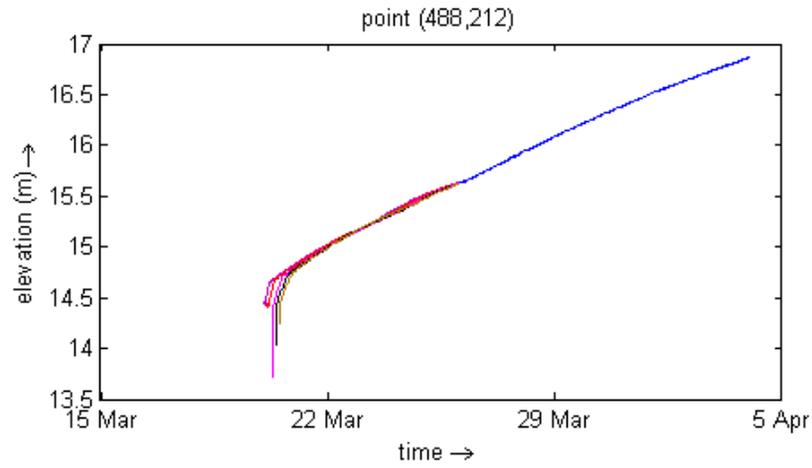
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Caño Grande de Santiago Salida Modelo (487, 222)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 2: Caudales Mínimos 2009 – Punto: Río San Jorge Salida Modelo (488, 212)

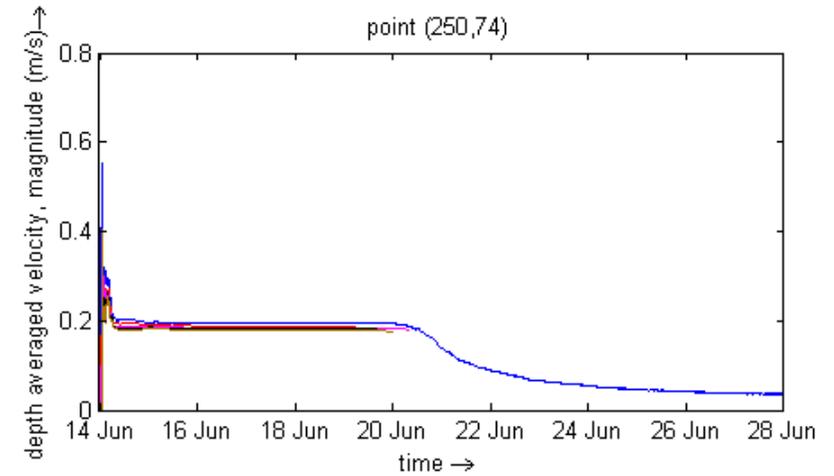
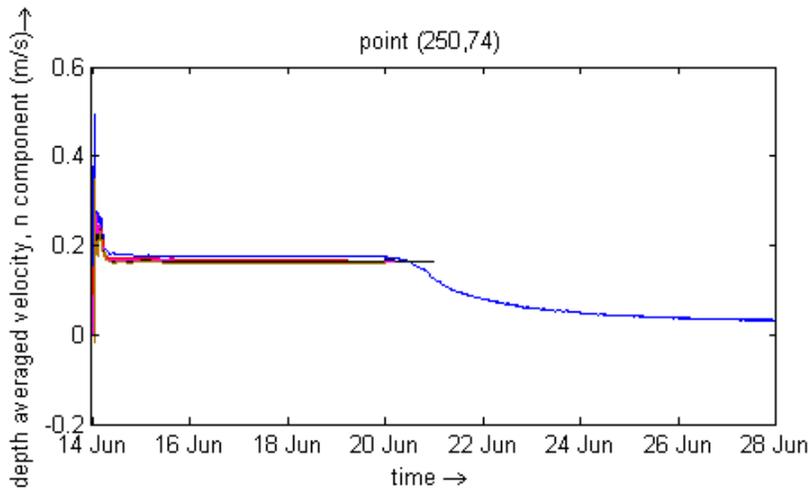
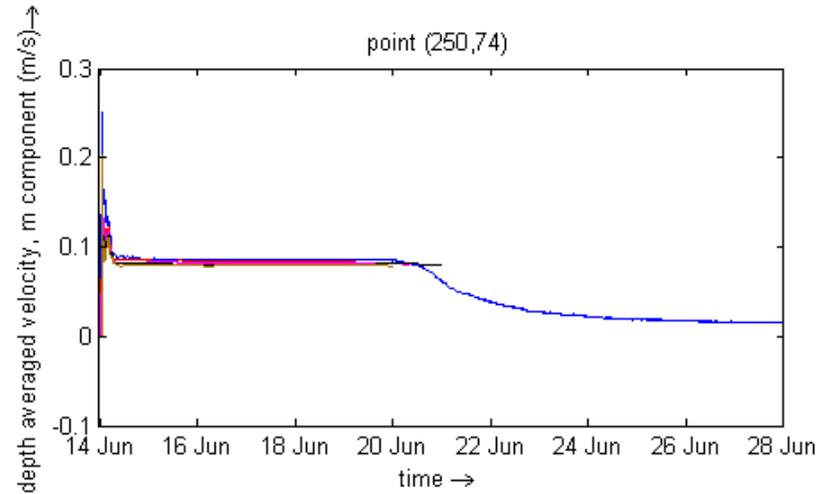
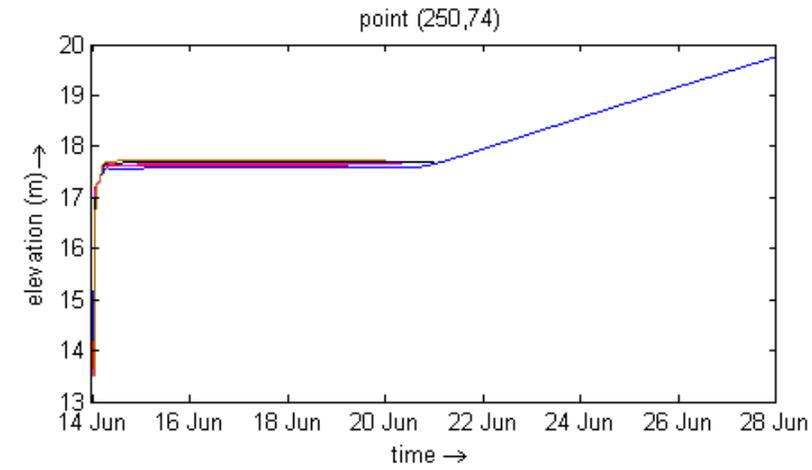


Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

}

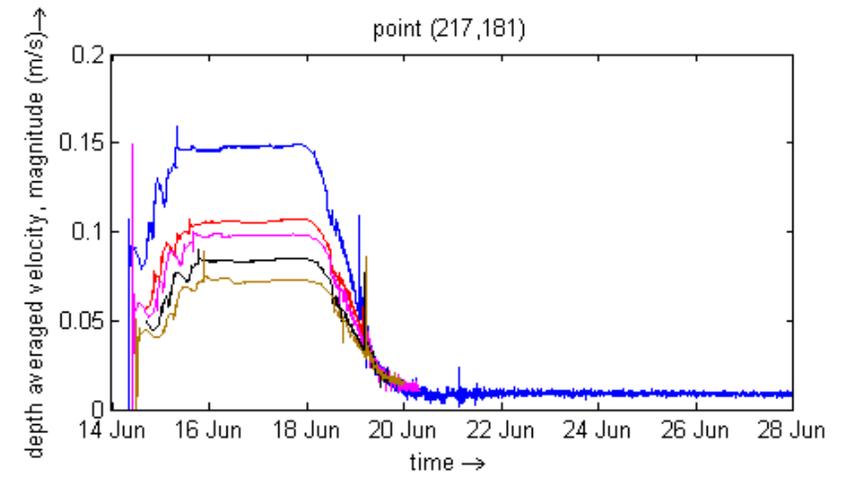
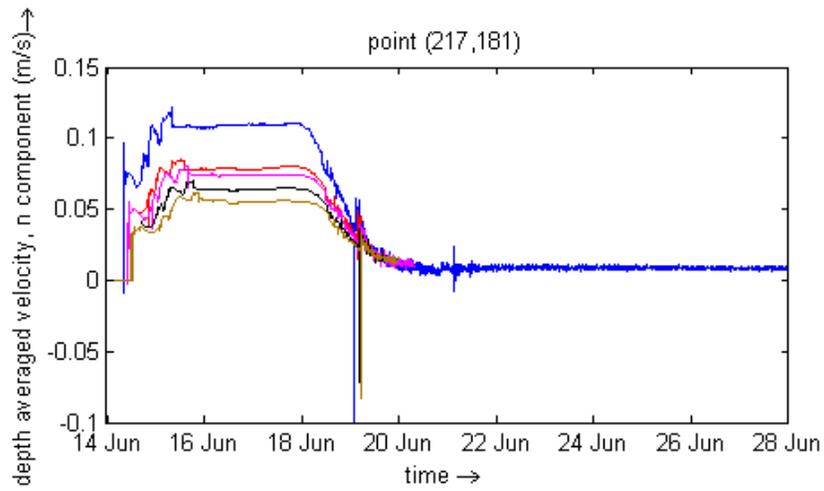
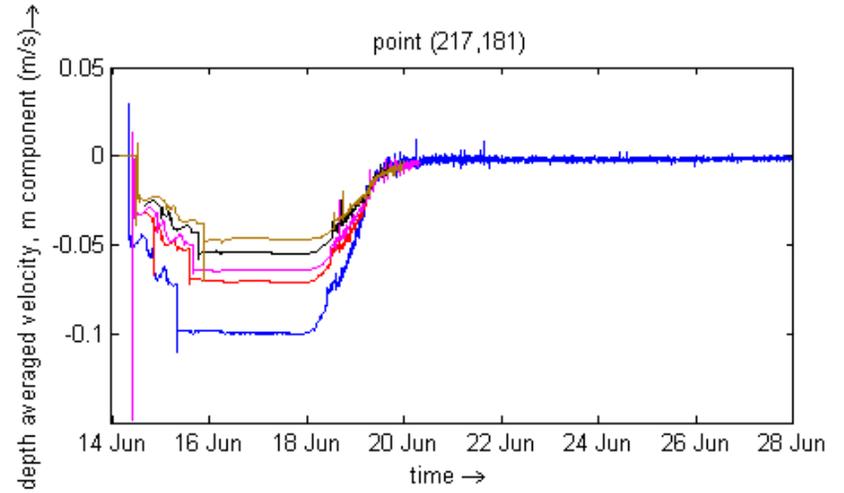
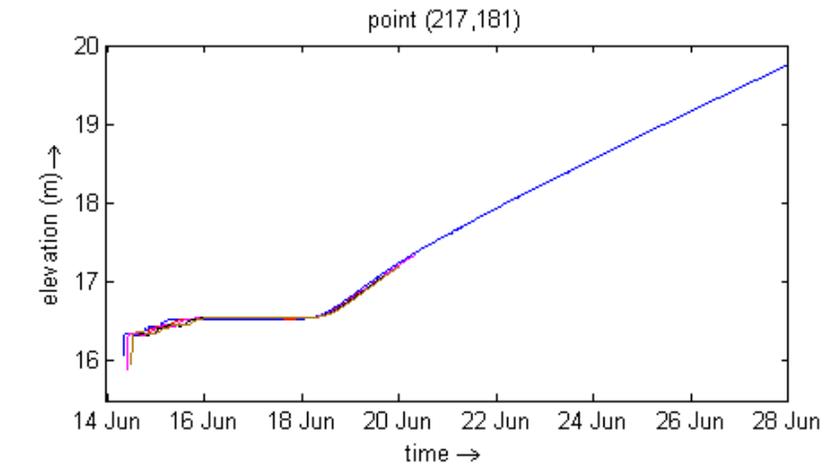
ESCENARIO 3

Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)



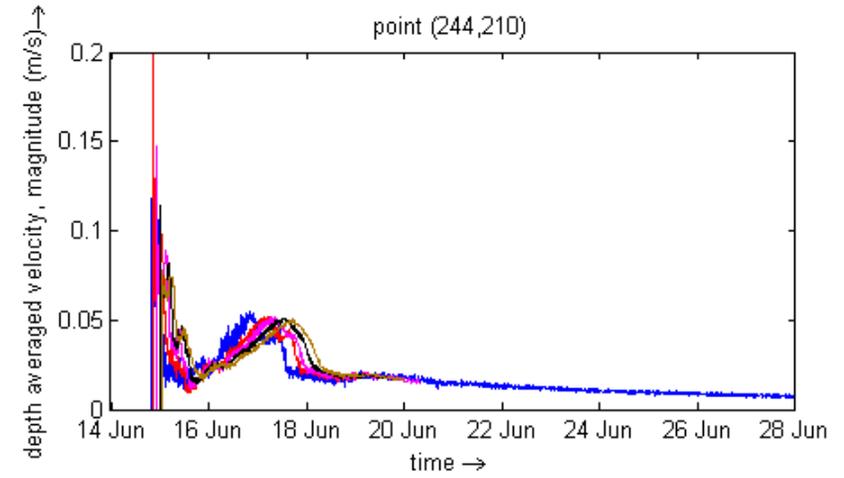
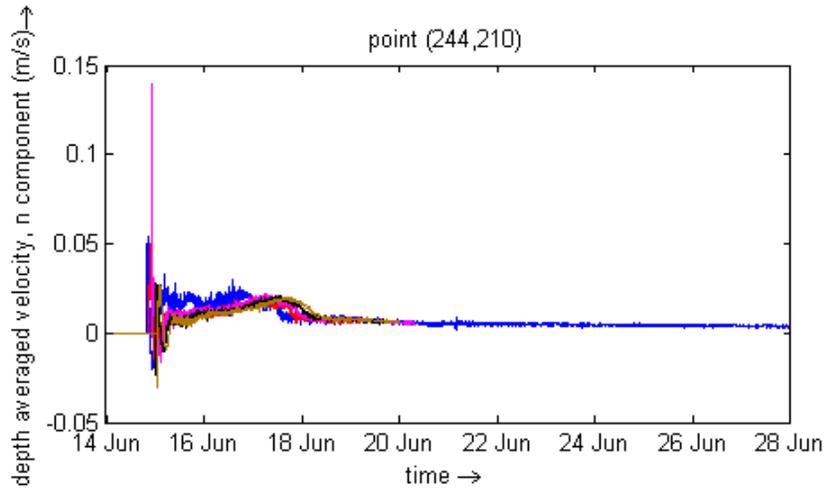
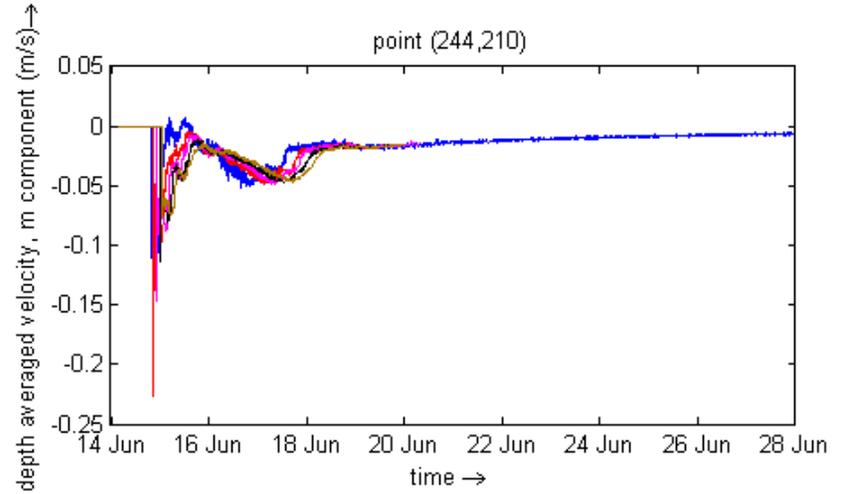
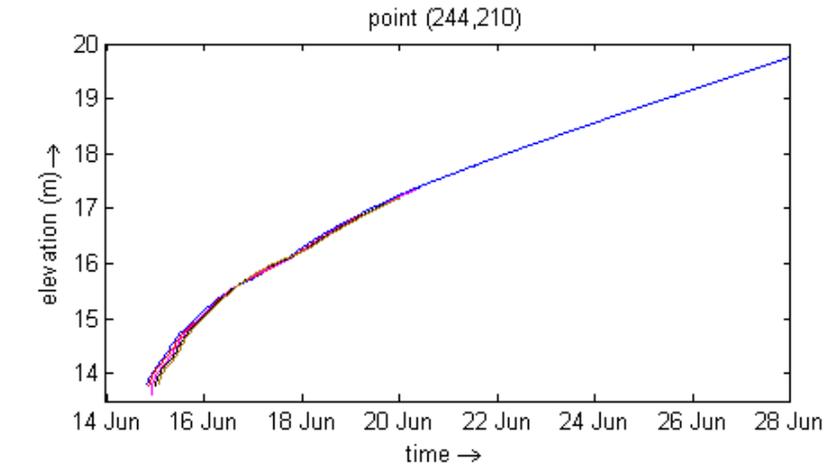
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181)



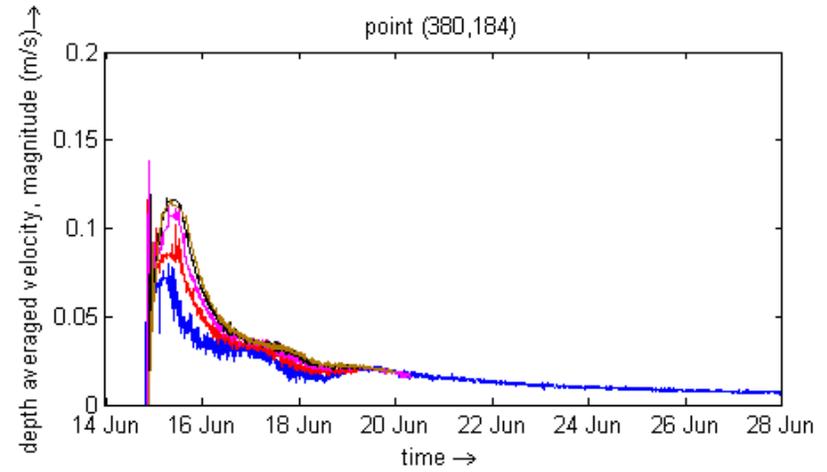
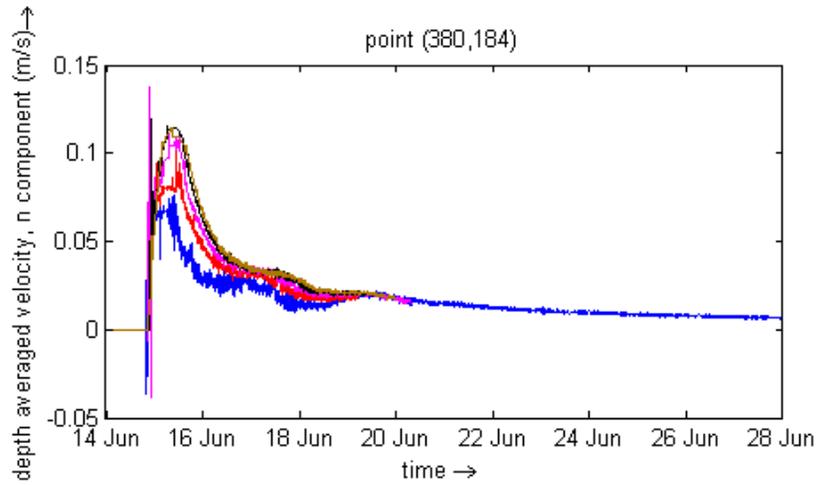
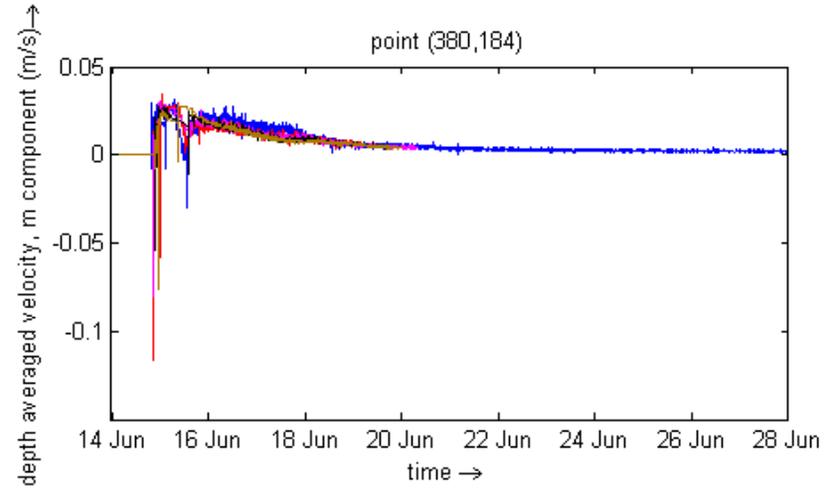
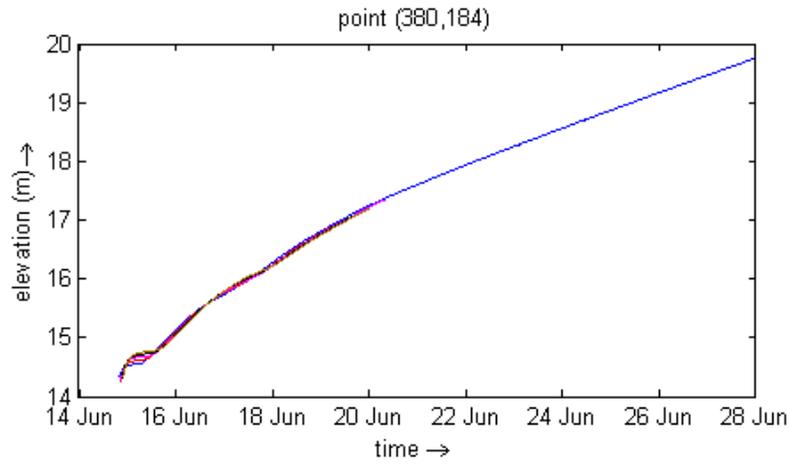
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210)



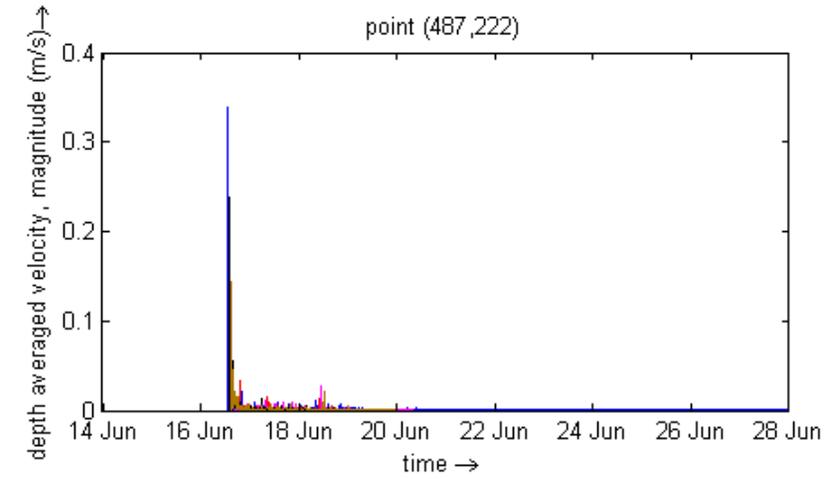
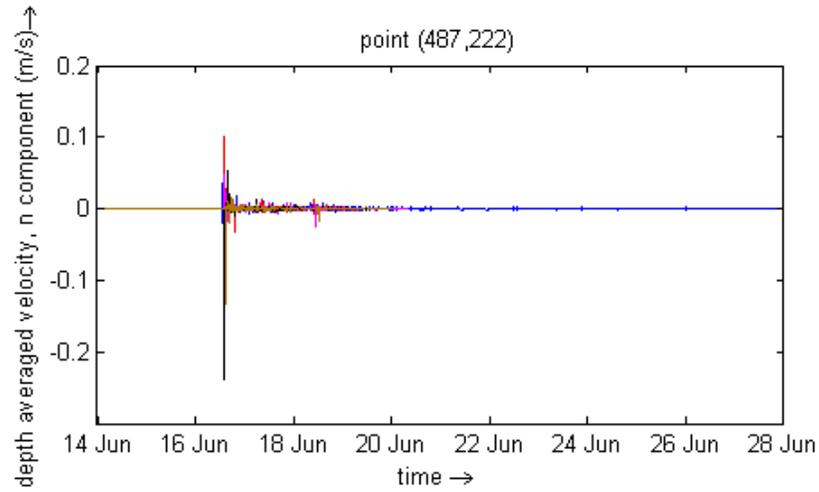
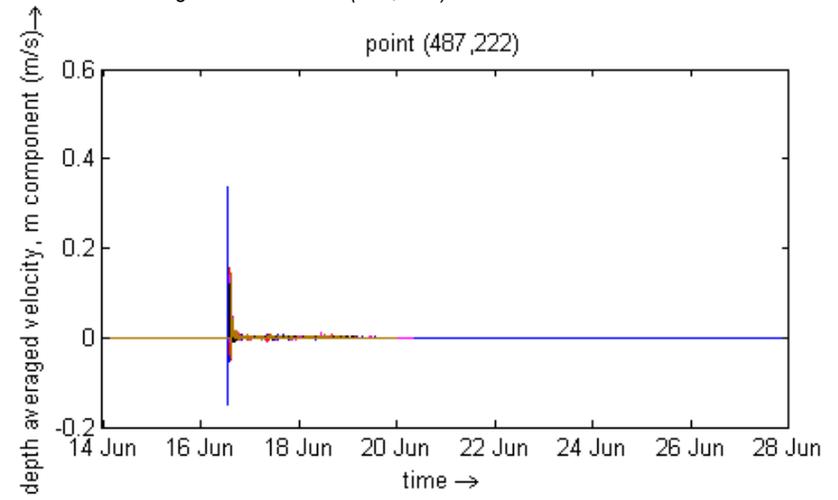
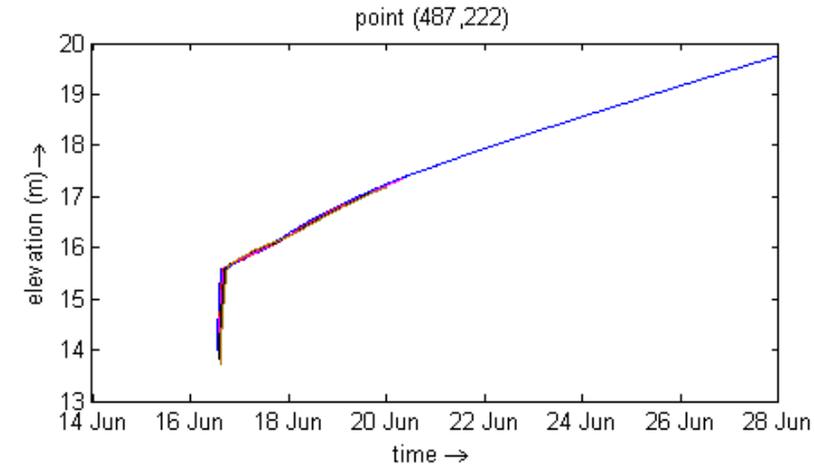
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Ciénaga Cabeza de Vaca (380, 184)



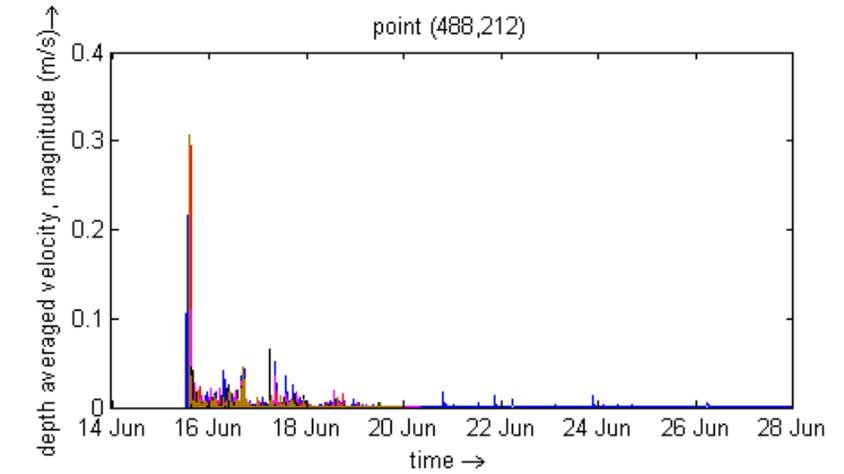
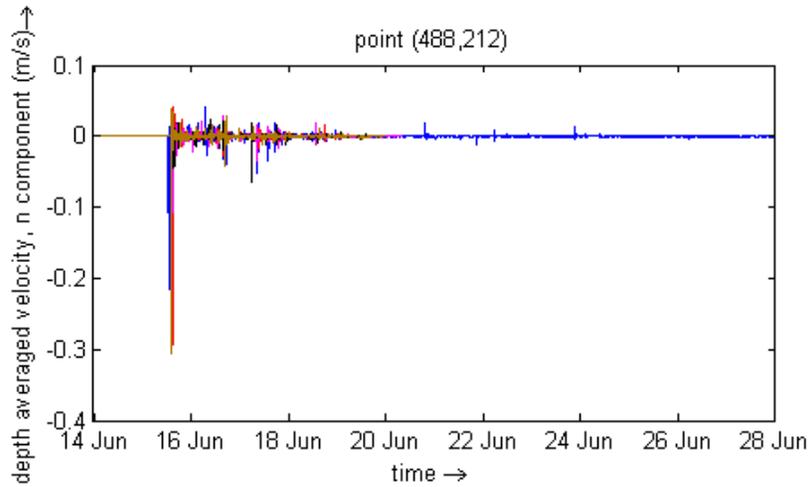
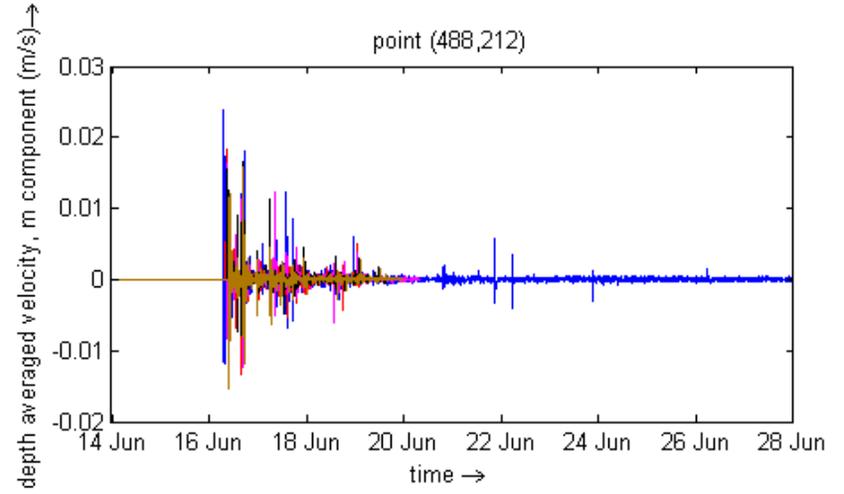
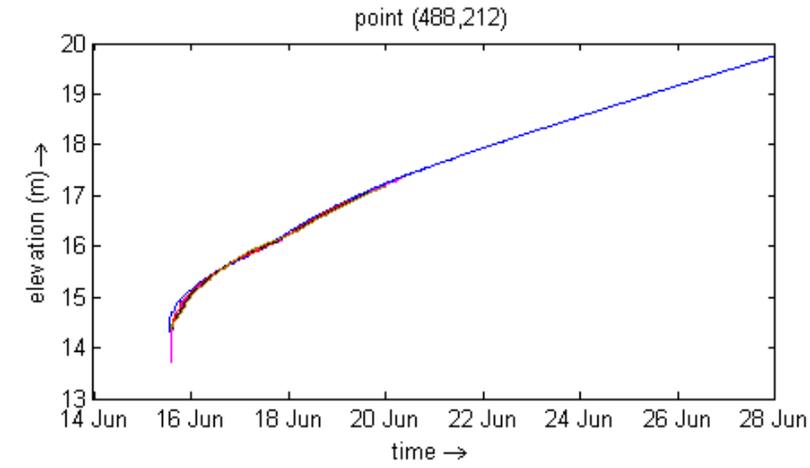
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Caño Grande de Santiago Salida Modelo (487, 222)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

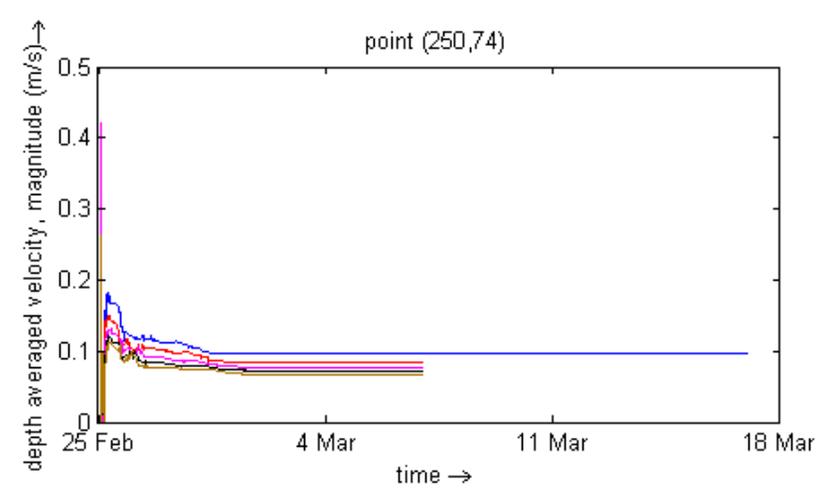
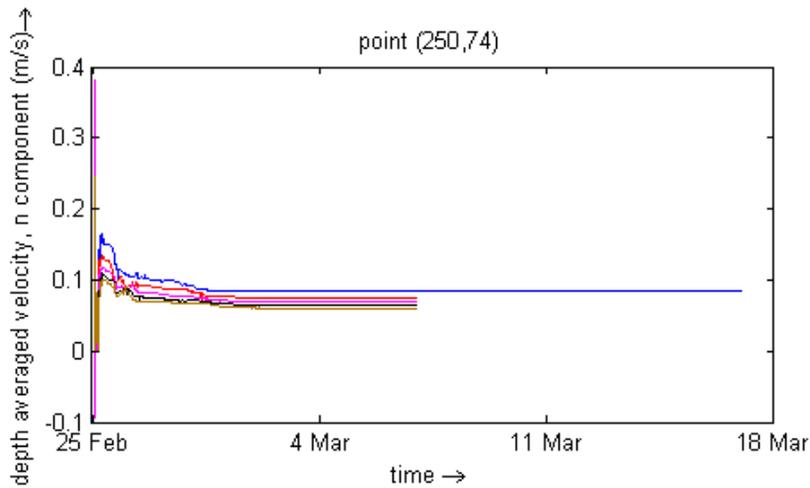
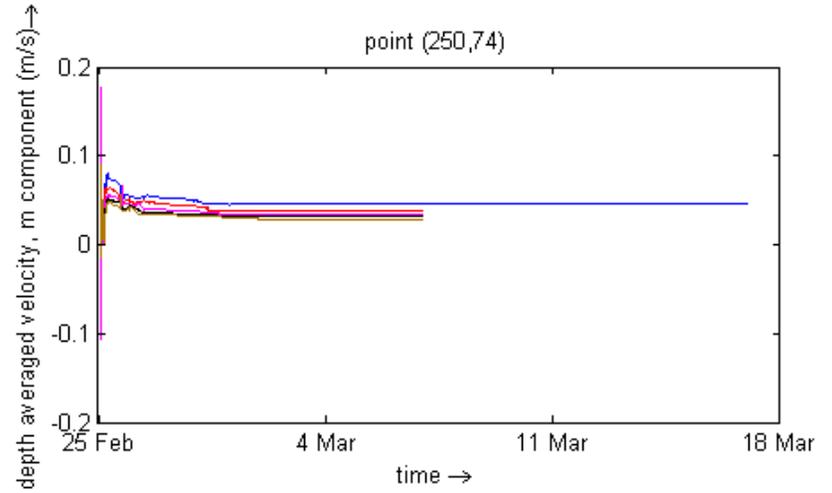
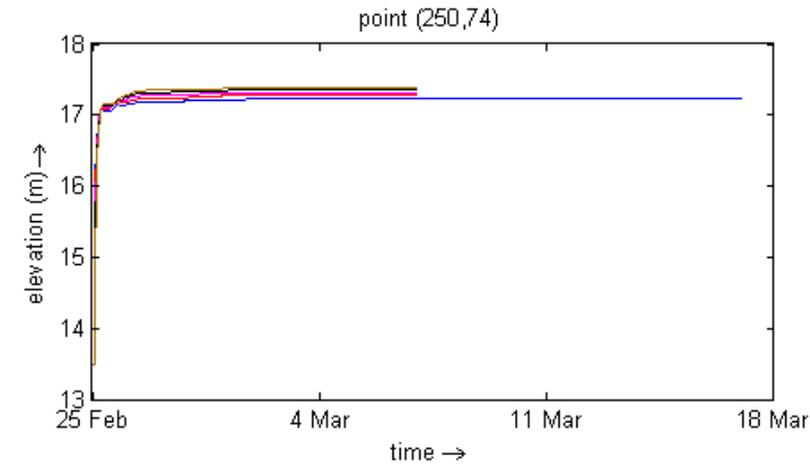
Escenario 3: Caudales Máximos 2009 – Punto: Río San Jorge Salida Modelo (488, 212)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

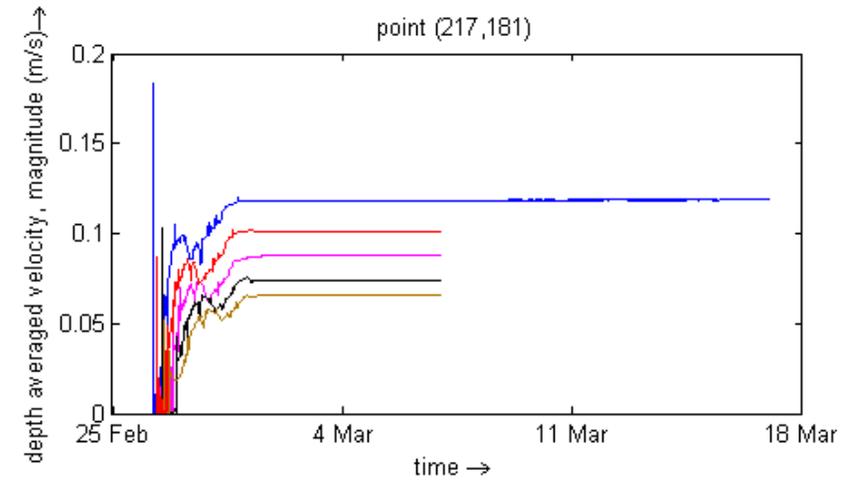
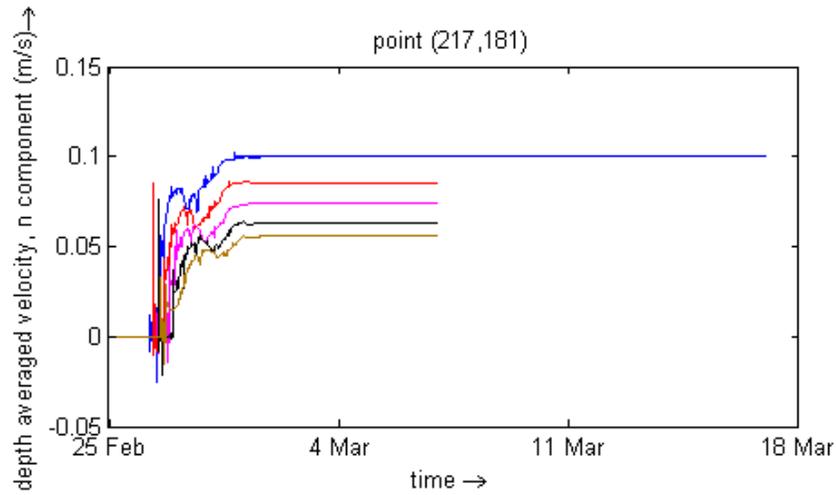
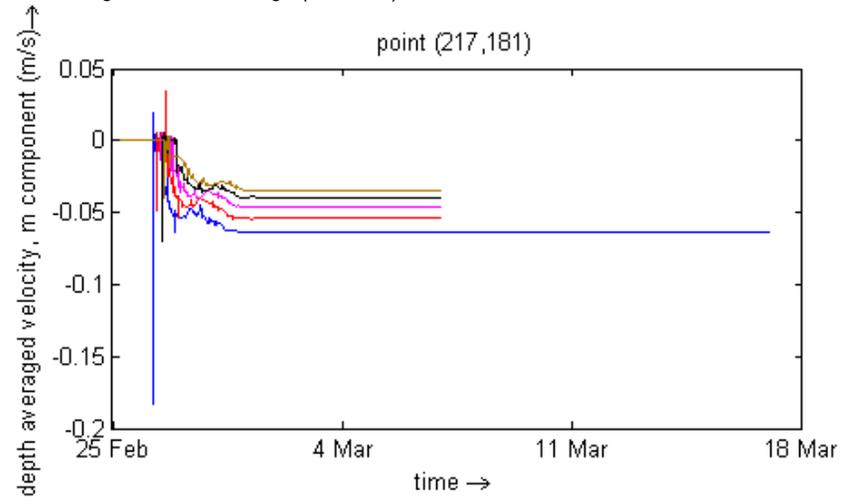
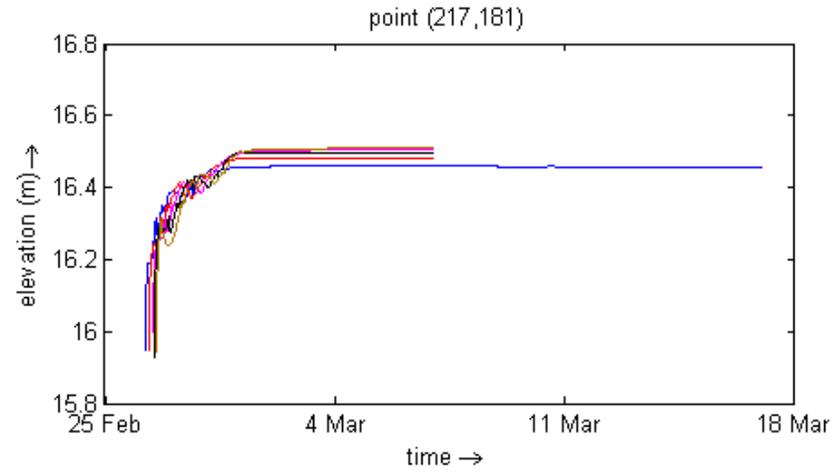
ESCENARIO 4

Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)



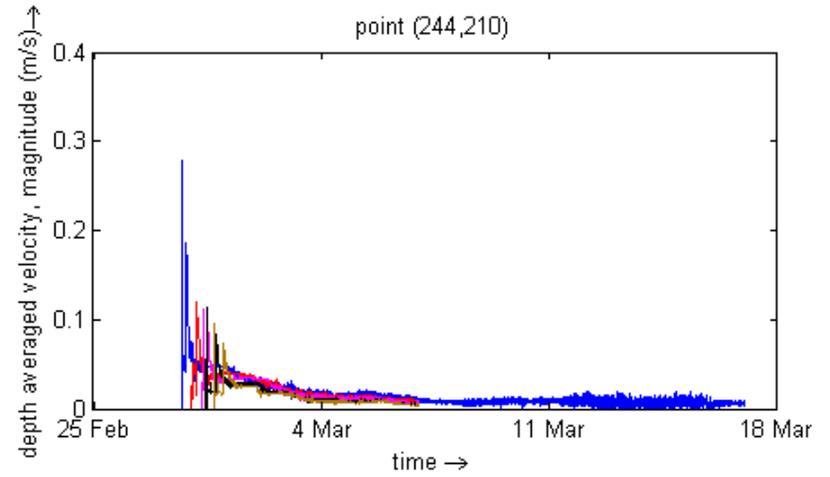
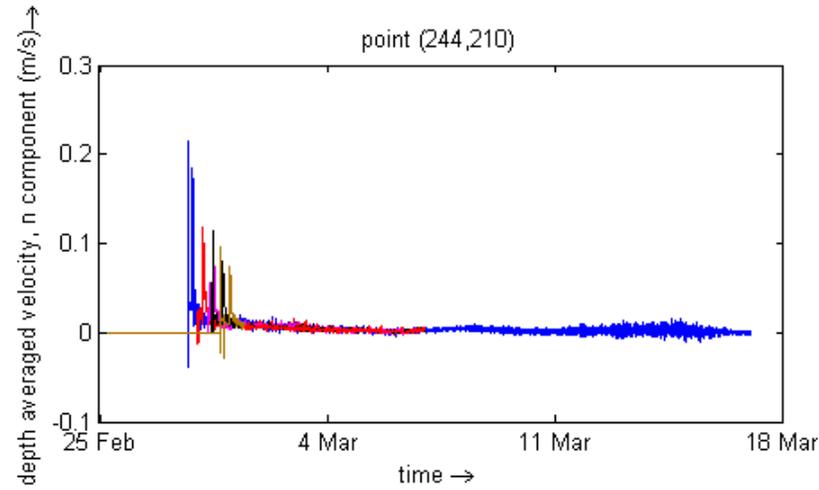
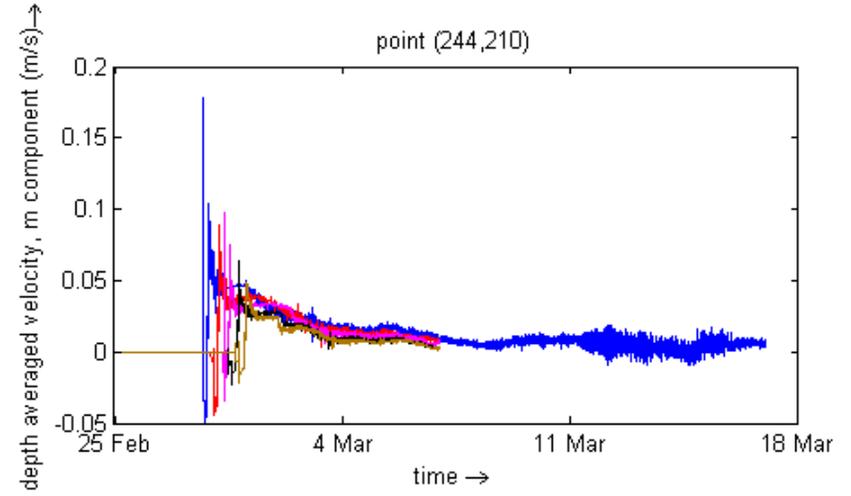
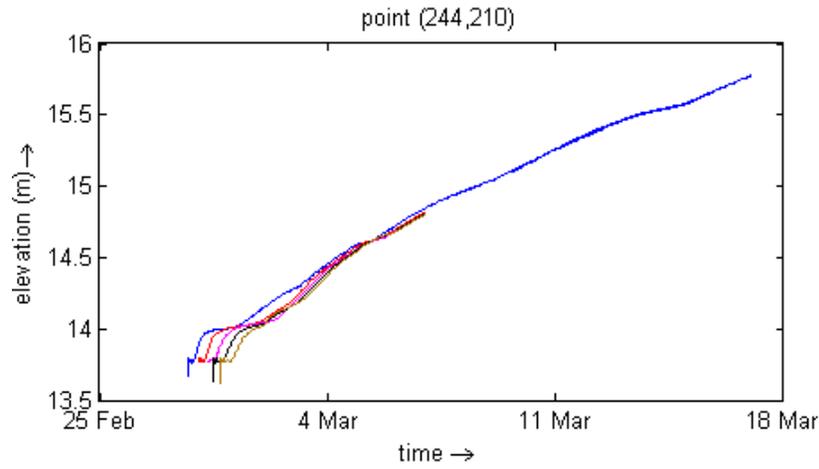
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181)



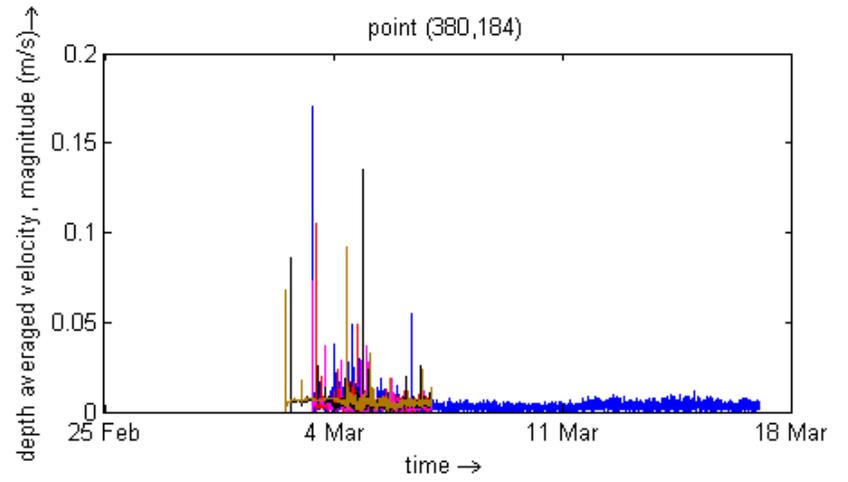
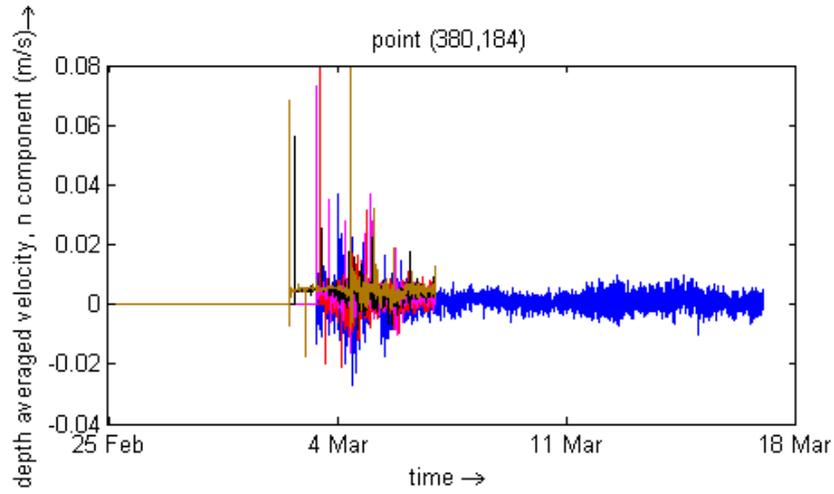
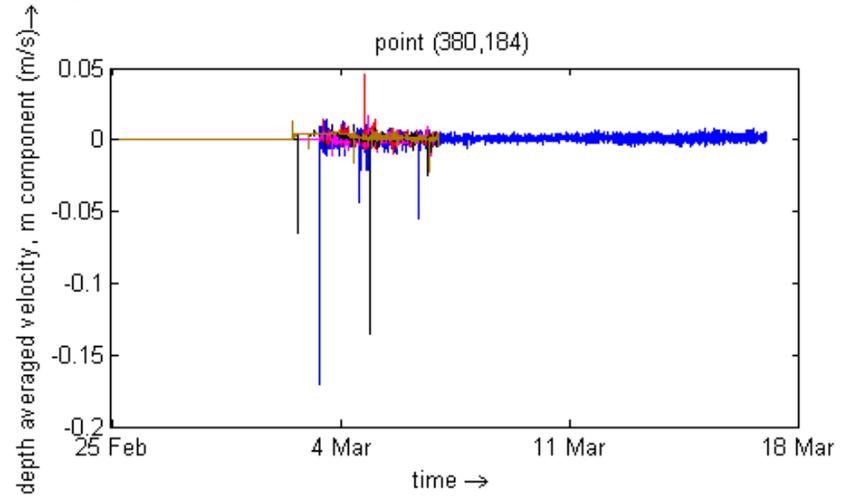
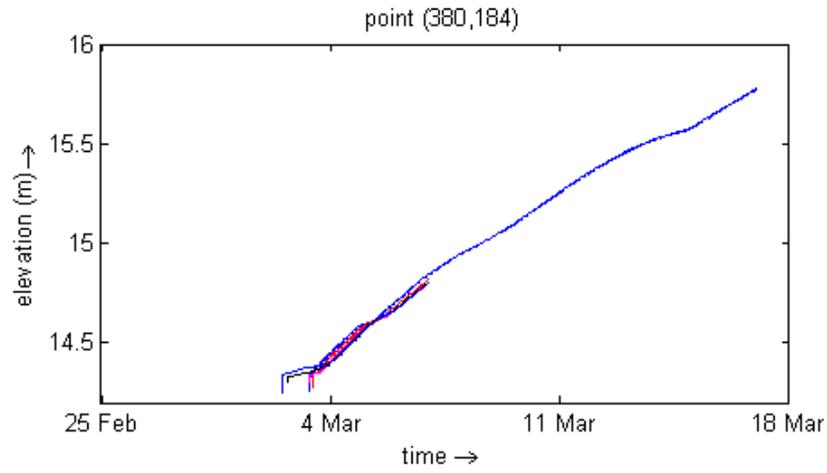
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210)



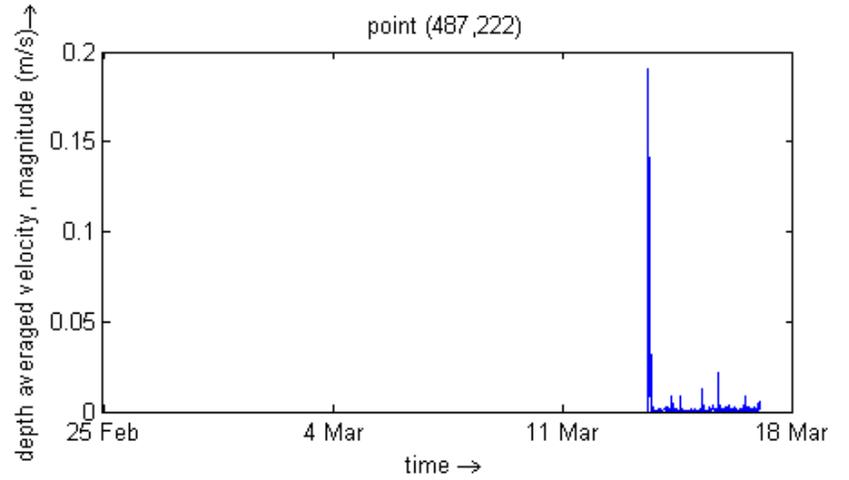
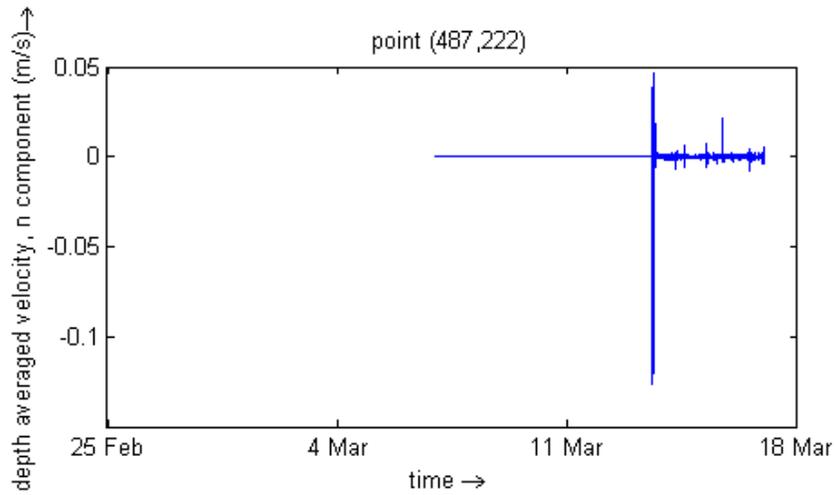
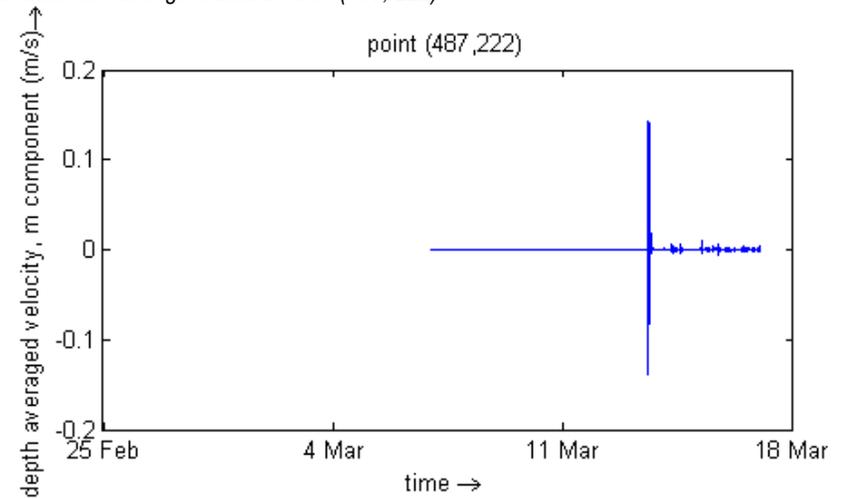
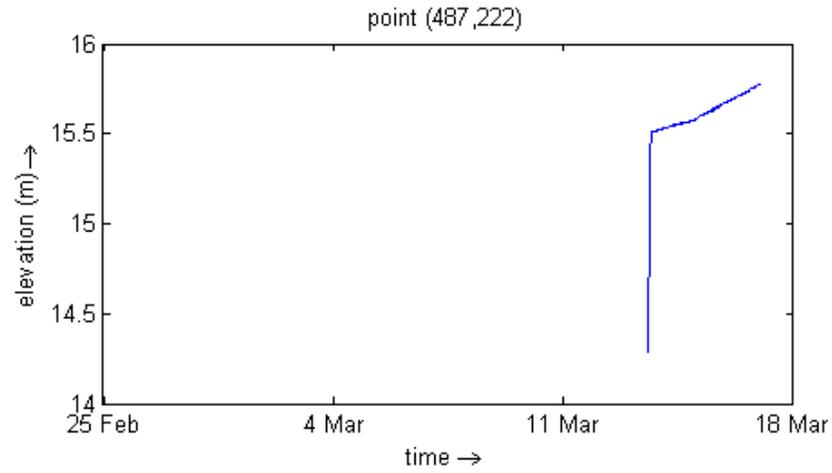
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Ciénaga Cabeza de Vaca (380, 184)



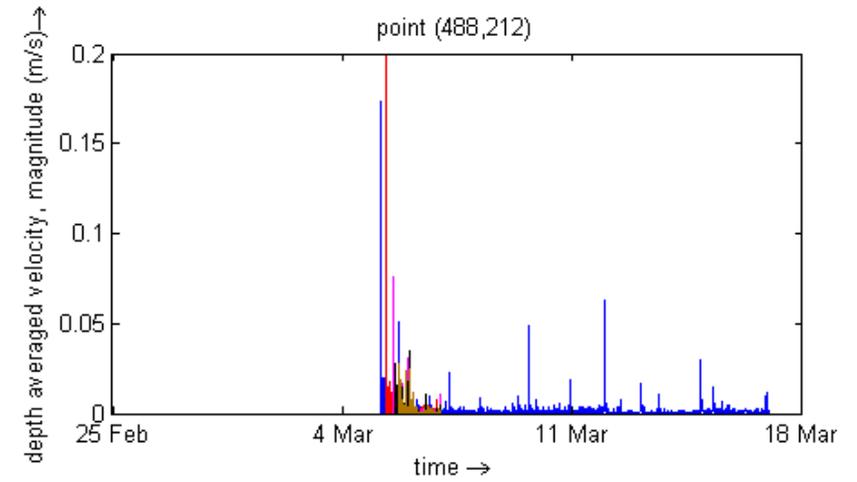
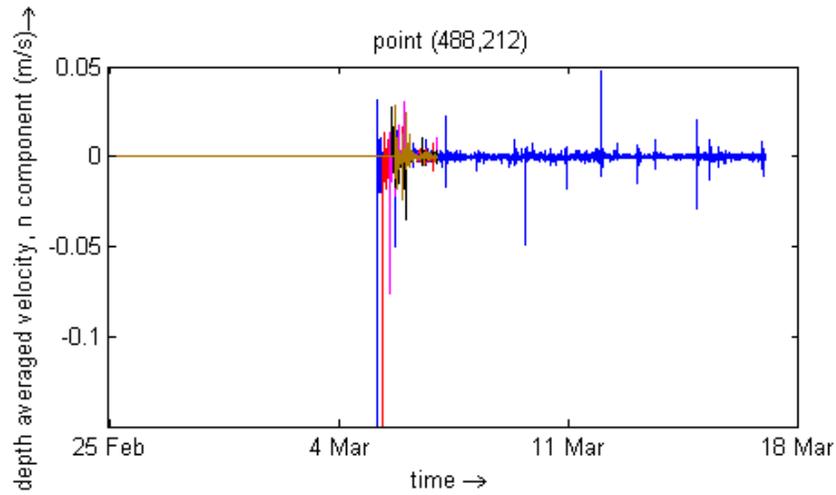
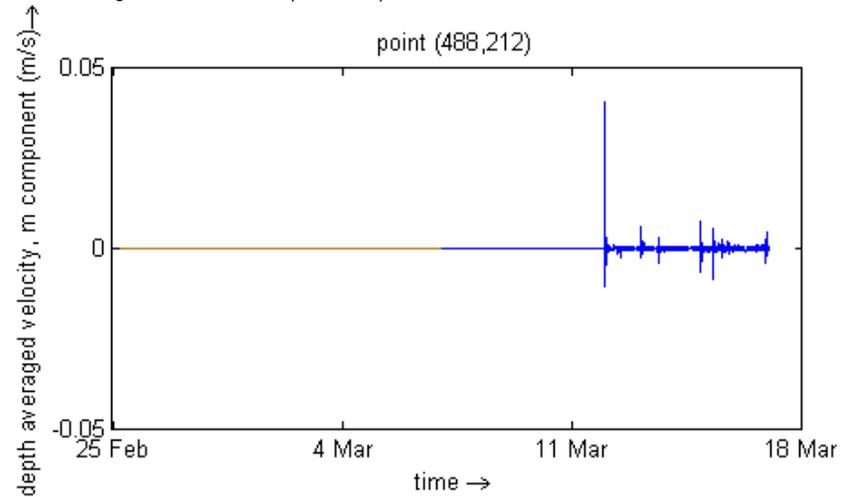
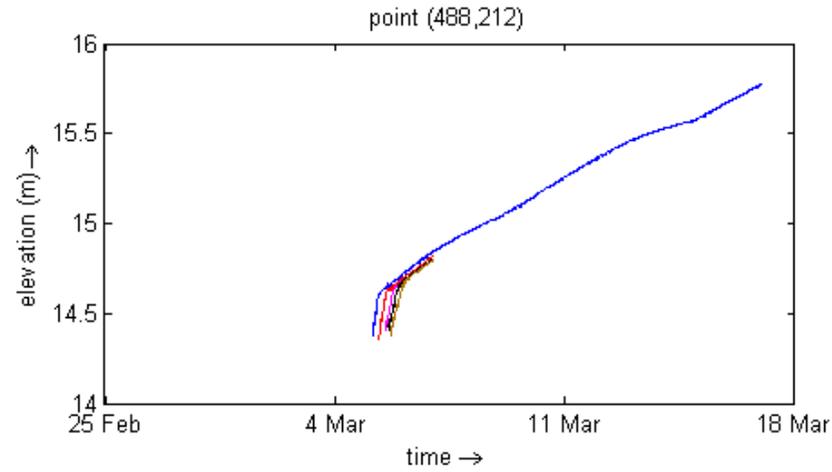
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Caño Grande de Santiago Salida Modelo (487, 222)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

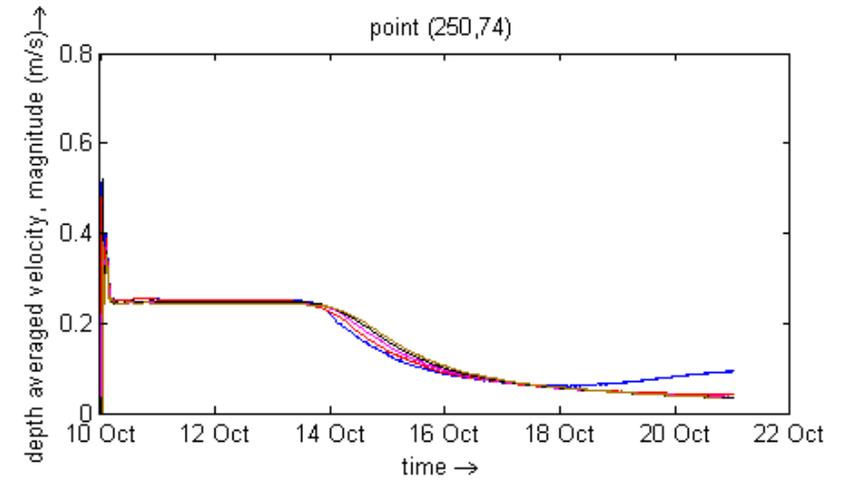
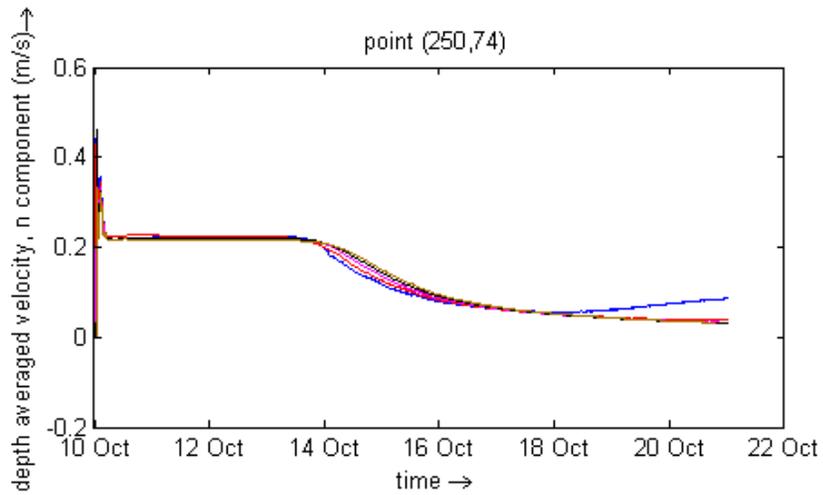
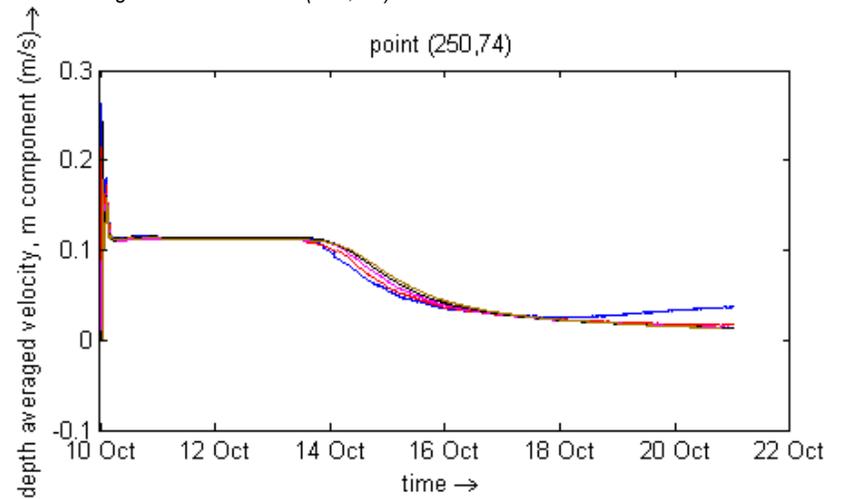
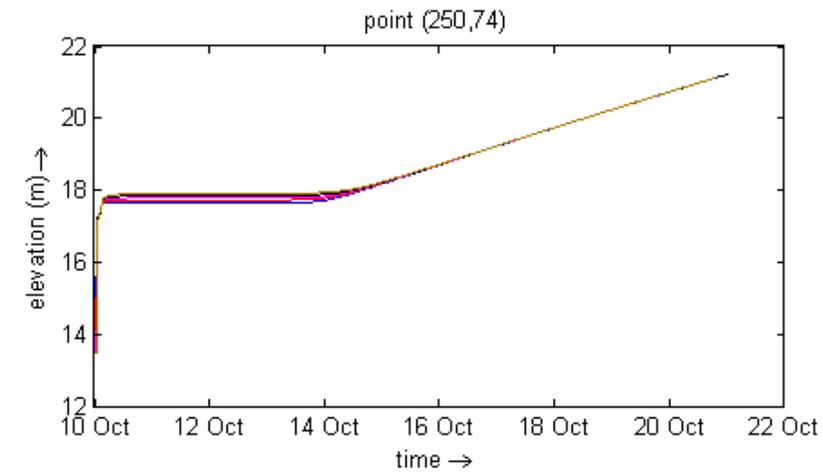
Escenario 4: Caudales Mínimos 2010 – Punto: Río San Jorge Salida Modelo (488, 212)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

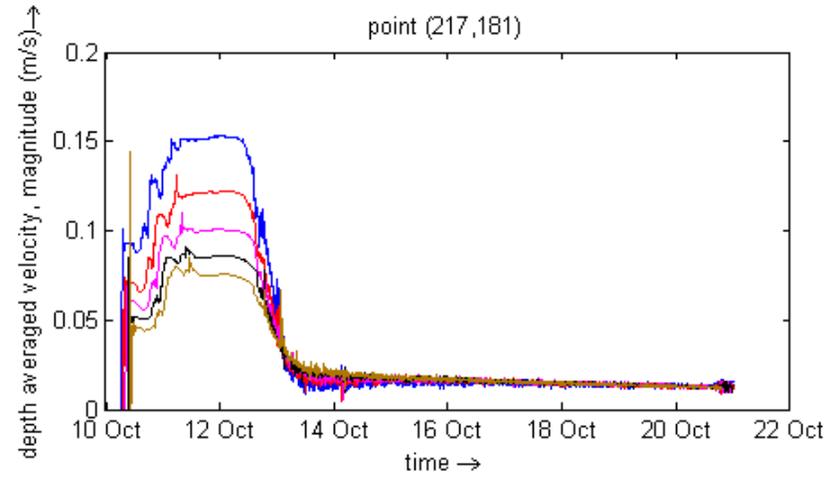
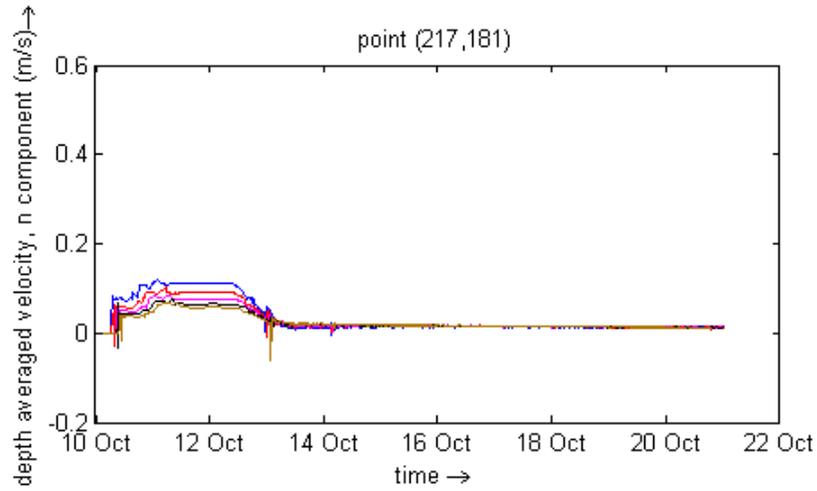
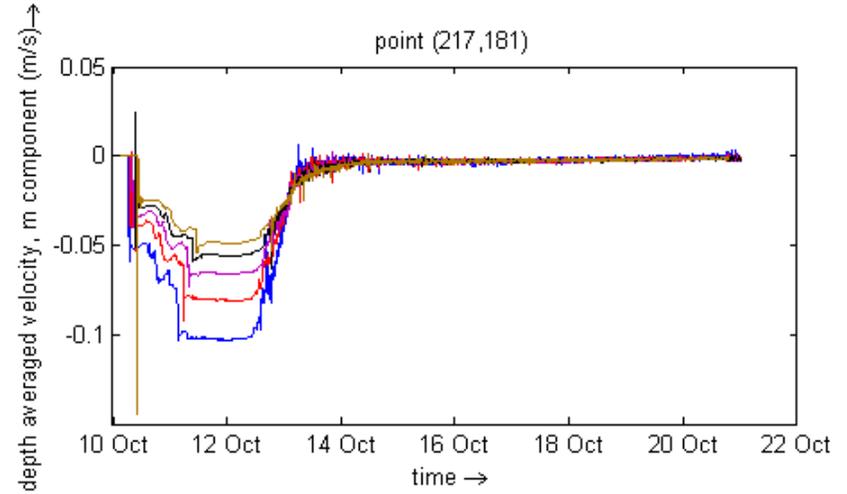
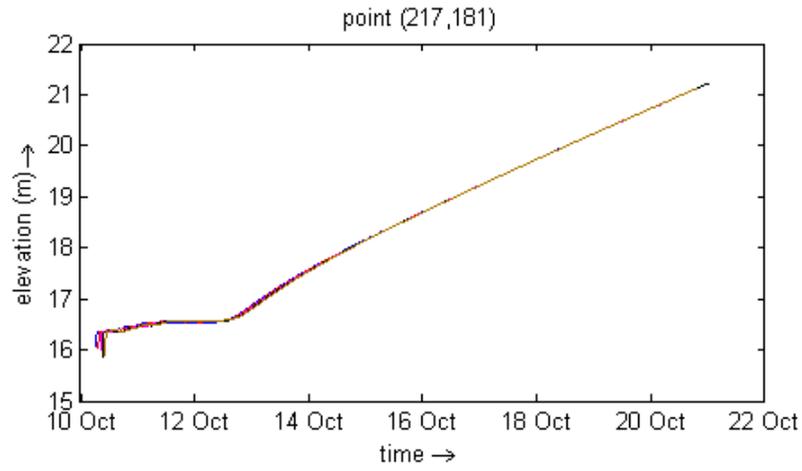
ESCENARIO 5

Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Modelo (250, 74)



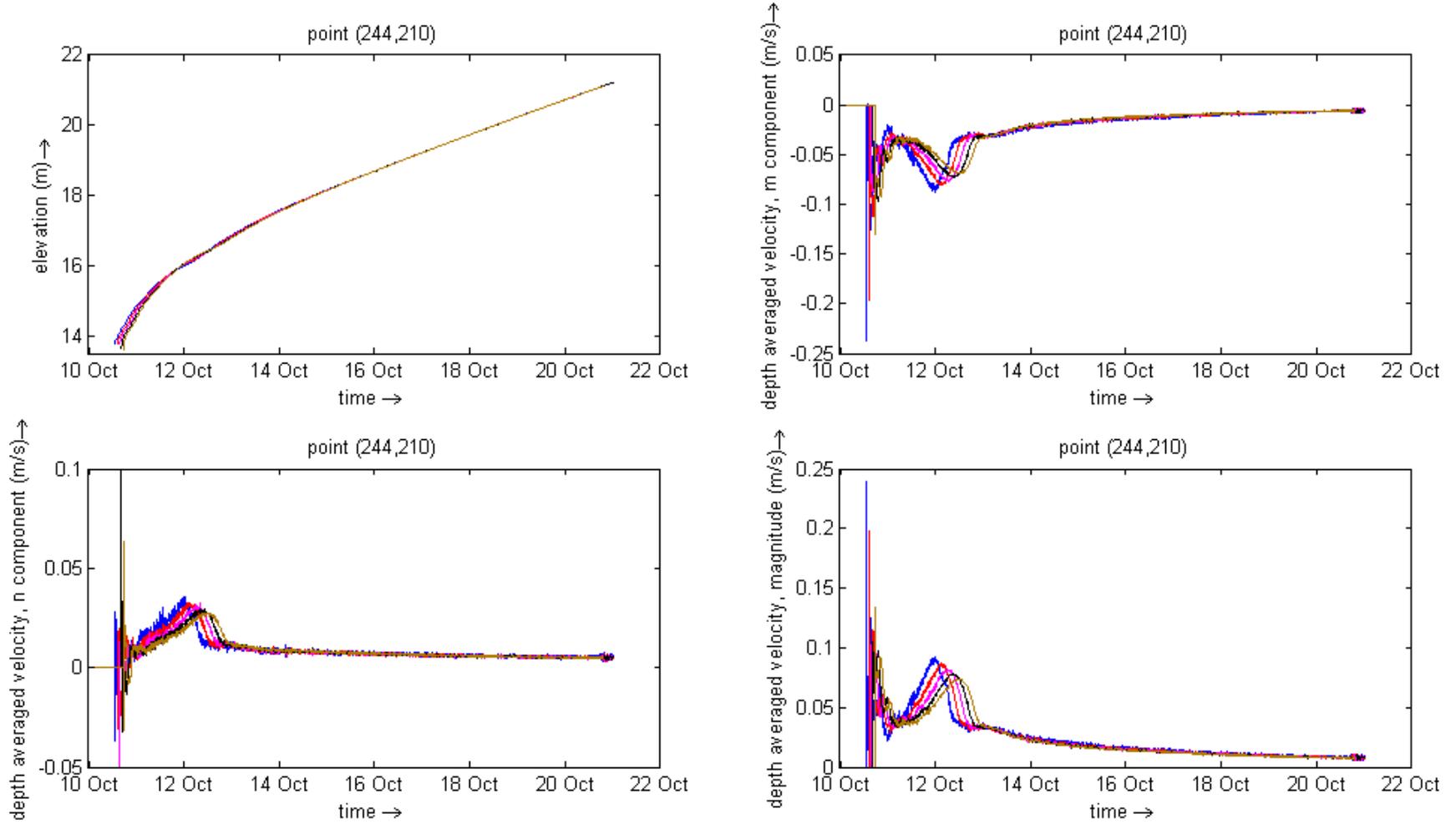
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Río San Jorge Entrada Ciénaga (217, 181)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

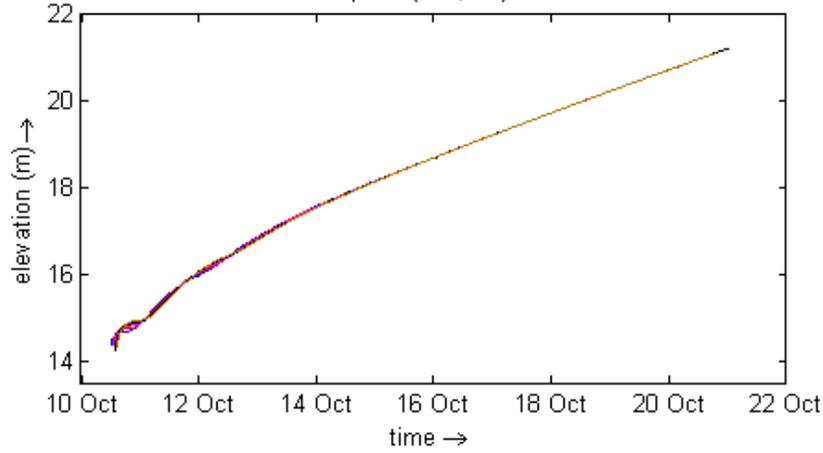
Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Ciénaga La Villa (Centro) (244, 210)



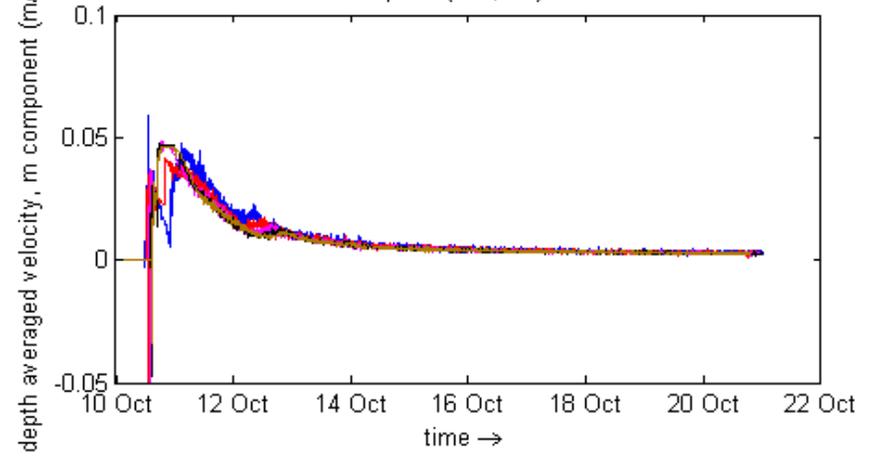
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Ciénaga Cabeza de Vaca (380, 184)

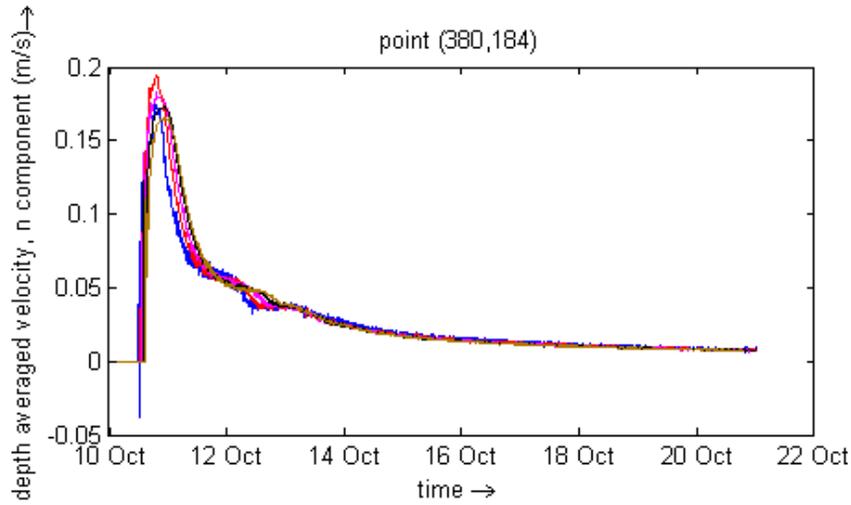
point (380,184)



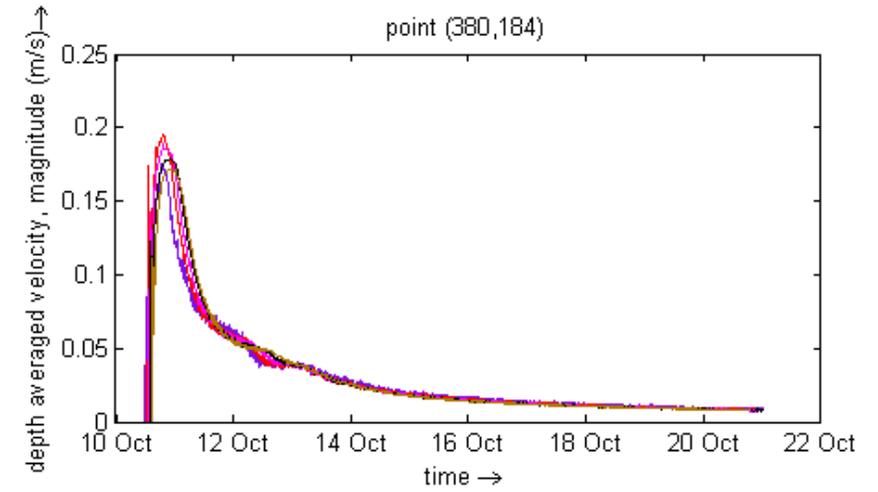
point (380,184)



point (380,184)

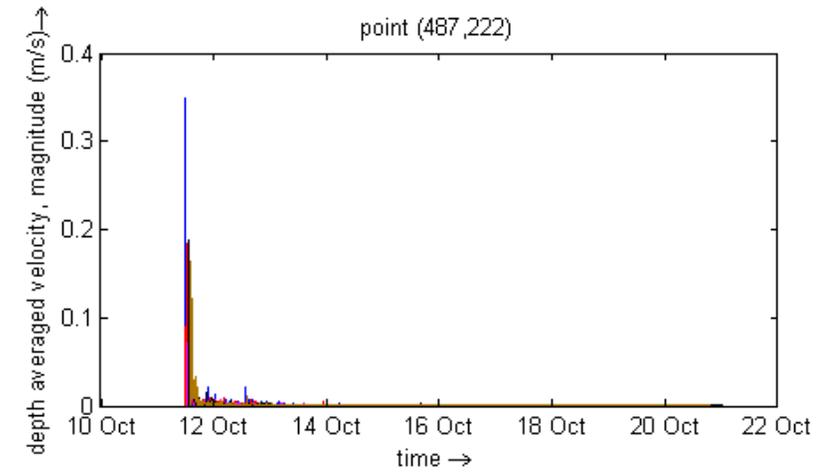
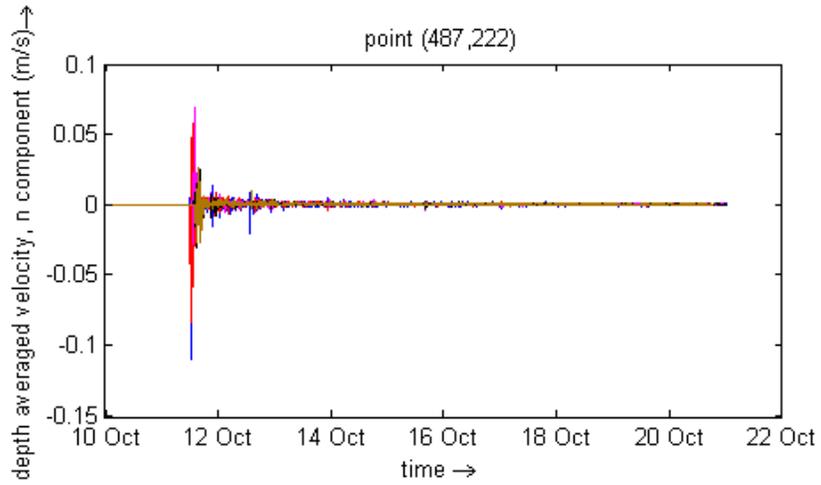
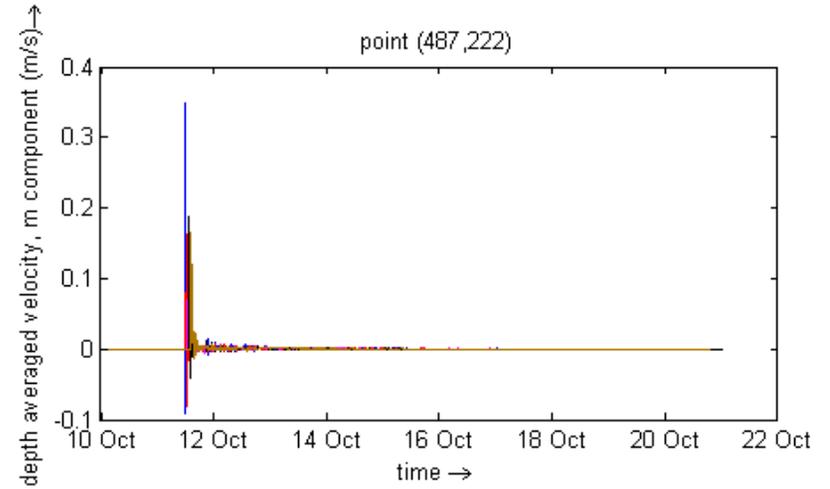
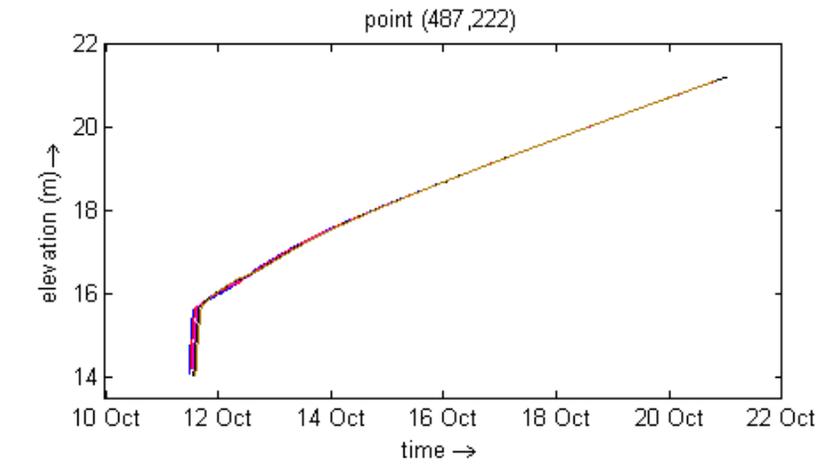


point (380,184)



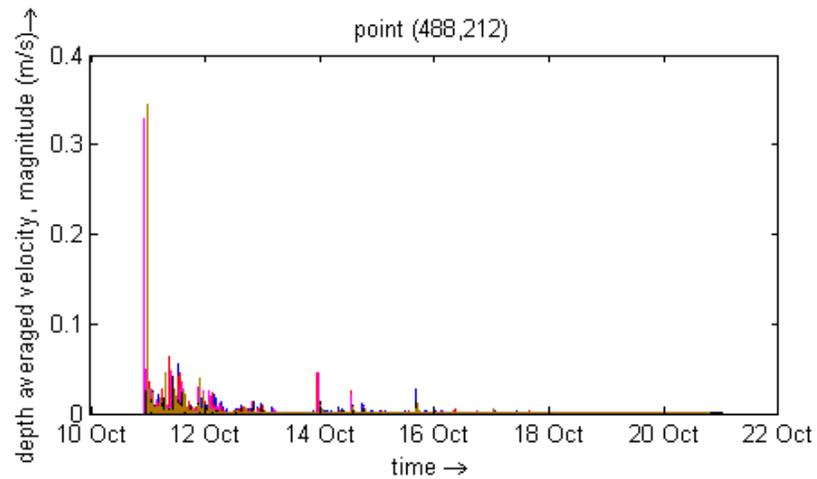
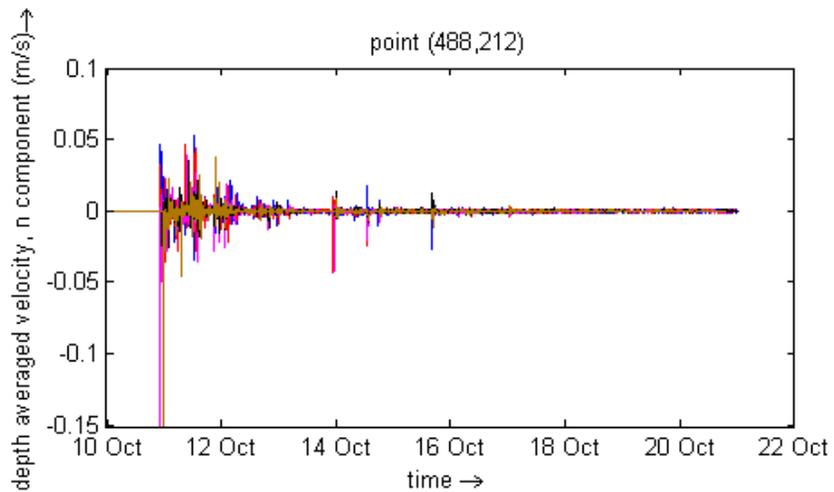
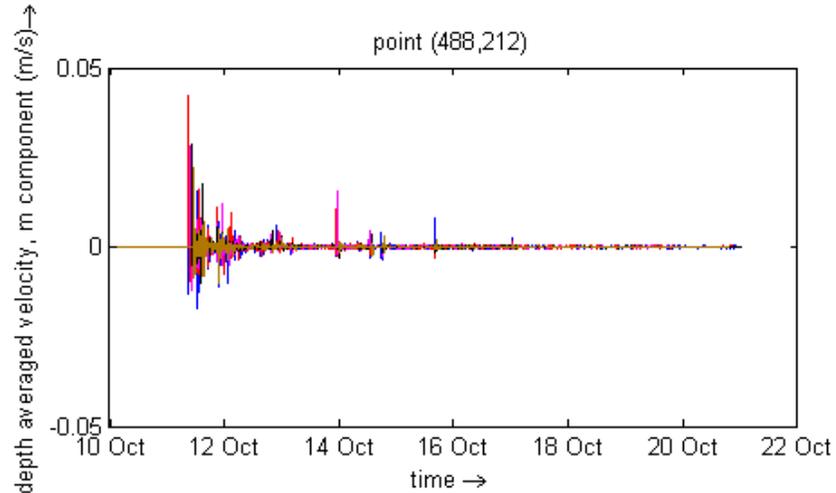
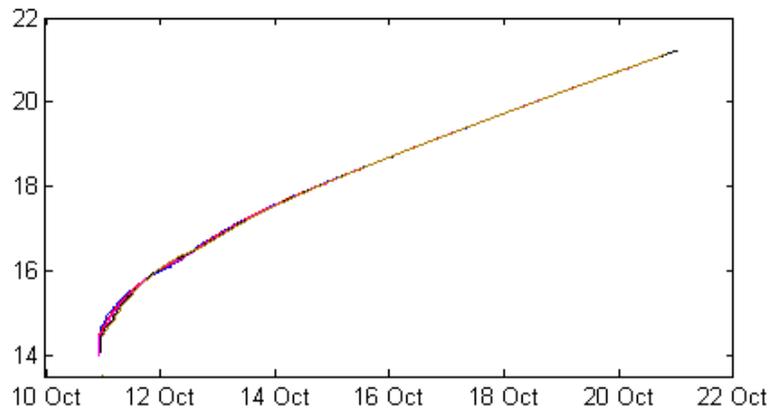
Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Caño Grande de Santiago Salida Modelo (487, 222)



Coeficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

Escenario 5: Caudales Máximos 2010 – Punto: Río San Jorge Salida Modelo (488, 212)



Coefficiente de rugosidad de Manning, — 0.0250, — 0.0388, — 0.0425, — 0.0512, — 0.0600

**ANEXO 2. MODELO HIDRODINÁMICO DE LA CIÉNAGA LA VILLA Y SUS INTERCONEXIONES
NIVELES Y CAMPOS DE VELOCIDAD – ESCENARIO 2**

Solicitar CD-ROM a la Biblioteca “Alfonso Borrero Cabal, S.J. de la Pontificia Universidad Javeriana.